



Dossier 2005 Argile Tome

Évaluation de sûreté du stockage géologique

Juin 2005



ANDRA

Agence nationale
pour la gestion des déchets radioactifs

Sommaire

Sommaire	3
1 Approche de sûreté du dossier 2005	31
1.1 Avant-propos.....	32
1.2 Contexte et objectifs généraux.....	33
1.2.1 Les fondements de la démarche de sûreté.....	33
1.2.2 Le processus itératif de développement du stockage et la place des incertitudes.....	34
1.2.3 Objectifs du dossier.....	35
1.3 Principes généraux guidant l'approche de sûreté.....	36
1.4 Objectifs vis-à-vis de l'impact du stockage.....	37
1.4.1 Impacts considérés	37
1.4.2 Indicateurs d'impact.....	37
1.5 Maîtrise de la production du dossier.....	40
1.5.1 Organisation de l'Andra.....	40
1.5.2 Gestion de projet.....	41
1.5.3 Maîtrise des données.....	42
1.5.4 Prise en compte des références pertinentes	45
1.5.5 Évaluation des travaux.....	48
1.6 Spécificité de l'approche de sûreté du dossier 2005 argile	50
1.6.1 Place de la faisabilité dans l'évaluation de sûreté.....	50
1.6.2 Place et rôle du site de Meuse / Haute-Marne.....	50
1.6.3 Sûreté en exploitation et sûreté à long terme	51
1.7 Présentation générale de la démarche – introduction aux chapitres suivants	53
1.7.1 Présentation des données d'entrée	53
1.7.2 Définition des fonctions de sûreté.....	54
1.7.3 Définition et description du domaine d'évolution normale	55
1.7.4 Gestion des incertitudes et évaluation de la robustesse du stockage.....	56
1.7.5 Conclusion	56
2 Description générale	59
2.1 Les déchets à haute activité et à vie longue.....	60
2.1.1 Nature et provenance des déchets HAVL	60
2.1.2 Conditionnement des déchets HAVL	61
2.1.3 Scénarios pour les études	62
2.1.4 Description des colis types.....	64
2.1.5 Le cas des combustibles usés	74
2.1.6 Nombre et volumes de colis primaires pris en compte	75
2.1.7 Inventaire radiologique pris en compte.....	78

2.2	Le contexte géologique du site de Meuse / Haute Marne	80
2.2.1	Présentation générale du secteur étudié	80
2.2.2	La formation hôte.....	81
2.2.3	Les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien	85
2.2.4	Evolution géoprospective.....	89
2.3	Éléments de description de l'architecture du stockage	92
2.3.1	Les puits et galeries de liaison	93
2.3.2	Les zones de stockage.....	93
3	Fonctions de sûreté et conception du stockage	97
3.1	Introduction sur la conception du stockage.....	99
3.2	Cadre général : les échelles de temps et d'espace	102
3.2.1	Échelles de temps et milieu géologique.....	103
3.2.2	Échelles de temps, décroissance radioactive et transport des radionucléides	103
3.2.3	Échelles de temps, d'espace et décroissance thermique	105
3.2.4	Échelles de temps des phénomènes hydrauliques.....	107
3.2.5	Échelles de temps et d'espace des phénomènes mécaniques et chimiques	109
3.3	L'approche de la sûreté par les fonctions	112
3.4	Principales fonctions de sûreté du stockage	113
3.4.1	Objectif fondamental du stockage.....	113
3.4.2	Principales fonctions de sûreté en exploitation.....	113
3.4.3	Principales fonctions de sûreté à long terme.....	114
3.5	Méthodologie de l'analyse fonctionnelle	119
3.6	Analyse des fonctions de sûreté en phase de construction, exploitation et observation	124
3.6.1	Confiner la radioactivité	124
3.6.2	Protéger les personnes contre l'irradiation.....	124
3.6.3	Rester sous-critique.....	125
3.6.4	Évacuer la puissance thermique résiduelle des déchets	125
3.6.5	Évacuer les gaz de radiolyse	125
3.7	Analyse des fonctions de sûreté en phase de post-fermeture	126
3.7.1	Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines	126
3.7.2	Préserver la mémoire du stockage.....	126
3.7.3	S'opposer à la circulation d'eau.....	128
3.7.4	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	136
3.7.5	Retarder et atténuer la migration des radionucléides	147
3.7.6	Dispositions génériques visant à protéger la roche hôte	149
3.7.7	Synthèse	151

4	La sûreté opérationnelle	153
4.1	Évaluation dosimétrique en exploitation des installations	155
4.1.1	Nature des risques radiologiques et des dispositions envisagées.....	155
4.1.2	Évaluation dosimétrique sur le site et en limite de site	157
4.1.3	Conclusion	161
4.2	Analyse de risque	162
4.2.1	Méthodologie	162
4.2.2	Risques internes relatifs au processus de stockage	163
4.2.3	Risques liés à l'environnement externe du stockage.....	172
4.2.4	Conclusion	173
4.3	Étude du risque lié à l'émission de gaz explosifs par des colis de déchets B	175
4.3.1	Caractéristiques des colis de déchets	175
4.3.2	Analyse en phase d'exploitation	176
4.3.3	Analyse en phase de fermeture du stockage	176
4.3.4	Conclusion	177
4.4	Étude du risque d'incendie dans les installations souterraines du stockage	178
4.4.1	Simulations d'incendie.....	179
4.4.2	Simulation des conditions d'évacuation du personnel.....	183
4.4.3	Conclusion	186
4.5	Étude des conséquences d'un incendie de l'engin de transfert des hottes (B, C et CU)	187
4.5.1	Évaluation des conséquences d'un incendie de l'engin porteur sur la hotte et son contenu	187
4.5.2	Conclusion	191
4.6	Étude des conséquences d'un incendie de l'engin de manutention des colis B	192
4.6.1	Évaluation des conséquences thermomécaniques d'un incendie sur le colis de stockage et les colis primaires contenus	192
4.6.2	Conclusion	194
4.7	Étude des conséquences d'une chute de cage lors du transfert des colis de stockage en puits	195
4.7.1	Évaluation des conséquences mécaniques d'une chute de la cage en puits.....	196
4.7.2	Évaluation des conséquences radiologiques d'une chute de la cage en puits.....	198
4.7.3	Analyse du risque de criticité.....	199
4.7.4	Conclusion	200

4.8	Étude des conséquences d'une chute de colis de stockage B lors de sa mise en place en alvéoles de stockage.....	201
4.8.1	Évaluation des conséquences mécaniques d'une chute de colis de déchets B en alvéole de stockage.....	201
4.8.2	Évaluation des conséquences radiologiques d'une chute de colis de déchets B en alvéole de stockage.....	204
4.8.3	Conclusion.....	205
4.9	Synthèse de l'analyse.....	206
5	Évaluation des performances à long terme du stockage.....	207
5.1	Objectifs du scénario d'évolution normale.....	209
5.1.1	Définition du scénario d'évolution normale.....	209
5.1.2	Objectifs de protection – notion de groupe critique.....	211
5.2	Des modèles conceptuels vers le modèle de calcul de sûreté.....	213
5.2.1	Principes généraux.....	213
5.2.2	Terminologie.....	214
5.3	Description du modèle de sûreté.....	218
5.3.1	Données d'entrée et modalités de traitement.....	218
5.3.2	Représentation des différents compartiments du calcul.....	227
5.4	Evaluation quantitative du SEN.....	266
5.4.1	Contexte.....	266
5.4.2	Performances des fonctions de sûreté : s'opposer à la circulation d'eau.....	268
5.4.3	Performances des fonctions de sûreté : limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage.....	275
5.4.4	Performances des fonctions de sûreté : retarder et atténuer la migration des radionucléides.....	277
5.4.5	Résultats associés à l'impact.....	283
5.4.6	Analyses de sensibilité.....	303
5.5	Principaux enseignements de l'analyse des performances.....	347
6	Gestion des incertitudes.....	349
6.1	Prise en compte des incertitudes dans le dossier 2005.....	351
6.1.1	Typologie des incertitudes.....	351
6.1.2	Maîtrise des incertitudes en phase de recherche.....	353
6.1.3	Incertitudes et échelles de temps.....	353
6.1.4	Incertitudes et échelles d'espace.....	354
6.1.5	Gestion des risques et des incertitudes.....	355

6.2	Principaux résultats du recensement des incertitudes.....	362
6.2.1	Incertitudes sur la connaissance du milieu géologique : la formation hôte	363
6.2.2	Incertitudes sur la connaissance du milieu géologique : les formations encaissantes.....	375
6.2.3	Incertitudes sur la modélisation de la biosphère	381
6.2.4	Incertitudes sur l'inventaire des colis.....	383
6.2.5	Incertitude sur les phénomènes hydrauliques en champ proche	387
6.2.6	Incertitudes sur les phénomènes mécaniques.....	394
6.2.7	Incertitudes sur les modèles de relâchement des matrices de déchets	400
6.2.8	Incertitudes sur l'évolution à long terme des matériaux	406
6.2.9	Risques radiologiques liés à un hypothétique accident de criticité dans le stockage.....	419
6.2.10	Incertitudes sur les phénomènes de transport.....	428
6.2.11	Incertitudes sur les couplages thermiques.....	430
6.2.12	Incertitudes technologiques	432
6.2.13	Incertitudes sur la durée et les modalités de la phase d'exploitation et d'observation	441
6.2.14	Evénements externes.....	442
6.3	Construction des situations altérées.....	450
6.4	Conclusions sur la maîtrise des incertitudes.....	460
7	Evaluation des scénarios d'évolution altérée.....	463
7.1	Définition des scénarios d'évolution altérée	465
7.1.1	Définition des grands types de scénarios	466
7.1.2	Vérification de la cohérence avec la RFS III.2.f.....	467
7.1.3	Modalités génériques de traitement	467
7.2	Le scénario « défaut de scellements ».....	468
7.2.1	Définition du scénario.....	468
7.2.2	Traitement du scénario.....	470
7.2.3	Effets sur les fonctions de sûreté.....	477
7.2.4	Evaluation de l'impact	495
7.2.5	Analyses de sensibilité.....	504
7.2.6	Enseignements du SEA « défaut de scellements ».....	512
7.3	Le scénario « défaut de colis »	514
7.3.1	Définition du scénario.....	514
7.3.2	Traitement du scénario.....	516
7.3.3	Effets sur les fonctions de sûreté.....	517
7.3.4	Calculs d'impact	518
7.3.5	Analyses de sensibilité.....	520
7.3.6	Enseignements du SEA « défaut de colis ».....	529

7.4	Le scénario « forage »	531
7.4.1	Situations à impact immédiat.....	531
7.4.2	Définitions des situations à impact différé.....	534
7.4.3	Traitement du scénario.....	538
7.4.4	Effets sur les fonctions de sûreté.....	546
7.4.5	Evaluation de l'impact.....	568
7.4.6	Analyse de sensibilités.....	574
7.4.7	Enseignements du SEA « forage ».....	597
7.5	Le scénario de « fonctionnement très dégradé »	598
7.5.1	Définition du scénario.....	598
7.5.2	Traitement du scénario.....	598
7.5.3	Effet sur les fonctions de sûreté.....	600
7.5.4	Evaluation de l'impact.....	607
7.5.5	Analyses de sensibilité.....	611
7.5.6	Enseignements du SEA de « fonctionnement très dégradé ».....	612
7.6	Conclusion	613
8	Conclusions	615
8.1	Les enseignements de l'analyse de sûreté	617
8.1.1	La formation hôte.....	617
8.1.2	Les scellements et les barrières ouvragées.....	618
8.1.3	Les éléments de colisage.....	618
8.1.4	Les déchets primaires.....	619
8.2	Les pistes de progrès possibles	620
8.3	Conclusion générale	622
	Annexe de présentation des courbes	623
	Références bibliographiques	731

Tables des illustrations

Encadrés

Encadré 1	La réversibilité du stockage	99
Encadré 2	La définition du système de stockage	119
Encadré 3	La méthode mise en œuvre pour l'analyse fonctionnelle.....	121
Encadré 4	Les différents niveaux de modélisation	210
Encadré 5	Du modèle hydrogéologique vers le calcul d'impact.....	257
Encadré 6	Architecture de modélisation	266
Encadré 7	Le nombre de Péclet.....	269
Encadré 8	Exemple d'illustration d'application de la méthodologie d'analyse qualitative de sûreté	360
Encadré 9	Code d'atténuation et de transport du rayonnement utilisé pour l'évaluation de dose du foreur.....	533

Synoptiques

Synoptique 1-1	Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse.....	57
Synoptique 3-1	Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : fonctions de sûreté et conception du stockage.....	98
Synoptique 4-1	Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : études de sûreté en exploitation liées à l'ingénierie du stockage	154
Synoptique 5-1	Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : conceptualisation et définition du scénario d'évolution normale et évaluation des performances du stockage.....	208
Synoptique 6-1	Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : analyse des incertitudes.....	350
Synoptique 7-1	Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : analyse phénoménologique des situations altérées, définition des scénarios d'évolution altérée et évaluation de la robustesse du stockage en conséquence.....	464
Synoptique 8-1	Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : Conclusions.....	616

Figures

Figure 1.7-1	Organisation de la structure documentaire du dossier 2005.	54
Figure 2.1-1	Conteneur Standard de Déchets Compactés (CSD-C)	65
Figure 2.1-2	Fûts inox STE3/STE2 et STEL.....	66
Figure 2.1-3	Fût inox utilisé pour le reconditionnement des fûts primaires en acier non allié.....	66
Figure 2.1-4	Fût en inox de 1800 litres contenant des déchets de structure cimentés	68
Figure 2.1-5	Blocs sources	70
Figure 2.1-6	Conteneur Standard de Déchets Vitrifiés (CSD-V)	73
Figure 2.1-7	Assemblage combustible REP	74
Figure 2.1-8	Activité en PA/PF des différents colis types.....	79
Figure 2.1-9	Activité en actinides des différents colis types	79
Figure 2.2-1	Bloc diagramme géologique 3D du site de Meuse / Haute-Marne	80
Figure 2.2-2	Schématisation de la texture et de la porosité du Callovo-Oxfordien.....	83
Figure 2.2-3	Représentation schématique des lithologies et des horizons poreux dans le Dogger carbonaté sur le site de Meuse / Haute-Marne	85
Figure 2.2-4	Représentation des niveaux poreux dans l'Oxfordien carbonaté à l'état actuel.....	87
Figure 2.2-5	Cadre géodynamique de l'Est de la France : liaison entre la sismicité et l'épaisseur de la croûte.....	90
Figure 2.3-1	Vue stylisée d'une architecture de stockage en cours d'exploitation.....	92
Figure 2.3-2	Organisation de la zone de stockage B	94
Figure 2.3-3	Modules de stockage de déchets C	95
Figure 2.3-4	Synoptique d'exploitation et de fermeture.....	95
Figure 3.2-1	Puissance thermique des colis de déchets	107
Figure 3.2-2	Transitoire hydraulique pendant la phase d'exploitation.....	108
Figure 3.2-3	Schéma des écoulements convergents (→) et de l'extension de la zone désaturée en paroi des alvéoles (---)	108
Figure 3.4-1	S'opposer à la circulation d'eau.....	116
Figure 3.4-2	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	117
Figure 3.4-3	Illustration schématique du retard et de l'atténuation apportés sur une concentration de radionucléides en solution, en fonction du temps.....	118
Figure 3.4-4	Limiter et atténuer la migration des radionucléides.....	118
Figure 3.5-1	Illustration des marges et des fonctions de réserve.....	121
Figure 3.7-1	« Mémoire détaillée » réalisée sur du papier permanent et conservée aux Archives nationales de France, centre des archives contemporaines.....	127
Figure 3.7-2	Représentation de la zone endommagée (EDZ).....	130
Figure 3.7-3	Exemple de machine à attaque ponctuelle de grande puissance	131
Figure 3.7-4	Taux de vide résiduel dans les alvéoles (principe des alvéoles de déchets B – à gauche et des alvéoles de déchets C – à droite)	132

Figure 3.7-5	Schéma de principe des scellements de galerie.....	133
Figure 3.7-6	Arborescence d'éléments borgnes	136
Figure 3.7-7	Schéma de principe du complément de colisage de déchets B	138
Figure 3.7-8	Schéma d'alvéole de déchets B avec bouchon ancré dans la zone micro-fissurée	140
Figure 3.7-9	Schéma de principe du colis de stockage des colis-type de déchets C vitrifiés (verre, conteneur et surconteneur).....	142
Figure 3.7-10	Schéma de principe d'une alvéole de déchets C fermée	144
Figure 3.7-11	Schéma de principe des alvéoles de combustibles usés	146
Figure 3.7-12	Schéma de principe d'un conteneur de combustible usé (UOx).....	147
Figure 3.7-13	Résultats expérimentaux d'évolution du coefficient de diffusion effective pour le chlorure en fonction de la température pour deux échantillons d'argilite (COx S1, COx S2).....	148
Figure 3.7-14	Fonctions de sûreté au cours du temps.....	151
Figure 4.2-1	Caractérisation d'un risque	162
Figure 4.2-2	Test d'écrasement d'un matériau « nid d'abeille » (vitesse d'impact de 200 km/h).....	169
Figure 4.2-3	Schéma des dispositifs de réduction de risque envisagés vis-à-vis du transfert de colis en puits	170
Figure 4.4-1	Puissance thermique totale standardisée pour un feu de 30 MW.....	180
Figure 4.4-2	Circulation des fumées et évacuation dans le cas d'un incendie dans une unité C (ou CU) en exploitation.....	181
Figure 4.4-3	Cas d'incendie avec fumées stratifiées	181
Figure 4.4-4	Cas d'un incendie en galerie de liaison : évacuation de part et d'autre de l'incendie	182
Figure 4.4-5	Incendie dans une galerie en cul-de-sac : évacuation du personnel par une recoupe vers la galerie contiguë ou mise en sécurité dans un refuge mobile.....	183
Figure 4.4-6	Évolution spatio-temporelle de la température de l'air (°C) dans le cas d'un incendie dans une galerie d'accès aux alvéoles C en exploitation nucléaire – Représentation du déplacement des personnes situées en aval de l'aéragé de l'incendie	184
Figure 4.5-1	Champ de températures au niveau des colis primaires de boues bitumées (B2.1) dans le cas d'un incendie de l'engin de transfert.....	189
Figure 4.6-1	Champ de températures au niveau des colis primaires de boues bitumées (B2.1) dans le cas d'un incendie en alvéole de stockage	194
Figure 4.7-1	Représentation 3D de la partie basse du puits avec le système amortisseur de chute	195
Figure 4.7-2	Bilan énergétique d'une chute en puits d'une cage transportant une hotte avec déchets C.....	197
Figure 4.8-1	Scénario de chute d'un colis de stockage sur le sol de l'alvéole	202
Figure 4.8-2	Déformations plastiques du colis primaire B2.1 (Chute de 6 mètres du colis de stockage sur un coin).....	203
Figure 4.8-3	Déformations plastiques du colis primaire B5.2 (chute de 6 mètres du colis de stockage sur un coin	204

Figure 5.3-1	Site Meuse / Haute Marne – Limite de la zone de transposition.....	219
Figure 5.3-2	Position des zones de stockage des colis types de combustibles usés – Exemple du colis type CU1 et CU2 du scénario S2	221
Figure 5.3-3	Extension de l'EDZ en fonction de la profondeur et de l'orientation du stockage	237
Figure 5.3-4	Représentation des alvéoles de déchets B et des caractéristiques de confinement mobilisées.....	240
Figure 5.3-5	Représentation équivalente des bouchons d'alvéoles de déchets B et des scellements.....	242
Figure 5.3-6	Représentation des alvéoles de déchets C – Propriétés de confinement mobilisées	243
Figure 5.3-7	Représentation des alvéoles de combustibles usés – Propriétés de confinement mobilisées.....	244
Figure 5.3-8	Représentation des scellements et caractéristiques de confinement mobilisées	245
Figure 5.3-9	Représentation équivalente des galeries	246
Figure 5.3-10	Formations géologiques au niveau du site Meuse / Haute Marne et position du stockage au sein du Callovo-Oxfordien.....	248
Figure 5.3-11	Phénomènes de transport et de rétention prépondérants dans le Callovo- Oxfordien considérés dans le SEN.....	249
Figure 5.3-12	Facteur correctif appliqué au coefficient de diffusion effectif à 20 °C pour la prise en compte de la température – combustibles usés CU1 (COX = Callovo-Oxfordien).....	251
Figure 5.3-13	Facteur correctif appliqué au coefficient de diffusion effectif à 20 °C pour la prise en compte de la température – combustibles usés CU2 et déchets C vitrifiés	251
Figure 5.3-14	Représentation des encaissements et de propriétés de confinement mobilisées	255
Figure 5.3-15	Trajectoires des écoulements et exutoires potentiels au niveau du site – modèle hydraulique à 1 million d'années	261
Figure 5.3-16	Trajectoires des écoulements et exutoires potentiels au niveau du site – modèle hydraulique à l'actuel.....	262
Figure 5.3-17	Voies de transfert prises en compte dans le modèle de biosphère	264
Figure 5.4-1	SEN - Quantification des voies de transfert « ouvrages et puits » et « barrière géologique saine »	270
Figure 5.4-2	SEN - Historique de débit molaire au toit de la formation hôte - exemple de l'iode 129 du colis type CU1 (BO = barrière ouvragée, COX = Callovo- Oxfordien).....	271
Figure 5.4-3	SEN - Répartition entre les voies de transfert « diffusives » et « convectives ».....	272
Figure 5.4-4	SEN - Répartition de la masse à travers les différents compartiments de calcul (iode 129 des CU1) (COX = Callovo-Oxfordien).....	273
Figure 5.4-5	SEN - Evolution des débits molaires à travers le stockage – ¹²⁹ I – CU1 (Cox = Callovo-Oxfordien).....	274
Figure 5.4-6	SEN - Evaluation du nombre de Péclet dans les ouvrages de stockage pour les colis types CU1.....	275

Figure 5.4-7	Grandeurs retenues pour évaluer le retard et l'atténuation	278
Figure 5.4-8	SEN – Piézométrie (charges hydrauliques en mètres NGF) et principales trajectoires convectives dans l'Oxfordien, et temps de transfert convectifs jusqu'aux exutoires dans le schéma géoprospectif à 1 million d'années.....	283
Figure 5.4-9	SEN - Trajectoires convectives dans le Dogger et localisation de l'exutoire	284
Figure 5.4-10	SEN - Panaches de concentration molaire de l'iode ^{129}I (mol/m ³) dans le niveau poreux représentant Hp1-Hp4 (coupe horizontale) à différentes dates – CU1.....	285
Figure 5.4-11	SEN - Colis type CU1 - Historiques de débit molaire à travers différentes surfaces du milieu géologique et quantification de l'atténuation des différentes formations pour le modèle à 1 million d'années.....	286
Figure 5.4-12	SEN - Panaches de concentration dans les différents horizons du Dogger (coupe verticale) à différentes dates et historiques de débit molaire à travers les différentes surfaces ^{129}I – modèle Dogger– colis- type CU1	287
Figure 5.4-13	SEN - Sensibilité au modèle hydrogéologique - cartographie hydraulique des charges (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹) dans Hp1-Hp4 et exutoires associés.....	288
Figure 5.4-14	SEN - Colis type CU1 – ^{129}I - historique de débit molaire dans les deux configurations du modèle hydrogéologique.....	288
Figure 5.4-15	SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis type CU1	293
Figure 5.4-16	SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis type CU2	294
Figure 5.4-17	SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis type CU3	294
Figure 5.4-18	SEN –modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - colis types C0.....	294
Figure 5.4-19	SEN –modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - colis types (C1+C2).....	295
Figure 5.4-20	SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - colis types (C3+C4).....	295
Figure 5.4-21	SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - colis types (B1x).....	295
Figure 5.4-22	SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis types (B1h).....	296
Figure 5.4-23	SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - colis types B2	296
Figure 5.4-24	SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - autres colis types B.....	296
Figure 5.4-25	Coupe verticale 2D - panaches de concentration en antimoine à 10 ⁶ ans	298
Figure 5.4-26	SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d'années – Colis types C1/C2 – Bore - Impact chimique à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l'ingestion (QD)	301
Figure 5.4-27	SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d'années – Colis types C1/C2 – Nickel - Impact chimique à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l'ingestion (QD)	301

Figure 5.4-28	SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d’années – Colis types C1/C2 – Nickel - Impact chimique à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l’inhalation (QD)302	302
Figure 5.4-29	SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d’années – Colis types C1/C2 – Nickel - Impact chimique à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien lié aux effets cancérigènes pour l’inhalation (ERI)302	302
Figure 5.4-30	SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d’années – Colis types C1/C2 – Sélénium - Impact chimique à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l’ingestion (QD)302	302
Figure 5.4-31	SEN - Sensibilité aux paramètres hydrauliques : colis type CU2 – ¹²⁹ I – historique de débit molaire.....306	306
Figure 5.4-32	SEN - Propagation des charges hydrauliques (charges en mètres NGF ⁷¹) dans les ouvrages d’accès du stockage – EDZ « dégradée »308	308
Figure 5.4-33	SEN - Sensibilité : EDZ « dégradée » (Zone fracturée pénalisante, zone micro-fissurée conservative) - Colis type CU1 – ¹²⁹ I - Valeurs du nombre de Péclet.....309	309
Figure 5.4-34	SEN - Sensibilité : EDZ « dégradée » (Zone fracturée pénalisante, zone micro-fissurée conservative) - Colis type CU1 – ¹²⁹ I – Historique de débits molaire310	310
Figure 5.4-35	SEN - Sensibilité : EDZ « dégradée » (Zone fracturée pénalisante, zone micro-fissurée conservative) - Colis type CU1 – ¹²⁹ I - Répartition des voies de transfert310	310
Figure 5.4-36	SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CU1 – ¹²⁹ I – Historique de débit molaire313	313
Figure 5.4-37	SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CU1 – ⁷⁹ Se – Historique de débit molaire.....313	313
Figure 5.4-38	SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CU1 – ¹⁴ C – Historique de débit molaire314	314
Figure 5.4-39	SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CU1 – ¹⁰ Be – Historique de débit molaire314	314
Figure 5.4-40	SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CU1 – ⁹³ Zr – Historique de débit molaire.....315	315
Figure 5.4-41	SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – Colis type CU1 – Modèle à 1 million d’années.....316	316
Figure 5.4-42	SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – Colis type CU2 – Modèle à 1 million d’années.....316	316
Figure 5.4-43	SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – Colis types (C1+C2)317	317
Figure 5.4-44	SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – Colis types (C3+C4)317	317
Figure 5.4-45	SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – Colis types de déchets B (B1x).....318	318

Figure 5.4-46	SEN - Sensibilité au coefficient de retard de l'iode dans le Callovo-Oxfordien : colis type CU1 – ^{129}I – Historique de débit molaire319
Figure 5.4-47	SEN - Sensibilité à l'épaisseur de Callovo-Oxfordien (150 mètres au lieu de 130 mètres en référence) - Colis type CU1 – ^{129}I – Historique de débits molaire. (COX = Callovo-Oxfordien).....320
Figure 5.4-48	SEN - Comparaison des facteurs de correction diffusifs (thermique phénoménologique et thermique pénalisante) – colis type CU1.....321
Figure 5.4-49	SEN - Sensibilité au modèle de référence retenu pour les colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (modèle pénalisant) - colis type B1x – ^{36}Cl - historique de débit molaire322
Figure 5.4-50	SEN - Sensibilité au modèle de référence retenu pour les colis type B2 (modèle pénalisant) - colis type B2 – ^{129}I - historique de débit molaire322
Figure 5.4-51	SEN - Evolution du débit molaire sortant des alvéoles de déchets B1x pour ^{129}I et ^{36}Cl – comparaison avec et sans conteneurage efficace.....323
Figure 5.4-52	SEN - Sensibilité aux performances du conteneurage - colis type B1x – ^{129}I - historique de débit molaire324
Figure 5.4-53	SEN - Sensibilité aux paramètres du terme source de référence des colis C (modèle $V_0.S \rightarrow V_r$) - colis type C1 + C2 – ^{129}I - historique de débit molaire324
Figure 5.4-54	SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis C (modèle $V_0.S$) - colis type C1 + C2 – ^{129}I - Historique de débit molaire325
Figure 5.4-55	SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis C (modèle $V_0.S$) – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - colis type C1 + C2326
Figure 5.4-56	SEN - Sensibilité aux paramètres du modèle de relâchement de référence des colis combustibles usés (valeurs conservatives) - colis type CU1 – ^{129}I - historique de débit molaire.....327
Figure 5.4-57	SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis combustibles usés (contrôle par la solubilité de l'uranium) - colis type CU1 – ^{129}I - historique de débit molaire.....328
Figure 5.4-58	SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis combustibles usés (contrôle par la solubilité de l'uranium) - colis type CU1 – ^{129}I - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien329
Figure 5.4-59	Pression d'eau dans le Callovo-Oxfordien (COX) au-dessus du stockage – colis type CU1331
Figure 5.4-60	SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – Charge hydraulique imposée pendant la phase de surpression – colis type CU1332
Figure 5.4-61	SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – Charge hydraulique imposée pendant la phase de surpression – colis type B1x.....332
Figure 5.4-62	SEN - calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – cartographies de charges hydrauliques en mètres (NGF ⁷¹) (m) pour les ouvrages d'accès et les zones de stockage de combustibles usés CU1333
Figure 5.4-63	SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – ^{129}I – combustibles usés CU1334
Figure 5.4-64	SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historiques de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien pour un

	alvéole de déchet B1x - comparaison des cas avec et sans surpressions hydrauliques – ^{129}I	335
Figure 5.4-65 :	SEN – calcul de sensibilité sur l’influence du transitoire hydraulique – cartographies de charges hydrauliques en mètres (NGF ⁷¹) (m) pour les ouvrages d’accès et les zones de stockage de colis B1x	336
Figure 5.4-66 :	SEN – calcul de sensibilité sur l’influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – ^{129}I – Colis types non organiques ne dégageant pas d’hydrogène gazeux.	337
Figure 5.4-67	SEN - Sensibilité aux propriétés diffusives des couches semi-perméables des encaissants sus-jacents - colis type CU1 – ^{129}I - Dose à l’exutoire Saulx et Ornain de l’Oxfordien – comparaison calcul de référence /étude de sensibilité	338
Figure 5.4-68	SEN - Sensibilité aux propriétés diffusives des couches semi-perméables des encaissants sus-jacents - colis type CU1 – ^{129}I - Dose à l’exutoire Barrois – comparaison calcul de référence /étude de sensibilité (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹)	339
Figure 5.4-69	SEN - Positions du stockage étudiées en sensibilité (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹)	340
Figure 5.4-70	SEN – sensibilité à la position du stockage - trajectoires hydrauliques dans les horizons poreux Hp1-Hp4 – Position du stockage Nord (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹)	341
Figure 5.4-71	SEN – sensibilité à la position du stockage - trajectoires hydrauliques dans les horizons poreux Hp1-Hp4 – Position du stockage Nord	342
Figure 6.2-1	Site Meuse / Haute-Marne – Localisation des principaux forages.....	364
Figure 6.2-2	Variation lithologique et minéralogique verticale du Callovo-Oxfordien	367
Figure 6.2-3	Représentation schématique de la charge hydraulique dans les différentes couches.....	368
Figure 6.2-4	Evaluation du gradient de charge hydraulique vertical, déduit des charges dans les encaissants, au travers du Callovo-Oxfordien.....	371
Figure 6.2-5	Différentes échelles de fracturation	376
Figure 6.2-6	Succion dans différents milieux poreux en fonction du degré de saturation en eau	389
Figure 6.2-7	Schéma illustrant les trois modes d’évacuation des gaz dans les alvéoles de déchets C.....	391
Figure 6.2-8	Représentation schématique de la progression de l’hydrolyse des matériaux cimentaires en paroi de galeries.	396
Figure 6.2-9	Situation hypothétique d’endommagement d’une coupure hydraulique de scellement par les gaz	399
Figure 6.2-10	Schéma de principe des modèles de relâchement pour les boues bitumées	402
Figure 6.2-11	Evolution de l’état chimique des matériaux cimentaires	408
Figure 6.2-12	Schéma du conteneur de déchets vitrifiés, montrant la présence des patins céramiques	410
Figure 6.2-13	Schéma illustrant le retrait du soutènement à proximité des coupures hydrauliques de scellement.	414
Figure 6.2-14	Représentation de l’extension de la perturbation alcaline sur les bouchons d’alvéoles de déchets C.....	415

Figure 6.2-15	Représentation schématique d'une perturbation fer-argile	417
Figure 6.2-16	Vue en coupe des variantes option V1 et option V2 de colis de stockage CU1 contenant 4 assemblages combustibles.....	421
Figure 6.2-17	Evolution des assemblages des colis de combustibles usés suite à la corrosion de l'insert et à l'expansion de volume associée	422
Figure 6.2-18	Evolution du colis de combustible usé suite à la corrosion de l'insert et à l'expansion de volume associée.....	423
Figure 6.2-19	Jeux résiduels de mises en place dans les alvéoles de déchets B	434
Figure 6.2-20	Jeux résiduels de mise en place dans les alvéoles de déchets C	435
Figure 6.2-21	Schéma de principe de la mise en place d'un remblai de galerie.....	436
Figure 6.2-22	Scellement expérimental constitué de briques de bentonite – essai TSX mené au Canada (à l'échelle industrielles, ces briques seraient de dimensions supérieures).....	437
Figure 6.2-23	Conceptualisation de la discontinuité de la zone fracturée au niveau des saignées (située à la profondeur maximale sur la zone de transposition, soit 630 m).....	438
Figure 6.2-24	Représentation détaillée d'une soudure de surconteneur (ou de conteneur).....	439
Figure 6.2-25	Variations de la température en antarctique (Vostock) durant les derniers 400 000 ans	443
Figure 6.2-26	Extension des perturbations induites par le pergélisol.....	445
Figure 7.2-1	Représentation schématique des différents ouvrages de scellement.....	469
Figure 7.2-2	SEA défaut de scellements - Prise en compte de la variation de la perméabilité des matériaux	471
Figure 7.2-3	Représentation schématique d'un scellement de puits défailant.....	472
Figure 7.2-4	Représentation schématique de la défaillance des scellements de galerie par les ancrages	473
Figure 7.2-5	SEA défaut de scellements : coupe verticale traversant les ouvrages de liaison et le puits - Piézométrie dans la zone de stockage de combustibles usés CU1 – scellements de puits défailants (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹).....	479
Figure 7.2-6	SEA défaut de scellements - Coupe horizontale traversant le stockage – Piézométrie dans la zone de stockage de combustibles usés CU1 – Scellements de puits défailants (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹).....	479
Figure 7.2-7	SEA défaut de scellements - Colis type CU1 - Débit hydraulique sortant des puits - situation de scellements des puits défailants et abandon du stockage (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹)	480
Figure 7.2-8	SEA défaut de scellements - Colis type CU1 - Débit hydraulique sortant des puits - Situation de défaillance des scellements de galeries – Calcul de référence (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹)	481
Figure 7.2-9	SEA défaut de scellements - Coupe verticale traversant les ouvrages de liaison et le puits – piézométrie dans la zone de stockage de combustibles usés CU1 - tous scellements défailants (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹).....	482
Figure 7.2-10	SEA défaut de scellements - Coupe horizontale traversant le stockage – Piézométrie dans la zone de stockage de combustibles usés CU1 – tous scellements défailants (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹).....	482

Figure 7.2-11	SEA défaut de scellements - Colis type CU1 - débit hydraulique sortant des ouvrages d'accès - situation « tous scellements défailants » - calcul de référence.....	483
Figure 7.2-12	SEA défaut de scellements - Voies de transfert dans le cas des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés	484
Figure 7.2-13	SEA défaut de scellements - Voies de transfert potentielles en cas de défaut de scellements	484
Figure 7.2-14	SEA défaut de scellements - Echanges depuis la galerie vers la barrière géologique dans le cas de radionucléides non sorbés et fortement sorbés dans la barrière géologique	485
Figure 7.2-15	SEA défaut de scellements - Répartition des voies de transfert intégrées à un million d'années – situation de tous scellements défailants - ¹²⁹ I- colis types CU1	490
Figure 7.2-16	SEA défaut de scellements - toute situation de défaillance – historique de débit molaire - calcul de référence : colis type CU1- ¹²⁹ I	491
Figure 7.2-17	SEA défaut de scellements - Coupe verticale et horizontale traversant les ouvrages et le puits – piézométrie (en mètres NGF ⁷¹) - colis types C1/C2 et C3/C4 – tous scellements défailants	493
Figure 7.2-18	SEA défaut de scellements - situation de défaillance de tous les scellements – historique de débit molaire - calcul de référence - colis type C1/C2 - ¹²⁹ I.....	494
Figure 7.2-19	SEA défaut de scellements - Coupes verticale et horizontale traversant les ouvrages – Piézométrie au niveau des modules de déchets B accueillant les colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (alvéole type B1x) – Tous scellements défailants	494
Figure 7.2-20	SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants : calcul de référence- Historique de débit molaire - colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène - ¹²⁹ I et ³⁶ Cl	495
Figure 7.2-21	SEA défaut de scellements - Scellement de puits défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU1	496
Figure 7.2-22	SEA défaut de scellements - Scellement de Galeries défailant – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU1	496
Figure 7.2-23	SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU1	497
Figure 7.2-24	SEA défaut de scellements – Abandon du scellement de puits – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU1	497
Figure 7.2-25	SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis type CU1	498
Figure 7.2-26	SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU2	499
Figure 7.2-27	SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis type CU2	499

Figure 7.2-28	SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types C1/C2.....	500
Figure 7.2-29 :	SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types C1/C2.....	500
Figure 7.2-30	SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types C3/C4.....	501
Figure 7.2-31	SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types C3/C4.....	501
Figure 7.2-32	SEA défaut de scellements - Scellements de puits défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types B1x.....	502
Figure 7.2-33	SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types B1x.....	502
Figure 7.2-34	SEA défaut de scellements - Toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types B1x.....	503
Figure 7.2-35	SEA défaut de scellements - Toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types B2.....	503
Figure 7.2-36	SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants - Sensibilité à l'EDZ et à la perméabilité du noyau de bentonite– colis type CU1 - débit hydraulique sortant des ouvrages d'accès (H = charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹).....	505
Figure 7.2-37	SEA défaut de scellements - historique de débit molaire – Tous scellements défailants : Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement : colis type CU1 - ¹²⁹ I, ³⁶ Cl, ⁷⁹ Se, ¹⁴ C.....	506
Figure 7.2-38	SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU1.....	507
Figure 7.2-39	SEA défaut de scellements - Scellements de puits défailants – Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU1.....	508
Figure 7.2-40	SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU2.....	509
Figure 7.2-41	SEA défaut de scellements - Scellements de puits défailants – Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU2.....	509
Figure 7.2-42	SEA défaut de scellements – étude de sensibilité au gradient de charge – historiques de débits molaires – situation tous scellements défailants - combustibles usés CU1 – ¹²⁹ I.....	511
Figure 7.3-1	SEA défaut de colis - Courbes de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien – comparaison ¹²⁹ I, ³⁶ Cl et ⁷⁹ Se entre la situation SEN (colis	

	défaillant) et SEA défaut de colis (référence – 30 colis défaillants) – combustibles usés CU1	518
Figure 7.3-2	SEA défaut de colis - Coupe horizontale dans Hp1-Hp4 (Oxfordien) des concentrations de l'iode 129 des CU1 de 10 000 ans à 40 000 ans	519
Figure 7.3-3	SEA défaut de colis - Evolution du débit molaire cumulé en sortie de Callovo-Oxfordien – comparaison « tous colis défaillants » et SEN – combustibles usés CU1	520
Figure 7.3-4	SEA défaut de colis - Evolution du débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien – comparaison « tous colis défaillants » et SEN – combustibles usés CU1	521
Figure 7.3-5	SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défaillants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis type CU1	522
Figure 7.3-6	SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défaillants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis type CU2	523
Figure 7.3-7	SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défaillants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis type C1/C2	523
Figure 7.3-8	SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défaillants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis type C3/C4	523
Figure 7.3-9	SEA défaut de colis - calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historiques de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien pour un motif de 6 alvéoles de CU1 - comparaison des cas avec et sans suppressions hydrauliques (¹²⁹ I)	525
Figure 7.3-10	SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – ¹²⁹ I – combustibles usés CU1	526
Figure 7.3-11	SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – cas tous colis défaillants- ¹²⁹ I – combustibles usés CU1	527
Figure 7.3-12	SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – prise en compte du degré de saturation des ouvrages sur la valeur de la perméabilité - ¹²⁹ I – combustibles usés CU1	528
Figure 7.3-13	SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – prise en compte du perméabilité de l'ancrage équivalent des scellements de 10 ⁻¹⁰ m/s - ¹²⁹ I – combustibles usés CU1	529
Figure 7.4-1	SEA forage dans le stockage avec remontée de carottes de déchets - Débit de dose des carottes de déchets – colis types B1, B5, C2, CU1, B8	533
Figure 7.4-2	SEA forage abandonné dans le stockage – situation de référence pour les colis de déchets C vitrifiés – forage dans une galerie d'accès	536
Figure 7.4-3	SEA forage abandonné dans le stockage – situation de référence pour les colis de déchets B - Forage dans une alvéole de déchets	537
Figure 7.4-4	SEA forage abandonné dans le stockage – calcul de l'impact radiologique à l'exutoire pompage AEP dans le Barrois (exutoire de référence)	538
Figure 7.4-5	SEA forage abandonné dans le stockage - calcul de l'impact radiologique à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien calcaire – modèle hydrogéologique à l'actuel	539
Figure 7.4-6	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage (forage dans une alvéoles de combustibles usés)	541

Figure 7.4-7	SEA forage abandonné dans le stockage – sensibilité à la position du forage (forage dans une galerie de liaison secondaire).....	542
Figure 7.4-8	SEA forage abandonné dans le stockage – sensibilité doublet de forage - conditions aux limites du modèle stockage (doublet de forage).....	543
Figure 7.4-9	SEA forage abandonné dans le stockage – sensibilité doublet de forage - positionnement du doublet de forages.	543
Figure 7.4-10	SEA forage abandonné dans le stockage - représentation du forage dans le milieu géologique.....	548
Figure 7.4-11	SEA forage abandonné dans le stockage - profil de charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹ dans le forage.....	549
Figure 7.4-12	SEA forage abandonné dans le stockage - profil de charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹ dans les galeries (l'extrémité droite représente un passage de scellement).....	550
Figure 7.4-13	SEA forage abandonné dans le stockage - vitesse de Darcy et nombre de Pécelet dans les galeries d'une sous-zone de colis CU1.....	551
Figure 7.4-14	SEA forage abandonné dans le stockage- nombre de Pécelet dans les alvéoles de combustibles usés CU1.....	552
Figure 7.4-15	SEA forage abandonné dans le stockage - voies de transfert dans le cas des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés.....	553
Figure 7.4-16	SEA forage abandonné dans le stockage - Historique de débit molaire en champ proche et détail de répartition des voies de transfert - ¹²⁹ I.....	556
Figure 7.4-17	SEA forage abandonné dans le stockage - Historique de débit molaire en champ proche et détail de répartition des voies de transfert – Nickel 59.....	559
Figure 7.4-18	SEA forage abandonné dans le stockage - Organisation des voies de transfert en champ proche alvéole – alvéole de déchets B.....	563
Figure 7.4-19	SEA forage abandonné dans une alvéole de déchets B - Historique de débit molaire en champ proche – colis type B1x – ¹²⁹ I.....	567
Figure 7.4-20	SEA forage abandonné dans une alvéole de déchets B - Historique de débit molaire en champ proche – colis type B1x – ³⁶ Cl.....	567
Figure 7.4-21	Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP Barrois (tous radionucléides) – forage dans un module de colis type CU1-UOx3.....	570
Figure 7.4-22	Dose due au forage à l'exutoire « Saulx » - (Produits de fission et d'activation) – forage dans un module de colis type CU1-UOx3.....	570
Figure 7.4-23	SEA forage abandonné dans le stockage - Calcul de référence – Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP dans le Barrois (tout radionucléides)- forage dans un module de colis type CU2.....	571
Figure 7.4-24	SEA forage abandonné dans le stockage - Calcul de référence – Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP Barrois (tout radionucléides) – forage dans un module de colis types C2.....	572
Figure 7.4-25	SEA forage abandonné dans le stockage - Calculs de sensibilité - Dose due au forage à l'exutoire « Saulx ».....	572
Figure 7.4-26	SEA forage abandonné dans le stockage - Calcul de référence – Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP dans le Barrois (tous radionucléides) - forage dans un module de colis types C4.....	572
Figure 7.4-27	SEA forage abandonné dans le stockage - Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP Barrois – colis-type B1x.....	573

Figure 7.4-28	SEA forage abandonné dans le stockage - Dose due au forage – Exutoire Pompage à proximité de la Saulx – Colis type B1x.....	573
Figure 7.4-29	SEA forage abandonné dans le stockage - Dose due au forage – Exutoire Pompage AEP Barrois – Colis type B2	574
Figure 7.4-30	SEA forage abandonné dans le stockage - Dose due au forage – Exutoire Pompage à proximité de la Saulx – Colis type B2 Bitumes	574
Figure 7.4-31	SEA forage dans le stockage – étude de sensibilité à la position du forage (forage dans une alvéole de combustibles usés CU1) – champ de charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹ dans la zone de stockage	575
Figure 7.4-32	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire CU1 – UOx3 – ¹²⁹ I.....	575
Figure 7.4-33	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire CU – ⁵⁹ Ni	576
Figure 7.4-34	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage (forage dans une alvéole) – historique de dose à l'exutoire pompage AEP – CU1 – Uox3.....	577
Figure 7.4-35	SEA forage abandonné dans le stockage – étude de sensibilité à la position du forage (forage dans une galerie d'accès aux alvéoles de déchets B- colis type B1x – champ de charge hydraulique en mètres NGF ⁷¹ dans la zone de stockage	578
Figure 7.4-36	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ³⁶ Cl	578
Figure 7.4-37	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ¹²⁹ I.....	579
Figure 7.4-38	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ¹⁴ C.....	579
Figure 7.4-39	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage - historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ⁵⁹ Ni	580
Figure 7.4-40	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage (forage dans une galerie de liaison de déchet B) - historique de dose à l'exutoire pompage AEP – colis types non organiques ne dégagent pas d'hydrogène (B1x).....	580
Figure 7.4-41	SEA forage abandonné dans le stockage – étude de sensibilité doublet de forage aux extrémités des galeries d'accès aux alvéoles de combustibles usés – colis type CU1 – champ de charge hydraulique hydraulique en mètres NGF ⁷¹ dans la zone de stockage.....	581
Figure 7.4-42	SEA forage dans le stockage – étude de sensibilité doublet de forage au centre des galeries d'accès aux alvéoles de combustibles usés – colis type CU1 – champ de charge hydraulique hydraulique en mètres NGF ⁷¹ dans la zone de stockage	581
Figure 7.4-43	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité – doublet de forage aux extrémités d'une galerie (situation 1) – historique de dose – combustibles usés CU1 – ¹²⁹ I.....	583

Figure 7.4-44	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité – doublet de forages aux milieux de deux demi-modules de stockage (situation 2) – historique de dose – combustibles usés CU1 – ^{129}I	583
Figure 7.4-45	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) – historique de débit molaire – colis type de C2 - ^{129}I	584
Figure 7.4-46	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) – historique de débit molaire – colis type de C2 - ^{36}Cl	584
Figure 7.4-47	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) - historique de débit molaire – colis type de C2 - ^{129}I	585
Figure 7.4-48	SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Comparaison entre le modèle EDZ (best-estimate) et EDZ (dégradée).....	586
Figure 7.4-49	SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – Sn126 – C2 – Comparaison entre le modèle EDZ (best-estimate) et EDZ (dégradée).....	587
Figure 7.4-50	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à l'EDZ « dégradée » - dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type C2.....	587
Figure 7.4-51	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres géochimiques conservatifs de la bentonite – dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type CU1.....	591
Figure 7.4-52	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres géochimiques conservatifs de la bentonite – dose due à l'exutoire pompage AEP au forage – colis type CU2.....	591
Figure 7.4-53	SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Comparaison entre le modèle $V_{0,S}$ et $V_{0,S} \rightarrow V_R$	592
Figure 7.4-54	SEA forage abandonné dans le stockage – débit molaire cumulé et normé en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Comparaison entre le modèle $V_{0,S}$ et $V_{0,S} \rightarrow V_R$	592
Figure 7.4-55	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au modèle de relâchement des verres » - dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type C2.....	593
Figure 7.4-56	SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Sensibilité aux paramètres conservatifs du modèle de relâchement $V_{0,S}$ des verres.....	594
Figure 7.4-57	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres conservatifs du modèle de relâchement $V_{0,S}$ des verres – dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type C2.....	594
Figure 7.4-58	SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres conservatifs du modèle de relâchement $V_{0,S}$ des verres - dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type C4.....	595
Figure 7.5-1	SEA de fonctionnement très dégradé – Répartition des charges hydrauliques en mètres NGF ⁷¹ dans les ouvrages d'accès du stockage – Fonctionnement très dégradé – exemple des combustibles usés.....	601

Figure 7.5-2	SEA « Fonctionnement très dégradé » - Colis type CU1 – ^{129}I – Valeurs du nombre de Pécelet dans les ouvrages et alvéoles de combustibles usés602
Figure 7.5-3	Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Colis type de déchets B stockés dans alvéoles de type B1x – ^{129}I – Valeurs du nombre de Pécelet dans les alvéoles.....603
Figure 7.5-4	Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CU1 – ^{129}I – Historique de débits molaire604
Figure 7.5-5	Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type B1x – ^{129}I – Historique de débits molaire604
Figure 7.5-6	Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Colis type CU1 – ^{129}I – Répartition des voies de transfert.....605
Figure 7.5-7	Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CU1 – ^{129}I – Historiques des débits molaires – voie de transfert « barrière géologique ».....606
Figure 7.5-8	Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CU1 – ^{79}Se – Historiques des débits molaires – voie de transfert « barrière géologique ».....606
Figure 7.5-9	SEA fonctionnement très dégradé – Comparaison des doses à l'exutoire de référence Saulx du colis type CU1 pour les voies de transfert ouvrages (modèle à l'actuel) et barrière géologique saine (modèle à 1 million d'années).....607
Figure 7.5-10	Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types de combustibles usés CU1608
Figure 7.5-11	Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types de combustibles usés CU2609
Figure 7.5-12	Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types C1/C2609
Figure 7.5-13	Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types C3/C4610
Figure 7.5-14	Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Voie de transfert par les ouvrages - Colis types de déchet B1x610
Figure 7.5-15	Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Voie de transfert par les barrière géologique - Colis types de déchets B1x et B2611
Figure 7.5-16	Scénario « Fonctionnement très dégradé » - sensibilité à la défaillance prématurée des conteneurs de combustibles usés CU1 - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien.....612

Tableaux

Tableau 2.1-1	Récapitulatif des principales caractéristiques des colis types de déchets technologiques cimentés ou compactés	67
Tableau 2.1-2	Récapitulatif des principales caractéristiques des colis types de déchets de structure avec ou sans déchets technologiques compactés.....	69
Tableau 2.1-3	Récapitulatif des caractéristiques des colis types B6 de déchets de structure et technologiques mis en fûts	70
Tableau 2.1-4	Données quantitatives globales, en nombres et volumes de colis, pour les colis types de déchets B	76
Tableau 2.1-5	Détail des nombres et volumes des colis types B2, B3, B5, B6, B7 et B8	77
Tableau 2.1-6	Données quantitatives globales, en nombres et volumes de colis, pour les colis types de déchets C	78
Tableau 2.1-7	Nombre d'assemblages combustibles REP	78
Tableau 3.2-1	Radionucléides de période supérieure à 100 000 ans	104
Tableau 3.2-2	Estimation des temps de resaturation et de retour à l'équilibre en tenant compte de l'influence des gaz.....	109
Tableau 4.1-1	Débit d'équivalent de dose au contact des colis primaires [18].....	158
Tableau 4.1-2	Estimation de la dose annuelle reçue par les opérateurs (mSv/an/personne) affectés aux installations nucléaires du stockage	160
Tableau 4.2-1	Bilan relatif aux principaux risques conventionnels associés au processus de stockage.....	165
Tableau 4.2-2	Bilan relatif aux risques radiologiques liés au stockage	172
Tableau 4.3-1	Taux d'émission de gaz explosifs libérés par certains colis de déchets B.....	175
Tableau 4.4-1	Rayonnement thermique reçu pendant l'évacuation dans le cas d'un incendie (30 MW) avec fumées stratifiées en galerie de liaison.....	185
Tableau 4.5-1	Caractéristiques principales des colis et hottes de transfert	187
Tableau 4.5-2	Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis primaire de boues bitumées (B2) obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie	188
Tableau 4.5-3	Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis primaire C obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie	190
Tableau 4.5-4	Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis de combustibles usés (CU1) obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie.....	191
Tableau 4.6-1	Températures estimées au niveau du colis de stockage et des colis primaires de boues bitumées obtenues par simulation numérique de conditions d'incendie.....	193
Tableau 4.7-1	Données principales relatives aux cas de chute en puits étudiés.....	196
Tableau 4.7-2	Estimations des déformations subies par les colis primaires à l'issue de la chute sur l'amortisseur	198
Tableau 4.8-1	Caractéristiques principales des colis de stockage étudiés.....	201
Tableau 4.8-2	Estimation des déformations des colis primaires à la suite d'une chute du colis de stockage	203

Tableau 5.3-1	Sous-zones de stockage considérées dans les calculs et nombre global de colis considérés par sous-zone	228
Tableau 5.3-2	Modèle de relâchement retenu pour le colis type B1	229
Tableau 5.3-3	Modèle de relâchement retenu pour les colis types B4 et B5	229
Tableau 5.3-4	Modèle de relâchement retenu pour les colis de boues bitumées (B2)	230
Tableau 5.3-5	Valeurs des paramètres de transport et de rétention chimique dans le béton des colis de déchets B – calcul de référence	231
Tableau 5.3-6	Modèle de relâchement des produits d'activation localisés dans les composants métalliques pour les colis types CU1 et CU2.....	234
Tableau 5.3-7	Modèle de relâchement des radionucléides de la matrice de combustibles usés - colis types CU1 (UOx2)	235
Tableau 5.3-8	Modèle de relâchement des radionucléides de la matrice de combustibles usés - colis types CU1 (UOx3 et URE).....	235
Tableau 5.3-9	Modèle de relâchement des radionucléides de la matrice de combustibles usés - colis types CU2.....	235
Tableau 5.3-10	Valeurs des paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique dans les zones fracturées et microfissurées – calcul de référence.....	238
Tableau 5.3-11	Valeurs des paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique dans les ouvrages à base d'argile gonflante [] – calcul de référence	241
Tableau 5.3-12	Valeurs des paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique dans le Callovo-Oxfordien – calcul de référence.....	250
Tableau 5.3-13	Date à laquelle l'élévation de température devient inférieure à 20 °C – alvéole de déchets C, de combustibles usés CU1 et CU2 (modèle thermique conservatif)	252
Tableau 5.3-14	Synthèse des exutoires potentiels retenus pour les modèles hydrauliques à 1 million d'années et à l'actuel	260
Tableau 5.3-15	SEN – Valeurs des facteurs de conversion retenus pour la communauté agricole ou la consommation d'eau de boisson – biosphère tempérée	265
Tableau 5.4-1	Calcul du nombre de Péclet (Pe) dans le Callovo-Oxfordien	271
Tableau 5.4-2	SEN - Principales caractéristiques des radionucléides mobilisées dans le Callovo-Oxfordien	280
Tableau 5.4-3	SEN - Atténuation des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien.....	281
Tableau 5.4-4	SEN – dates d'apparition des maxima de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien pour les trois principaux contributeurs à l'impact	282
Tableau 5.4-5	SEN – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien (cas le plus pénalisant) – modèle à 1 million d'années – tous déchets	290
Tableau 5.4-6	SEN – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs aux autres exutoires – modèle à 1 million d'années – tous déchets.....	291
Tableau 5.4-7	SEN – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien (cas le plus pénalisant) – modèle à l'actuel – tous déchets.....	292
Tableau 5.4-8	SEN – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs aux autres exutoires – modèle à l'actuel – tous déchets.....	293
Tableau 5.4-9	SEN – inventaire en toxiques chimiques considéré pour l'évaluation de l'impact chimique [64].....	297

Tableau 5.4-10	SEN – valeur des paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique pour les toxiques chimiques étudiées [64].298
Tableau 5.4-11	Effets non cancérigènes et cancérigènes des toxiques chimiques étudiés selon la voie d'exposition299
Tableau 5.4-12	SEN – Valeurs des excès de risque individuel et des quotients de danger des toxiques chimiques étudiés300
Tableau 5.4-13	SEN – Quotient de danger et excès de risque individuel à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien calcaire des quatre toxiques chimique étudiés.....300
Tableau 5.4-14	SEN - Thèmes des différentes études de sensibilité.....305
Tableau 5.4-15	SEN - Sensibilité à la perméabilité du Callovo-Oxfordien.....306
Tableau 5.4-16	SEN - Sensibilité : Valeurs des paramètres de transfert dans l'EDZ307
Tableau 5.4-17	SEN - Comparaison des coefficients de diffusion apparente Référence / Sensibilité)312
Tableau 5.4-18	SEN - Sensibilité au coefficient de retard de l'iode dans le Callovo-Oxfordien.....319
Tableau 5.4-19	Evolution de la masse d'iode 129 contenue dans les colis types C2319
Tableau 5.4-20	SEN - Valeurs de référence et de sensibilité des paramètres de transport dans les conteneurs de colis B1x.....323
Tableau 5.4-21	SEN - Atténuation ^{129}I et ^{36}Cl – C1+C2 – comparaison entre les modèles $V_0.S$ (sensibilité) et le modèle $V_0.S \rightarrow V_r$325
Tableau 5.4-22	SEN - Intégrale de débit molaire relâché à 1 million d'années pour l'iode 129 des CU1327
Tableau 5.4-23	SEN – sensibilité à la position du stockage - Impact des combustibles usés CU1 dans le modèle hydrogéologique à 1 million d'années, pour différentes positions du stockage343
Tableau 5.4-24 :	SEN – Dose totale – dates des maxima de dose pour les études de sensibilité à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien calcaire (cas le plus pénalisant) – modèles à 1 million d'années – tous déchets.....346
Tableau 7.2-1	SEA défaut de scellements - Tableau résumant la liste des cas de calcul traités.....470
Tableau 7.2-2	SEA défaut de scellements - Valeur de perméabilités dans la zone fracturée, microfissurée, le noyau de scellement et la barrière géologique saine (rappel).....472
Tableau 7.2-3	SEA défaut de scellemenst – Sensibilité aux valeurs des paramètres hydrauliques de transfert et de rétention chimique de l'EDZ475
Tableau 7.2-4	SEA défaut de scellements - Valeurs de référence et de sensibilité des paramètres de rétention chimique dans la barrière ouvragée argileuse et dans les scellements476
Tableau 7.2-5	SEA défaut de scellements - Liste des études réalisées en sensibilité du scénario « défaut de scellements »477
Tableau 7.2-6	SEA défaut de scellements - Caractéristiques de rétention chimique des radionucléides mobilisées dans le Callovo-Oxfordien et dans les composants en argile go,flante pour les radionucléides contribuant à l'impact en SEA défaut de scellements.....486
Tableau 7.2-7	SEA défaut de scellements - Répartition des voies de transfert en champ proche de l'alvéole intégrées à un million d'années – colis-type CU1486

Tableau 7.2-8	SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – scellements de puits défaillants colis type CU1487
Tableau 7.2-9	SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – scellements de galerie défaillants - colis type CU1488
Tableau 7.2-10	SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – tous scellements défaillants - colis type CU1488
Tableau 7.2-11	SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – abandon du puits - colis type CU1488
Tableau 7.2-12	SEA défaut de scellements - Pour mémoire : répartition et quantification des différentes voies de transfert - tous scellements efficaces (SEN) - colis type CU1489
Tableau 7.2-13	SEA défaut de scellements - Temps d'apparition des maxima de débit molaire en sortie de zone et sortie de puits pour toutes les situations de défaillances et le SEN – combustibles usés CU1492
Tableau 7.2-14	SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – sensibilité : tous scellements défaillants, EDZ dégradée et perméabilité du noyau égale à 10^{-9} m/s - colis type CU1505
Tableau 7.2-15	SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – sensibilité : scellements de puits défaillants, EDZ dégradée et perméabilité du noyau égale à 10^{-9} m/s - colis type CU1508
Tableau 7.2-16	SEA défaut de scellements – comparatif des débits d'eau sortant du puits pour les différentes situations étudiées512
Tableau 7.3-1	Date à laquelle l'élévation de température devient inférieure à 20°C – Alvéole de déchets C, de combustibles usés CU1 et CU2 (dans le modèle thermique conservatif à deux dimensions).....517
Tableau 7.3-2	SEA défaut de colis – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoires Saulx de l'Oxfordien (cas le plus pénalisant) – modèle à 1 million d'années – tous déchets520
Tableau 7.3-3	SEA « défaut de colis » - sensibilité tous colis défaillants - Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoires Saulx de l'Oxfordien (cas le plus pénalisant) – modèle à 1 million d'années – déchets C et combustibles usés522
Tableau 7.3-4	SEA défaut de colis – Etude de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – synthèse des cas traités.....524
Tableau 7.3-5	Coefficient de correction appliqué à la perméabilité pour les galeries de liaison principales et les galeries des zones de stockage de combustibles usés.....527
Tableau 7.4-1	SEA forage dans le stockage avec remontée de carottes de déchets - Configuration de calcul retenue pour les différents colis types traités532
Tableau 7.4-2	SEA forage dans le stockage avec remontée de carottes de déchets - débit de dose délivré au foreur534
Tableau 7.4-3	SEA forage – Sensibilité aux valeurs des paramètres hydrauliques, de transfert et de rétention chimique de l'EDZ – valeurs des paramètres hydrauliques et de transport544
Tableau 7.4-4	SEA forage abandonné dans le stockage - Sensibilité aux valeurs des paramètres hydrauliques, de transfert et de rétention chimique de l'EDZ – valeurs des paramètres de rétention chimiques dans la zone micro-fissurée545

Tableau 7.4-5	SEA forage abandonné dans le stockage - Liste des études réalisées en sensibilité du scénario « forage dans le stockage ».....	546
Tableau 7.4-6	SEA forage abandonné dans le stockage - contributions des composants du modèle au débit d'eau capté par le forage.....	550
Tableau 7.4-7	SEA forage abandonné dans le stockage - répartition des voies de transfert dans le champ proche des alvéoles - masse sortant des différents composants sur 1 million d'années – colis-type CU1 - radionucléides à vie longue solubles et non ou très faiblement sorbés.....	554
Tableau 7.4-8	SEA forage abandonné dans le stockage - voies de transfert depuis les ouvrages de stockage jusqu'au forage – pourcentage de la masse sortant du forage sur 1 million d'années. - radionucléides à vie longue solubles et non ou très faiblement sorbés.....	555
Tableau 7.4-9	SEA forage abandonné dans le stockage - Répartition des voies de transfert dans le champ proche des alvéoles - masse sortant des différents composants pendant 1 million d'années – colis-type CU1 - radionucléides à vie moyenne faiblement sorbés et les radionucléides à vie longue moyennement ou fortement sorbés	557
Tableau 7.4-10	SEA forage abandonné dans le stockage - Voies de transfert depuis les ouvrages de stockage jusqu'au forage – pourcentage de la masse sortant du forage sur 1 million d'années. - radionucléides à vie moyenne faiblement sorbés et les radionucléides à vie longue moyennement ou fortement sorbés	558
Tableau 7.4-11	SEA forage abandonné dans le stockage - Répartition des voies de transfert dans le champ proche des alvéoles - masse sortant des différents composants pendant 1 million d'années – colis-type CU1 - radionucléide non sorbé mais précipitant dans la bentonite ou les argilites	560
Tableau 7.4-12	SEA forage abandonné dans le stockage - Voies de transfert depuis les ouvrages de stockage jusqu'au forage – pourcentage de la masse sortant du forage sur 1 million d'années. - radionucléide non sorbé mais précipitant dans la bentonite ou les argilites.	560
Tableau 7.4-13	SEA forage abandonné dans le stockage - Répartition des voies de transfert dans le champ proche des alvéoles - masse sortant des différents composants pendant 1 million d'années – colis-type CU1 - radionucléides à vie moyenne ou longue très fortement sorbés.....	561
Tableau 7.4-14	SEA forage abandonné dans le stockage - Voies de transfert depuis les ouvrages de stockage jusqu'au forage – pourcentage de la masse sortant du forage sur 1 million d'années. – combustibles usés CU1 - radionucléides à vie moyenne ou longue très fortement sorbés.....	561
Tableau 7.4-15	SEA forage abandonné dans le stockage - Répartition des voies de transfert - masse sortant des différents composants du système de stockage et du forage pendant 1 million d'années – Colis type C2 – calculs de référence.....	562
Tableau 7.4-16	SEA forage abandonné dans le stockage - Principales caractéristiques intervenant dans la rétention des radionucléides.....	565
Tableau 7.4-17	SEA forage abandonné dans le stockage - Fraction d'activité qui atteint le forage par rapport à l'activité totale initiale contenue dans l'alvéole – Colis type B1x.....	566
Tableau 7.4-18	SEA forage abandonné dans le stockage – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoire pompage AEP dans le Barrois (cas le plus pénalisant) – tous déchets.....	569

Tableau 7.4-19	SEA forage abandonné dans le stockage – Contributions des composants du modèle au débit d'eau drainé par le forage dans une sous-zone de stockage de colis CU1.....	582
Tableau 7.4-20	SEA forage abandonné dans le stockage – débits molaires cumulés et instantanés – combustibles usés CU1 – ¹²⁹ I.....	582
Tableau 7.4-21	SEA forage abandonné dans le stockage – Répartition des voies de transfert – masse sortant des différents composants du système de stockage et du forage pendant 1 million d'années – Colis type C2 – calculs de sensibilité à l'EDZ (EDZ dégradée).....	586
Tableau 7.4-22	SEA forage abandonné dans le stockage – Valeurs de référence et de sensibilité des paramètres de rétention chimique dans l'argile gonflante des barrières ouvragées, des bouchons et des scellements – produits de fission et d'activation.....	588
Tableau 7.4-23	SEA forage abandonné dans le stockage – données bentonite considérées dans le calcul – actinides.....	589
Tableau 7.4-24	SEA forage abandonné dans le stockage – Répartition des voies de transfert – masse sortant des différents composants du système de stockage et du forage pendant 1 million d'années – Colis type CU1 – calculs de sensibilité à la géochimie de la bentonite.....	590
Tableau 7.4-25	Taux de fracturation et vitesse de dissolution du verre dans les calculs de référence et de sensibilité.....	593
Tableau 7.4-26	SEA forage abandonné dans le stockage – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoire pompage AEP du Barrois – calculs de référence et sensibilité.....	596
Tableau 7.5-1	SEA de fonctionnement très dégradé – Sensibilité aux valeurs des paramètres hydrauliques de transfert et de rétention chimique de l'EDZ.....	599
Tableau 7.5-2	SEA fonctionnement très dégradé - Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoires Saulx de l'Oxfordien (cas le plus pénalisant) – modèle à 1 million d'années – tous déchets.....	608

1

Approche de sûreté du dossier 2005

1.1	Avant-propos.....	32
1.2	Contexte et objectifs généraux.....	33
1.3	Principes généraux guidant l’approche de sûreté.....	36
1.4	Objectifs vis-à-vis de l’impact du stockage.....	37
1.5	Maîtrise de la production du dossier.....	40
1.6	Spécificité de l’approche de sûreté du dossier 2005 argile.....	50
1.7	Présentation générale de la démarche – introduction aux chapitres suivants	53

1.1 Avant-propos

La loi du 30 décembre 1991 [1] confie à l'Andra la mission d'évaluer la faisabilité d'un stockage de déchets de haute activité et à vie longue (HAVL) en formation géologique profonde.

Le présent tome expose le résultat de l'ensemble des études qui ont été conduites au sein de l'Andra pour évaluer cette faisabilité du point de vue de la sûreté. À ce titre, il est complémentaire des tomes « architecture et gestion du stockage géologique » et « évolution phénoménologique du stockage géologique », dans la mesure où il utilise les résultats d'études présentés dans ces volumes, dans une perspective orientée par la sûreté. Il reprend donc, de manière généralement abrégée par rapport aux développements contenus dans les deux autres tomes, les principaux acquis des études d'ingénierie et des travaux de recherche. Il expose également une part des travaux non abordés dans les autres tomes (notamment les résultats des évaluations de performances).

Dans la mesure où la sûreté n'est pas un sujet autonome, mais est profondément liée aux autres travaux conduits sur le stockage géologique, il est apparu nécessaire de rappeler les résultats déjà exposés dans d'autres documents, en expliquant comment la recherche du meilleur niveau de sûreté pour le stockage a conduit à retenir certaines options, à privilégier certains travaux de recherche sur d'autres. Les deux autres tomes reposent sur une approche plus thématique de leurs domaines respectifs. En ce sens, il n'est pas nécessaire d'avoir lu les deux autres tomes pour aborder celui-ci. Le lecteur qui souhaitera disposer d'une vue plus détaillée du résultat des études, ou des justifications plus complètes de certains points, est cependant invité à se reporter aux autres tomes ou à des documents présentant un plus grand niveau de détail. Il n'a en effet pas été jugé possible, ni souhaitable, de chercher à rendre compte de l'ensemble des travaux dans le présent tome, dans la mesure où cela en compromettrait la lisibilité.

Le premier chapitre du tome est consacré à la présentation de l'approche générale adoptée pour évaluer la faisabilité du point de vue de la sûreté dans le contexte d'un site argileux, en s'appuyant sur les caractéristiques du site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne. Il constitue une introduction au reste de l'analyse, destinée à fixer le cadre global des évaluations de sûreté, à présenter la démarche adoptée et à servir globalement de guide de lecture au reste du présent volume.

1.2 Contexte et objectifs généraux

1.2.1 Les fondements de la démarche de sûreté

L'étude de faisabilité s'attache à évaluer les conditions dans lesquelles un stockage pourrait être construit, exploité, observé, fermé, tout en accueillant l'ensemble de l'inventaire des déchets radioactifs HAVL aujourd'hui existants ou prévus d'être produits dans un avenir à court et moyen terme, et sans qu'à aucun moment la sécurité des travailleurs, du public et la protection de l'environnement ne soient compromises. La Règle Fondamentale de Sûreté III.2.f [2] formule cet objectif de protection de la manière suivante : « *la protection des personnes et de l'environnement à court et long terme constitue l'objectif fondamental assigné à un centre de stockage de déchets en formation géologique profonde* ».

Une autre exigence est exprimée par la RFS III.2.f. en ces termes : la sûreté à long terme du stockage ne doit pas « *dépendre d'un contrôle institutionnel sur lequel on ne peut pas se reposer de façon certaine au-delà d'une période limitée* ». Au-delà d'une phase de surveillance du site, celui-ci doit pouvoir évoluer en restant sûr, sans qu'une intervention humaine soit nécessaire et sans que l'on soit contraint de maintenir la mémoire du stockage et une surveillance. Cela n'interdit à l'évidence pas de maintenir une telle mémoire et une telle surveillance tant que cela apparaît possible.

La notion de faisabilité renvoie donc à l'acquisition d'une conviction étayée, au regard d'un site spécifique que :

- il existe des technologies permettant de mener à bien l'ensemble des phases de vie du stockage ;
- la mise en œuvre de ces technologies reste accessible (et donc en particulier qu'elle n'impose pas un coût ou des besoins de développement rédhibitoires) ;
- ces technologies permettent de réaliser, puis de maintenir ouvert ou de fermer et laisser évoluer le stockage dans des conditions sûres ;
- l'évaluation de la sûreté des concepts de stockage, à court et à long terme, peut être conduite avec une confiance suffisante.

La faisabilité fait donc appel à la notion de confiance dans l'évaluation, sur des échelles de temps longues (jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années). La notion de « confiance » a été particulièrement développée dans le cadre des réflexions conduites par l'Agence pour l'énergie nucléaire [3, 4] de l'Organisation pour la coopération et le développement économique. Le fondement de cette confiance repose sur la qualité de l'argumentation technique, sous tous ces aspects : confiance dans le concept de stockage, dans les données, les modèles, les analyses, mais également dans l'approche elle-même qui organise l'ensemble de ces données techniques en un ensemble cohérent, le « safety case » (traduisible par « dossier de sûreté »).

La confiance ne naît pas uniquement des seules analyses présentées par l'organisme en charge du développement du stockage, indépendamment du contexte dans lequel elles ont été produites. L'appel à des normes prédéfinies, à des objectifs de sûreté clairs et à des méthodologies partagées, et jusqu'à un certain point harmonisées au niveau international, contribue à rendre plus solide le dossier. Au-delà de ce seul point, une grande importance doit également être accordée à la crédibilité des analyses présentées ; cela dépasse le champ du débat technique, et renvoie aux modalités d'établissement du dossier. L'organisation mise en place, les procédures permettant de s'assurer que les données ont été acquises et traitées dans des conditions garantissant un traitement transparent et fiable des données, font partie intégrante du « safety case ». Pour illustrer ces points, les principes généraux qui ont guidé l'approche sont évoqués au paragraphe 1.3 ; les critères d'acceptabilité (objectifs vis-à-vis de l'impact du stockage) que se fixe l'Andra, et les références aux textes internationaux et nationaux qui les fondent, sont évoqués au paragraphe 1.4. L'organisation mise en place pour la structuration et la maîtrise de la production du dossier est évoquée au paragraphe 1.5.

1.2.2 Le processus itératif de développement du stockage et la place des incertitudes

La connaissance des phénomènes qui régissent l'évolution des colis de déchets, des ouvrages de stockage, du milieu géologique et de son environnement, ainsi que la maîtrise¹ de ces évolutions par des dispositions de conception adaptées, et ce, pour toutes les phases de vie du stockage, permettent d'asseoir sur des bases scientifiques fortes un jugement sur la faisabilité, ou non, du stockage, au regard des objectifs, notamment de sûreté, qui lui sont assignés.

L'acquisition des connaissances est un processus progressif qui s'étend au-delà de la phase de faisabilité. Porter un jugement sur la faisabilité du stockage induit d'avoir préalablement acquis un corpus de connaissances scientifiques important et d'avoir développé des architectures jusqu'à un niveau de détail suffisant. Pour autant, ni l'acquisition de connaissances, ni la démarche de conception ne s'arrêtent à la phase de faisabilité. L'intégration progressive du retour d'expérience des études, puis le cas échéant des phases de creusement, d'exploitation et de surveillance permettra, au fur et à mesure de la vie d'un éventuel stockage, d'en connaître de plus en plus finement les caractéristiques physiques et le comportement afin d'optimiser au fil du temps les dispositifs mis en œuvre.

À tous les stades du programme d'acquisition de connaissances, les limites de ce programme induisent des incertitudes tant qualitatives (maîtrise incomplète du déroulement d'un phénomène physique) que quantitatives (évaluation incertaine des caractéristiques quantifiées dudit phénomène). La phase de faisabilité ne fait bien évidemment pas exception. Ces incertitudes pourraient, dans les cas les plus défavorables, conduire à une évolution du stockage différente de celle qui était envisagée par le concepteur (non maîtrise de l'évolution du stockage dans le temps). Il convient de ne statuer sur la faisabilité d'un stockage de déchets radioactifs qu'après avoir acquis la pleine conscience des incertitudes résiduelles, et après s'être donné, le plus en amont possible, les moyens de prévenir une évolution non désirée du stockage ou d'en réduire les conséquences à un niveau acceptable. En ce sens, il n'est pas possible de définir *ex nihilo* un corpus de connaissances qu'il serait nécessaire et suffisant de maîtriser pour statuer sur la faisabilité du stockage. C'est au vu de l'exposé des données acquises et de la maîtrise des incertitudes résiduelles qu'il est possible de formuler une appréciation fondée à ce sujet.

Cette tâche est rendue plus délicate pour la phase de post-surveillance du stockage, de par la longue durée mise en jeu. L'évaluation est conduite sur un million d'années. Toutes les dispositions doivent être prises pour se placer dans les conditions qui permettent une telle évaluation (choix d'un milieu géologique très stable, mise en œuvre de matériaux au comportement prévisible). Cependant, la capacité d'observation sur des périodes longues est limitée à l'utilisation d'analogues naturels ou archéologiques. Les incertitudes liées à la longue durée constituent ainsi une spécificité du dossier. C'est la raison pour laquelle une section particulière est consacrée à leur analyse et leur traitement.

La faisabilité nécessite d'une part la vérification par le concepteur d'une bonne connaissance du comportement de l'ensemble des constituants du stockage (inventaire, milieu géologique, éléments ouvragés...), d'autre part une identification aussi large que possible des incertitudes résiduelles et un bon degré de maîtrise de leurs effets potentiels.

Une des manières d'assurer cette maîtrise des incertitudes est d'intégrer la sûreté dès les phases situées le plus en amont de la conception, de manière à orienter les choix vers les solutions qui offrent le plus de robustesse, c'est-à-dire qui sont les moins sensibles à l'influence de facteurs extérieurs ou aux manques de connaissances. Une intégration amont de la sûreté dans la conception permet également de prendre en compte les autres contraintes d'un projet (coût, constructibilité...) sans que celles-ci entrent en conflit avec la sûreté globale du stockage.

Le travail de recherche et de conception est donc, par nature, un travail interactif entre les ingénieurs en charge de l'ingénierie, des programmes de recherche et ceux en charge des évaluations de sûreté. L'organisation mise en place au sein de l'Andra, et notamment les instances de coordination entre

¹ On entend ici par « maîtrise » le fait de se placer, autant que possible, dans des conditions qui permettent une évolution des composants du stockage qui ne puisse être défavorable à la sûreté. Cela passe à la fois par le dimensionnement adéquat des composants ouvragés, et par la préservation des caractéristiques favorables du milieu naturel (voir chapitre 3).

unités différentes collaborant au projet, est garante de cette interaction constante. Les architectures de stockage proposées dans le cadre du dossier 2005 sont le résultat de ces échanges, et prennent notamment en compte les enseignements des évaluations de sûreté antérieures (dossier 2001 [5] en particulier). Le programme de recherche 2002-2005 s'appuyait également sur ces mêmes résultats. Si le travail de recherche et de conception du stockage profond devait se prolonger au-delà de 2005, les questions techniques mises en évidence dans le présent dossier constitueraient des guides pour le travail à accomplir.

1.2.3 Objectifs du dossier

L'objectif du présent tome est d'exposer le résultat des études sur la faisabilité du stockage en les plaçant dans la perspective de l'évaluation de sûreté. Il aborde la question par trois aspects qui sont traités successivement dans les pages qui suivent :

- mettre en évidence comment la sûreté a été prise en compte le plus en amont dans les choix de conception, afin d'aboutir à des solutions techniques concrètes, et définir des architectures intrinsèquement robustes et adaptées au contexte géologique ;
- évaluer la faisabilité du stockage, du point de vue de la sûreté, en définissant quels sont les critères qui permettent de statuer sur le niveau de sûreté du stockage à toutes les phases de temps, et vérifier que les solutions techniques proposées répondent à ces critères ;
- assurer que les incertitudes dans la connaissance et la conception du stockage sont identifiées et suffisamment maîtrisées pour ne pas remettre en cause l'évaluation.

1.3 Principes généraux guidant l'approche de sûreté

L'évaluation de sûreté s'appuie sur des concepts, qui sont décrits jusqu'au niveau de détail adapté aux besoins de l'évaluation.

Ces concepts doivent permettre des conditions d'exploitation en toute sécurité pour le public et les travailleurs, puis une bonne maîtrise de l'évolution du stockage à long terme. En particulier, leur sûreté en phase de post-fermeture doit être assurée sans besoin d'intervention particulière. Elle est qualifiée de « sûreté passive ». Les concepts sont définis au regard de deux principes.

● **Robustesse**

La notion de robustesse signifie que les caractéristiques des éléments constituant le stockage doivent être telles qu'elles puissent garantir un maintien de leurs fonctionnalités face aux sollicitations raisonnablement envisageables en dépit des incertitudes résiduelles.

De manière générale, les concepts retiennent les solutions les plus robustes possible face aux perturbations externes et aux incertitudes. L'analyse de sûreté permet de porter un regard d'ensemble sur la robustesse des concepts proposés.

Dans ses réflexions, l'OCDE/AEN envisage deux types différents de robustesse [3] :

- La robustesse « de conception » (engineered robustness) renvoie à des dispositions de conception intentionnelles qui permettent de se protéger contre des phénomènes connus, des incertitudes ou de se prémunir contre les conséquences d'événements indéterminés.
- La robustesse « intrinsèque » (intrinsic robustness) renvoie au processus de choix de site ou de conception, et consiste à éviter des phénomènes néfastes et des sources d'incertitudes au moyen de dispositions simples, pour lesquelles on dispose d'un bon retour d'expérience, et dont l'évolution est régie par des processus bien compris. Par exemple, le choix d'un site dont la stabilité peut être attestée en se fondant sur son histoire géologique est un exemple de choix « intrinsèquement robuste ».

La robustesse intrinsèque introduit la notion de démontrabilité, qui est un autre principe présidant à la démarche de sûreté du dossier 2005.

● **Démontrabilité**

Autant en exploitation qu'à long terme, les concepts de stockage sont choisis de manière que la vérification de leur caractère sûr soit la plus aisée possible, et ne fasse pas appel à des démonstrations complexes, sujettes à caution. Il convient de noter que la démontrabilité est une notion relative et que la simplicité d'une vérification n'est pas un but en soi. Le dossier 2005 s'efforce de faire le meilleur usage possible de lignes d'argumentation multiples (évaluation de la sûreté par le calcul, par le biais de raisonnements qualitatifs, par l'appel à des analogues, à des expérimentations scientifiques ou à des démonstrateurs technologiques).

1.4 Objectifs vis-à-vis de l'impact du stockage

1.4.1 Impacts considérés

Les objectifs qui doivent orienter la conception sont fournis par la RFS III.2.f. Il s'agit, au niveau le plus général, des deux principes suivants :

- protection des personnes et de l'environnement contre les atteintes éventuelles liées aux déchets radioactifs,
- limitation à un niveau aussi faible que raisonnablement possible de l'impact radiologique éventuel.

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

D'autres atteintes à l'environnement que le marquage ou la contamination par des substances toxiques, radioactives ou chimiques, sont a priori envisageables. En particulier, la dégradation de ressources naturelles, autrement que par contamination (accès interdit à un gisement de minerai sous-jacent au stockage, échauffement d'une nappe phréatique) pourrait poser un problème ; la demande de la RFS III.2.f. de ne pas retenir de site recelant une telle ressource exceptionnelle permet de se prémunir d'une telle difficulté.

Enfin, la construction et l'exploitation d'un stockage créent un impact sur l'environnement de par les activités industrielles (impact paysager, bruit, etc.). Ces problématiques ne sont en aucune façon spécifiques du stockage. Elles ne constituent pas un sujet d'étude particulier au niveau d'une phase de faisabilité, dans la mesure où les moyens de réduire ce type d'impact sont connus et fréquemment mis en œuvre. Ils seraient pris en compte dans les phases de développement d'une éventuelle installation de stockage si elle devait être décidée.

Le dossier 2005, sans négliger pour autant les autres impacts potentiels d'un stockage de déchets radiologique, se concentre donc en premier lieu sur le risque radiologique.

1.4.2 Indicateurs d'impact

Il importe de fixer, dès le début de l'analyse, les indicateurs, ainsi que les objectifs et critères qui leur sont associés, qui permettent de porter un jugement sur l'impact du stockage. L'existence de tels critères constitue un élément d'appréciation objectif sur le niveau de sûreté atteint. Pour autant, ces critères ne doivent pas masquer la part d'appréciation plus qualitative qu'il convient de porter sur le dossier. Au-delà de la démonstration numérique de la bonne atteinte d'objectifs quantifiés, il est tout aussi important que le rapport s'appuie sur une argumentation claire et systématique, sur des références internationales reconnues et que son contenu ait été soumis à suffisamment de revues indépendantes. Ces aspects sont abordés dans les paragraphes 1.5 et suivants.

1.4.2.1 Indicateurs d'impact en exploitation

La mesure de l'impact radiologique est effectuée de manière classique, en accord avec la publication 81 de la commission internationale de protection radiologique (CIPR) [6] et la RFS III.2.f, par le calcul de la dose individuelle engagée sur le groupe critique. Ce dernier est défini par la CIPR comme un groupe représentatif des individus susceptibles de recevoir la dose la plus élevée issue d'une source ou d'un groupe de sources. La définition d'un tel groupe critique pour étudier l'impact

d'une installation actuellement exploitée ou exploitée dans un avenir proche se fonde sur l'étude des modes de vie des populations environnant le site – on parle alors de groupe « de référence ».

Pour les situations d'exploitation, les contraintes sont celles de l'Andra pour l'ensemble de ses installations :

- la dose maximale admissible pour un groupe critique représentatif du public est de 0,25 mSv/an, par cohérence avec l'objectif imposé par la RFS III.2.f. pour le long terme (voir plus loin). Cette contrainte est plus sévère que la limite réglementaire (1 mSv/an) et s'entend dans le cadre d'une démarche prudente ;
- pour les travailleurs non exposés au rayonnement (travailleurs participant à la construction des galeries du stockage, par exemple), la contrainte est fixée par cohérence avec le public à 0,25 mSv/an. Cette limite peut dans certaines situations s'avérer très contraignante ; on accepte alors, le cas échéant, pour ce type de personnel informé des risques et faisant l'objet d'un suivi médical, de se fixer à la limite réglementaire de 1 mSv/an dans le cadre des études de dimensionnement des installations ;
- pour les travailleurs « exposés », c'est-à-dire travaillant dans les zones nucléaires du stockage, la contrainte est fixée à 5 mSv/an, soit le quart de la valeur réglementaire.

Ces contraintes se comprennent comme des niveaux à ne pas dépasser, l'objectif étant en tout état de cause de réduire les expositions autant que raisonnablement possible. Une démarche d'optimisation complète de la radioprotection n'est cependant pas présentée dans ce dossier, car prématurée à ce stade. Les contraintes s'entendent de plus en situation normale ; pour les études d'accident, tant pour le public que pour les travailleurs, l'impact est jugé acceptable au cas par cas, selon la vraisemblance de la situation considérée. Un impact est généralement jugé acceptable jusqu'à des niveaux de quelques millisieverts. Autant que de besoin, dans les situations accidentelles et à condition que celles-ci paraissent peu probables, il peut être fait référence au seuil de 10 mSv/an, en dessous duquel la CIPR considère qu'une intervention² vis-à-vis des populations n'est pas justifiée. En tout état de cause, l'appréciation de l'acceptabilité des conséquences demeure qualitative, elle est argumentée pour chaque type d'accident.

1.4.2.2 Indicateurs d'impact à long terme

Pour le long terme, le principal indicateur de sûreté demeure la dose engagée, à l'exutoire, dans le cadre d'une biosphère et d'un groupe critique prédéfinis. Le respect d'une dose de 0,25 mSv/an au plus en situation normale, fixée par la R.F.S. III.2.f, est retenu par l'Andra. Le choix d'une même contrainte de 0,25 mSv/an pour les situations d'exploitation et de fermeture du stockage renvoie plus largement à la notion d'équité entre les générations : on n'accepte pas pour les générations futures des détriments qui ne seraient pas acceptés pour les populations actuelles. Pour les situations considérées comme altérées, l'impact calculé s'apprécie en fonction de la vraisemblance de la situation, du caractère chronique ou ponctuel des expositions, du degré de pessimisme des hypothèses de calcul.

Le calcul de cette dose pour les périodes proches de la nôtre est un exercice bien connu dans le domaine des études d'impact. Le fait qu'il soit fréquemment pratiqué ne doit pas masquer les incertitudes qui pèsent tant sur les paramètres du calcul (les facteurs de dose) que sur la relation dose - effet.

Ce type d'évaluation présente des difficultés spécifiques quand elle est pratiquée sur un million d'années. À cette échelle, il est illusoire de prétendre disposer d'une évaluation des modes de vie des êtres qui peupleront le secteur étudié. Les conditions d'environnement, en particulier climatiques, seront, elles aussi, soumises à des variations importantes, qu'il est possible de prédire quant à leurs caractéristiques principales, mais dont il est difficile de rendre compte de manière précise dans un contexte local. La définition du groupe critique est nécessairement en partie conventionnelle, les habitudes de vie des populations étant difficilement prévisibles au-delà de quelques générations. Ce point est développé plus avant au paragraphe 5.3.2.6.

² Terme par lequel la CIPR désigne les activités visant à diminuer l'exposition à la suite d'un accident, en supprimant des sources, en modifiant des voies de transfert ou en réduisant le nombre d'individus exposés.

Plus généralement, les modèles servant au calcul d'impact ne prétendent pas avoir un caractère prédictif vis-à-vis des temps de transfert des radionucléides jusqu'à la biosphère. Ils entendent seulement fournir une vision autant que possible majorante de l'impact.

Pour l'ensemble de ces raisons, la dose calculée à long terme est bien un indicateur de l'impact, et non une prédiction de ce dernier.

D'autres indicateurs peuvent être proposés, qui traduisent mieux les performances intrinsèques du stockage, sans nécessiter d'hypothèses sur l'environnement de surface et la biosphère. En particulier, les flux de concentration de radionucléides, évalués à des emplacements pertinents vis-à-vis de l'analyse de sûreté du stockage (typiquement, à la sortie de la formation hôte), permettent de préciser le jugement porté sur la sûreté et de s'affranchir d'une partie des incertitudes. Ils permettent de comparer des situations différentes ou des dispositions de conception différentes, pour voir laquelle est la plus favorable au regard de la limitation des transferts de radionucléides, mais ils ne peuvent cependant pas être comparés à des seuils.

Enfin, l'incidence du stockage sur l'environnement peut être en première analyse assimilée à l'impact sur l'homme. Il serait possible d'étudier en tant que tel le « marquage » de l'environnement par les radionucléides, en utilisant le modèle de biosphère pour évaluer les concentrations de radionucléides induites par le stockage en phase de post-fermeture dans l'environnement ; mais de tels indicateurs ne pourraient être comparés à des seuils, hormis pour quelques radionucléides existant à l'état naturel pour lesquels les teneurs rencontrées habituellement dans l'environnement peuvent servir de référence. On considère donc, comme c'est habituellement le cas pour ce type d'évaluation, que l'impact sur l'environnement est traité à travers l'impact sur l'homme. On notera que, en tout état de cause, les moyens à mettre en œuvre pour préserver l'homme et pour préserver l'environnement des atteintes liées aux radionucléides sont les mêmes (confinement de la radioactivité, limitation des flux parvenant à la biosphère), et donc le choix d'indicateurs spécifiques à l'une ou l'autre forme d'impact n'induit pas de différence dans la conception du stockage.

Pour ce qui concerne l'impact des toxiques chimiques, la méthodologie retenue consiste à calculer les concentrations de toxiques à l'exutoire et/ou les doses susceptibles d'être reçues par le groupe de référence, et de les comparer selon ce qui paraît le plus pertinent :

- en priorité aux valeurs toxicologiques de référence, selon la méthodologie recommandée pour les études d'impact des installations classées [7, 8], quand ces valeurs sont disponibles. Elles permettent, à partir de la dose ingérée ou inhalée, de caractériser l'impact de l'exposition chronique – sur une durée de 70 ans – à un toxique chimique. Elles permettent de calculer l'excès de risque individuel (E.R.I.) pour les toxiques à effet cancérigène, et le coefficient de danger (QD) pour les toxiques à effet de seuil. Une valeur jugée acceptable en situation normale est de 10^{-5} pour un ERI et 1 pour le QD ;
- sinon, quand le cas se présente, aux concentrations maximales dans l'environnement fixées par la réglementation sur la qualité des eaux, ou à des valeurs de référence reconnues à l'international, par exemple celles définies par l'Organisation mondiale de la Santé. Cette approche n'a pas été mise en œuvre pour le dossier 2005.

1.5 Maîtrise de la production du dossier

On a souligné que la confiance en les analyses de sûreté ne reposait pas que sur la qualité intrinsèque des données fournies. La bonne maîtrise de l'utilisation de ces données, des méthodes employées, l'existence de revues indépendantes des résultats, constituent des garanties importantes pour toute personne ayant à analyser ou utiliser les données du dossier.

L'Andra s'est dotée d'une organisation et de procédures propres à s'assurer de la qualité du dossier 2005, celle-ci étant définie au sens de la norme ISO 9001 [9] comme « *l'aptitude à satisfaire les exigences* ». Ces exigences peuvent être celles des demandeurs du dossier (les pouvoirs publics), celles imposées par la réglementation ou l'état de l'art, ou celles que l'Andra choisit de s'appliquer à elle-même (par exemple, les exigences de la norme ISO 9001 elles-mêmes). Par extension, ces exigences incluent également les demandes d'un certain nombre d'autres parties prenantes : évaluateurs de l'Agence, relecteurs externes.

Ces dispositions sont un élément à part entière de la maîtrise de la sûreté du stockage, dans la mesure où elles renvoient aux choix propres d'une part à assurer que les analyses de sûreté ont bien pris en compte toutes les données d'entrée pertinentes, mais également que ces données et les résultats des analyses sont gérés au sein d'un système qui assure la traçabilité des choix et des résultats. L'organisation est également le gage de la bonne intégration des différentes activités qui contribuent au dossier d'évaluation de la faisabilité (ingénierie, recherche, évaluation de sûreté).

1.5.1 Organisation de l'Andra

1.5.1.1 Organisation hiérarchique

L'organisation de l'Agence est formalisée dans un manuel. Elle a évolué progressivement entre 1991 et 2005, afin de tirer parti du retour d'expérience du déroulement des études. La structure même de l'Agence s'est ainsi adaptée sur un mode itératif à la production des dossiers.

Un des axes essentiels de ces évolutions a été le renforcement de l'intégration des équipes : rapprochement au fur et à mesure des équipes d'ingénierie et de sûreté, création d'un service « d'intégration scientifique » chargé d'assurer la synthèse des connaissances en vue de leur exploitation pour les analyses de sûreté. Parallèlement, la structuration des équipes a évolué d'une organisation initialement fondée sur les différentes disciplines académiques nécessaires à l'étude du stockage (géologie, géomécanique, géochimie, etc.) vers une approche plus transverse axée sur les grands phénomènes régissant l'évolution de celui-ci (comportement des matériaux, transferts, etc.).

Un soin particulier a été porté à la qualité des interfaces entre unités. Outre la coordination au niveau du comité de direction de l'Agence, le dialogue a été encouragé à tous les niveaux de l'organisation, et particulièrement aux interfaces les plus critiques vis-à-vis du projet : entre la direction scientifique et les équipes du laboratoire de Meuse / Haute-Marne, entre les ingénieurs de sûreté et les ingénieurs de calculs, entre les études de sûreté et l'intégration scientifique.

1.5.1.2 Organisation en qualité

L'Andra est certifiée par Bureau Veritas Qualité International (BVQI) pour les normes ISO 9001 et ISO 14001 [10], depuis 2001. Le système de management qualité – environnement est structurant pour toutes les activités de l'Agence, donc en particulier pour les activités liées au stockage en formation géologique.

1.5.1.3 Organisation par processus

La structure hiérarchique est croisée avec une organisation par processus, selon les principes définis dans la norme ISO 9001. Les processus sont un regroupement d'activités au sein de l'Agence contribuant à une même finalité, orientée vers la satisfaction d'un client. La définition de processus permet de porter un regard transverse sur les activités des unités, et de définir des actions

d'amélioration relatives à la pertinence, l'efficacité et l'efficience du processus au regard de ses objectifs. Le fonctionnement des processus est appréhendé par des indicateurs de performances.

Les processus font l'objet d'une ou deux revues annuelles, au cours desquelles sont examinés les résultats obtenus. Celles-ci se rattachent à la notion, essentielle dans le domaine de la qualité, du « progrès continu ». Une action de progrès ne signale pas nécessairement une insuffisance du processus, mais plus généralement une opportunité d'améliorer son fonctionnement.

Cette organisation a permis de solliciter largement les ingénieurs en charge des études pour identifier les pistes d'amélioration possibles. Celles-ci ont porté notamment sur la gestion de la configuration du projet, ainsi que sur la maîtrise des données scientifiques (voir paragraphe 1.5.3, maîtrise des données).

1.5.1.4 Système procédural de l'Andra

Un autre aspect du système qualité de l'Andra est le système procédural. Bien que la nouvelle version de la norme ISO 9001 soit moins centrée sur les exigences en termes de procédures écrites que les précédentes, l'Andra a conservé un système structuré de procédures, modes opératoires et guides, permettant d'harmoniser les modes de travail et de gérer les risques de non qualité dans les documents produits.

Certaines procédures sont générales au sein de l'Andra, appliquées par tous : procédure générale de gestion des documents, procédures liées à la gestion de projet (sur l'établissement de plans de management, la conduite de revues, etc.). D'autres ont pu être établies spécifiquement pour le projet « HAVL argile », et visent soit la maîtrise des interfaces entre unités, soit la maîtrise de la production des données, soit les formats de documents.

1.5.2 Gestion de projet

La conduite du projet « HAVL argile », en charge de l'étude de faisabilité du stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien, s'est inspirée des principes de gestion les plus couramment recommandés dans ce domaine.

Sur le plan de l'organisation, le projet a été globalement structuré par un plan de développement (PDD), respectivement de niveau 1 pour le projet en général et de niveau 2 pour des thèmes plus détaillés : conception et sûreté en exploitation, géologie, comportement des matériaux, sûreté à long terme, etc., et un plan de management (PM) exposant les objectifs, le découpage du projet par grands thèmes et l'organisation mise en place au sein des équipes pour répondre à ces objectifs. Le déroulement du projet est ensuite rythmé par la production de fiches d'objectifs (FO), émises par l'équipe des ingénieurs projets sur la base des PDD, à destination des ingénieurs scientifiques, de sûreté ou d'ingénierie en charge des études. Ceux-ci répondent par une fiche de proposition technique (FPT) qui décrit les tâches à accomplir, les échéances, le budget dédié. Ce système de FO/FPT a renforcé la rigueur nécessaire au déroulement du projet.

Une réunion de pilotage du projet HAVL, à fréquence généralement mensuelle, réunit l'ensemble des responsables (directions des unités, chef de projet, ingénieurs en charge des études, contrôleurs de gestion, ingénieur qualité...) afin de vérifier le bon avancement des actions, identifier les difficultés et proposer des actions correctives.

Pour l'acquisition de données, l'Agence a souhaité en complément formaliser un programme scientifique pour la période 2002-2005, identifiant sur la base des acquis du précédent dossier (dossier 2001) les priorités de recherche. Ce programme a permis d'améliorer le dialogue tant en interne qu'avec les évaluateurs, en clarifiant les priorités de recherche de l'Agence.

Les grands jalons décisionnels du projet ont par ailleurs fait l'objet d'une revue formelle, organisée selon les principes de la gestion de projet : organisation d'un groupe de revue en charge d'examiner un ensemble de documents et de poser des questions en préalable à la réunion, instruction des questions par un groupe de présentation en revue, composé d'ingénieurs ayant contribué à l'élaboration des documents, discussion en séance et élaboration d'une proposition de décision, soumise aux

responsables. De telles revues ont ainsi été organisées pour le choix d'architecture en vue du dossier 2005, pour les options liées à l'observation et la surveillance du stockage, pour le choix des scénarios à traiter, pour les choix de modèles et paramètres du calcul de sûreté.

La construction du laboratoire souterrain, les investigations de surface, le suivi du creusement des ouvrages et les expérimentations se sont également organisés en projet. L'Andra a la responsabilité de maître d'ouvrage pour la construction et le suivi scientifique du creusement des puits, et de maître d'œuvre scientifique pour les activités expérimentales en galeries et en forages. Un plan de management expose les principes d'organisation. Les différents travaux sont gérés par une structure documentaire spécifique, permettant notamment le dialogue avec la direction scientifique sur les expérimentations, depuis la spécification la plus générale des objectifs jusqu'à la définition détaillée de leur réalisation.

1.5.3 Maîtrise des données

1.5.3.1 Éléments génériques

De manière générale, les études du projet HAVL se fondent sur des données scientifiques, techniques acquises en propre par l'Andra ou par le biais de partenariats scientifiques ou de contrats de sous-traitance. Dans le cadre d'une démarche de conception itérative, les études peuvent également se fonder sur les résultats d'études antérieures. D'autres données, à caractère non technique (par exemple l'analyse de la réglementation applicable en milieu souterrain ou dans une installation nucléaire de base) peuvent également être utilisées.

Ce vaste ensemble de données requiert des modes de gestion rigoureux. Les documents, qu'ils soient produits par l'Agence ou commandités par elle, sont soumis à une approbation formelle par un responsable avant de pouvoir être utilisés dans le cadre du projet. Pour la rédaction des documents eux-mêmes, le principe d'un binôme rédacteur – vérificateur est mis en œuvre.

Ces principes, appliqués de manière générique dans le cadre du système qualité, assurent une bonne traçabilité des données et apportent la garantie que celles-ci ont systématiquement été vérifiées. Des dispositifs complémentaires ont été mis en place pour conforter la qualité des données employées et s'assurer qu'elles ne sont pas utilisées dans des contextes pour lesquelles elles ne sont pas valides.

Pour ce qui relève des architectures de stockage, la gestion des données valides repose sur la notion de *gestion de configuration*, c'est-à-dire le suivi dans le temps d'un état à jour de l'ensemble des caractéristiques du système de stockage et la maîtrise des évolutions. Une attention particulière est portée à la traçabilité et à la cohérence des évolutions de configuration.

La maîtrise des données scientifiques utilisées pour les modèles et les calculs repose quant à elle sur un processus formalisé mis en place dans le cadre de l'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), 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 connaissance sur des sujets précis (les matériaux, les modèles de relâchement, la géologie du site, le modèle d'inventaire) permet une consolidation d'ensemble.

La typologie des modèles et paramètres proposés par les ingénieurs scientifiques a été fixée tôt dans le développement du dossier 2005, en imposant une classification de leur positionnement par rapport aux incertitudes (selon qu'il s'agisse de données « phénoménologiques », « conservatives », « pénalisantes » ou autres, voir définitions au paragraphe 5.2.2). Cette typologie permet aux ingénieurs de sûreté d'employer les données en étant conscients de leur degré de pessimisme vis-à-vis de l'évaluation de l'impact.

1.5.3.2 Maîtrise des prestataires et interactions avec les partenaires scientifiques

Les travaux contribuant à la production du dossier 2005 ne sont pas uniquement issus du travail propre des ingénieurs de l'Andra. Dans son rôle d'agence de programme, celle-ci assure la coordination de nombreux partenariats sur des thématiques de recherche variées. Par ailleurs, elle fait appel à des contrats de sous-traitance pour des prestations dédiées (en ingénierie, notamment).

Les partenariats sont définis, en accord avec la politique scientifique de l'Agence, selon trois principes : la pertinence scientifique dans le domaine considéré, le partage de thèmes d'intérêt commun et l'établissement d'une programmation pluriannuelle. L'organisation s'adapte aux entités concernées : avec le CNRS, elle prend la forme de groupements de recherche (FORPRO, PRACTIS, MOMAS). Concernant le CEA, elle s'inscrit dans le cadre de comités techniques thématiques.

Pour ce qui est de la sous-traitance à proprement parler, elle est encadrée par les procédures de l'Agence pour ce qui relève tant du coût que de la qualité des prestations fournies. Le suivi des prestations répond aux exigences de la norme ISO 9001 en termes de suivi des contrats (réunion d'enclenchement, définition de points de validation avec les prestataires, formalisation de l'acceptation finale des prestations). Les exigences, notamment en termes de qualité, applicables aux sous-traitants sont spécifiées dans un cahier des charges. Un programme annuel d'audit des fournisseurs est défini et mis en œuvre.

1.5.3.3 Maîtrise des données sur les colis de déchets

L'Andra a établi en amont du projet une spécification à l'adresse des producteurs de déchets, décrivant les informations qui lui seraient nécessaires pour la conduite des études, et le cadre formalisé dans lequel elle souhaitait les recevoir. Les producteurs de déchets ont ainsi communiqué des « dossiers de connaissances », vérifiés par l'Agence. Compte tenu de la variété des déchets et colis inventoriés, des regroupements ont été opérés par « familles » de façon à obtenir des ensembles homogènes.

Les premières versions des dossiers de connaissances ont été établies par les producteurs en 1998-1999, couvrant la quasi-totalité des familles de colis déjà produites ou en cours de production. À partir de 1999, des précisions et compléments ont été apportés pour ce qui concerne la description du contenu chimique et radiologique des colis de déchets.

Pour les familles de colis déjà produites ou en cours de production, des demandes spécifiques ont été formulées par l'Andra aux producteurs sur la qualification des procédés de conditionnement et la maîtrise de la qualité de la production. L'ensemble des documents techniques établis par les producteurs pour répondre à ces demandes constitue le référentiel de conformité de la famille de colis ; cela comprend en particulier un « Descriptif de Procédé (DP) » et un « Descriptif d'Évaluation de l'Activité (DEA) ».

Après l'établissement par les producteurs des dossiers de connaissances, l'Andra en a effectué une instruction technique. Au-delà d'une appréciation de la conformité à la spécification relative à la connaissance des colis, il s'est agi de vérifier la cohérence des données techniques : comparaison avec les données des documents du référentiel de conformité, cohérence entre l'inventaire chimique et l'inventaire radiologique, recoupement avec des constats effectués lors d'actions de surveillance sur les sites de production. Après échanges avec les producteurs, et si nécessaire révision de dossier, la finalisation du processus pour chaque famille de colis a été formalisée par une « acceptation » du dossier par l'Andra.

Pour les familles de déchets déjà produites ou en cours de production, l'acceptation peut s'accompagner d'un « agrément de niveau 1 ». Celui-ci marque que les dispositions d'assurance qualité qui régissent la production des déchets (pour les colis actuels) et/ou les données descriptives disponibles sur les colis déjà produits (pour les colis anciens) permettent d'avoir suffisamment confiance dans la représentativité du contenu des dossiers de connaissances. Il ne préjuge pas de l'acceptation des colis dans un éventuel futur stockage.

Le processus d'acceptation et d'agrément de niveau 1 s'est clôturé fin décembre 2004. À cette date, 55 des 62 dossiers de connaissances avaient été acceptés, et 27 des 31 familles soumises à agrément avaient effectivement été agréées.

Les dossiers non acceptés correspondent à des familles de déchets anciens (verres PIVER et SICRAL de Marcoule, anciens colis de sources, déchets radifères divers, combustibles usés de recherche) pour lesquels il apparaît globalement que la spécification des dossiers de connaissances était trop exigeante au regard de la connaissance que les producteurs ont de ce type de déchets. Cette non-acceptation des dossiers n'a cependant pas eu de conséquence sur la qualité des études (voir à ce propos le chapitre 6, paragraphe 6.2.4).

En parallèle à la maîtrise des données sur les colis, l'Andra mène des actions de surveillance de la production de déchets conditionnés. À l'origine, celles-ci visaient la conformité des colis produits aux spécifications de fabrication. Depuis la constitution des dossiers de connaissances, s'est ajouté un objectif complémentaire, consistant à s'assurer de la pérennité de la description fournie dans ces dossiers, compte tenu des évolutions de la production. Ces actions permettent ainsi de suivre les évolutions éventuelles des caractéristiques des colis. La surveillance s'étend aussi aux conditions d'entreposage, l'Andra s'assurant que les informations susceptibles d'être importantes à terme (agencement des colis, ventilation...) sont disponibles. La traçabilité des informations sur les colis, les contrôles pratiqués et les conditions d'archivage des données font également partie du domaine de la surveillance.

La surveillance comprend des analyses de documents ainsi que des audits et inspections menés sur les sites de production ; elle consiste à évaluer les processus de fabrication et de contrôle ainsi que les dispositions qualité correspondantes, à en suivre régulièrement l'évolution. L'Andra suit également la production de colis non conformes au référentiel, qualifiés d'« écarts », pour compléter la connaissance sur les colis. Ces écarts sont très peu nombreux.

L'ensemble de ce dispositif de surveillance est géré par des procédures dans le cadre du système de management qualité de l'Andra. Il a été régulièrement inspecté (une fois par an) par l'Autorité de sûreté nucléaire.

On notera que la maîtrise de la connaissance des colis s'appuie sur les systèmes qualité des producteurs appliqués aux processus de conditionnement des déchets. Ces systèmes ont été, selon les cas, mis en place ou renforcés à la suite de l'arrêté du 10 août 1984 sur la sûreté des installations nucléaires de base, qui a formalisé les exigences en matière de qualité.

1.5.3.4 Maîtrise des données acquises sur le site de Meuse / Haute-Marne

L'acquisition des données sur le site de Meuse / Haute-Marne (données acquises en forage, lors du suivi du creusement, lors des expérimentations) entre dans le cadre général de la maîtrise des données scientifiques exposée aux paragraphes précédents. En particulier, un contrôle scientifique par un ingénieur qualifié, en règle générale un ingénieur de l'Andra, est réalisé systématiquement pour s'assurer que les données sont acquises conformément aux modes opératoires de l'Agence, et qu'elles répondent aux standards de qualité attendus (fréquence des échantillonnages, caractère exploitable des données acquises, etc.).

Sur le plan de l'organisation, des bases de données ont été définies (pour les données géoscientifiques du laboratoire, pour la collecte et l'exploitation des données issues des expérimentations et pour les données hydrogéologiques). Elles permettent la centralisation et le partage des informations entre ingénieurs de la direction scientifique et ingénieurs sur le site du laboratoire.

1.5.3.5 Maîtrise des codes de calculs

Les codes de calcul employés dans le cadre de l'établissement du dossier 2005 ont fait l'objet d'exercices d'inter-comparaison et de procédures de test et de validation rigoureux, organisés dans le cadre de la plateforme Alliances, commune au CEA et à l'Andra, qui a été développée pour les accueillir dans un cadre unifié.

Une attention toute particulière a été portée à la phase de qualification de la plate forme Alliances. Elle comprend trois niveaux de tests :

- les tests unitaires afin de valider le développement des fonctions ;
- les tests physico-numériques afin d'explorer les différents aspects du domaine de validité des modules Alliances qui simulent les phénomènes physiques à représenter. Les résultats obtenus ont été comparés à des solutions de référence analytiques, numériques ou expérimentales ;
- les tests d'application, représentatifs de problèmes à résoudre. En particulier, ils peuvent nécessiter la mise en œuvre d'un enchaînement de plusieurs modules. Les résultats obtenus sont confrontés à des exercices de comparaison entre codes ou d'avis d'expert.

Il a été conduit ainsi plus de six cents tests unitaires.

Le plan de qualification de la version 1, utilisée pour les calculs du présent dossier, a comporté vingt-deux tests physico-numériques et six tests d'application. Pour chacun de ces tests, une étude de sensibilité a été conduite incluant :

- la sensibilité au composant (code de calcul) ;
- la sensibilité à des tailles de maillages différentes ;
- la sensibilité aux différentes méthodes de discrétisation ;
- la sensibilité aux algorithmes de résolution.

La phase de qualification 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 permettant de valider les choix de modélisation et les choix numériques de mise en œuvre des cas tests.

1.5.4 Prise en compte des références pertinentes

1.5.4.1 La Règle fondamentale de sûreté III.2.f

L'Andra s'est attachée à prendre en compte les recommandations de la Règle fondamentale de sûreté (RFS III.2.f) qui définit un certain nombre d'orientations en termes de conception. La RFS n'est pas un texte réglementaire, mais elle constitue une base de discussion et de compréhension commune entre l'autorité de sûreté et le concepteur du stockage. Elle définit un certain nombre de principes relatifs à la sûreté en phase de post-fermeture, indique le rôle générique des principaux composants et pose des objectifs en termes de radioprotection.

Une analyse détaillée comparant la démarche du dossier 2005 avec les recommandations de la RFS III.2.f. est effectuée par ailleurs [11] ; on se borne simplement ici à rappeler quelques éléments fondamentaux. Il convient de noter que la RFS ne s'applique stricto sensu qu'à la phase de post-fermeture.

Les objectifs de la RFS sont pris en compte dès l'étape de conception la plus amont, qui est celle de l'analyse des fonctions que le stockage doit remplir. Parmi celles-ci, on identifie en effet la fonction dite « *fonction de protection* » (protéger les personnes et l'environnement de la dissémination d'éléments radioactifs). Cette fonction n'est pas exclusive d'autres fonctions, identifiées dans l'analyse fonctionnelle du stockage ; on pense par exemple à la fonction d'accueil des colis de stockage, qui est la raison d'être de l'installation.

Cette fonction fondamentale de protection se décline ensuite en fonctions de sûreté qui, elles-mêmes, peuvent être déclinées en sous-fonctions (voir chapitre 3), jusqu'à aboutir à des fonctions de niveau plus élémentaires, qui peuvent être remplies par un ou plusieurs composants du stockage.

La déclinaison de la fonction principale en fonctions particulières nettement distinctes fonde une approche multifonctions de la sûreté. Plusieurs composants du stockage peuvent ainsi contribuer à remplir une même fonction (notion de complémentarité) ou permettre de maintenir la fonction en cas de défaillance de l'un d'entre eux (notion de redondance).

La RFS définit des bases de conception liées à la sûreté, qui sont prises en compte dans l'attribution de fonctions de sûreté aux différents composants du stockage. En particulier, elle identifie des composants particuliers, dénommés « barrières », qui ont pour rôle à la fois de protéger les déchets en s'opposant aux circulations d'eau et aux actions humaines intrusives, et de limiter et retarder les transferts de radionucléides. Elle identifie comme « barrières » les colis de déchets, les barrières ouvragées et le milieu géologique. On évoquera au chapitre 3 la façon dont l'Andra a repris cette notion de « barrière » pour l'étendre à celle de « fonction de sûreté ».

La RFS définit par ailleurs trois « aspects » que l'évaluation de sûreté doit aborder :

- la justification du caractère favorable des performances de chacune des barrières de confinement, et du concept de stockage vis-à-vis de la sûreté globale du stockage ;
- l'évaluation des perturbations apportées par la création du stockage et la vérification que ces perturbations restent acceptables vis-à-vis du niveau de qualité choisi pour chacune des barrières, en particulier de la barrière géologique ;
- l'évaluation du comportement futur du stockage et la vérification que les expositions individuelles sont acceptables.

Cela correspond à la vérification des performances du stockage vis-à-vis des objectifs de sûreté, identifiée comme un des buts du dossier 2005. Cette vérification s'effectue non seulement de manière globale, mais également sur les principaux composants qui jouent un rôle de « barrières ». La justification des performances se fonde quant à elle sur le niveau de compréhension des phénomènes physico-chimiques qui sous-tendent ces performances, et donc sur le programme de recherche et la manière dont il se traduit dans l'analyse de sûreté. Sur la notion de « performances » des fonctions et la manière dont on doit la prendre en compte, le lecteur se reportera au chapitre 3 qui aborde plus complètement ce sujet.

L'approche par fonctions de sûreté, associée à la vérification du bon niveau de performances de ces fonctions, est commune à la sûreté d'exploitation.

1.5.4.2 Références internationales

Les textes relatifs à la sûreté, émis par les organismes internationaux (« requirements » de l'AIEA, brochures de l'OCDE, recommandations de la CIPR) ont constitué une référence pour l'établissement du dossier. Ces textes fixent des principes qui permettent le dialogue avec la communauté internationale, en établissant des références communes à tous.

En particulier, et sans préjudice de l'application d'autres textes, l'Andra s'est référée à la CIPR 81 [6] pour les questions relatives à la protection radiologique du public dans le cadre de la gestion des déchets à vie longue. La principale question qui se pose est celle des expositions réelles ou potentielles à long terme.

En s'exprimant sur un plan purement technique, la CIPR estime que l'acceptabilité du stockage repose essentiellement sur le principe d'optimisation sous contrainte, en tenant compte des facteurs économiques et sociaux, et selon une démarche principalement qualitative. Cette optimisation est progressive et se comprend dans le cadre d'une démarche itérative de développement du stockage. Elle doit faire appel aux meilleures technologies disponibles, aux « good practices³ » de l'ingénierie, et au management de la qualité.

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

Les deux catégories de situations à considérer pour l'application des critères de protection radiologique sont les phénomènes naturels et les intrusions humaines non volontaires. La commission

³ « bonnes pratiques », ou « état de l'art ».

estime la protection radiologique satisfaisante dans la mesure où les contraintes liées aux phénomènes naturels sont respectées, où des mesures sont prises afin de diminuer la probabilité des intrusions humaines.

Au-delà des seules questions liées à l'impact, les développements récents de la réflexion internationale (projet de « safety requirement » de l'AIEA n° DS 154 [12], document « Post-closure safety case for geological repositories » de l'OCDE/AEN [13]) insistent sur la notion de « safety case » (dossier de sûreté) en complément du seul « safety assessment » (évaluation de sûreté). Prolongeant les analyses de risques et évaluations d'impact, conduites dans le but de vérifier une conformité réglementaire, le « safety case » se présente comme une synthèse d'arguments de nature multiple contribuant à asseoir la confiance dans la sûreté du stockage.

Sans chercher à être exhaustif, on peut citer quelques-unes des principales recommandations de l'AEN pour l'établissement d'un « safety case ».

Il convient en premier lieu de définir une stratégie de sûreté (« safety strategy »), incluant la gestion du projet de conception du stockage, le choix du site et le processus de conception. La stratégie retenue par l'Andra est nécessairement adaptée à un stade d'étude de faisabilité. La manière dont les processus d'acquisition de données et de modélisation d'une part, de définition des architectures de stockage d'autre part, et enfin d'évaluation de sûreté s'organisent dans un processus itératif, tel que décrite dans ce dossier, constitue le fil directeur de la stratégie retenue.

L'AEN recommande de définir avec soin « the assessment basis », c'est-à-dire à la fois les connaissances scientifiques et techniques qui soutiennent l'évaluation de sûreté, les outils de modélisation, les bases de données, et d'en discuter la qualité, la crédibilité et de cerner les incertitudes. Au sens qui lui est donné ici, l'« assessment basis » est constitué au premier chef, et sans préjudice du reste de l'arborescence documentaire, par les trois tomes de synthèse du dossier 2005 (« architecture et gestion du stockage géologique », « évolution phénoménologique du stockage géologique » et « évaluation de sûreté du stockage géologique ») qui exposent respectivement :

- les concepts retenus et la motivation des choix,
- la base des connaissances acquises et les questions encore ouvertes,
- la mise en perspective de ces éléments et leur discussion en vue d'assurer l'évaluation de sûreté.

L'AEN recommande l'emploi de « multiple lines of evidence », c'est-à-dire de ne pas appuyer l'analyse sur les seuls calculs de performance, mais de mettre en relief également les arguments qualitatifs, l'utilisation d'indicateurs variés, pour accroître la crédibilité et la solidité des analyses. Le poids de plus en plus important porté sur les analyses qualitatives et la crédibilité des raisonnements, par rapport à une vision fondée exclusivement sur les calculs d'impact et la comparaison à des seuils réglementaires, est un souci fort tant chez les concepteurs que chez les régulateurs au niveau international. Le dossier 2005 s'inscrit dans cette réflexion. Bien qu'une part importante du dossier soit consacrée aux évaluations d'impact (chapitres 5 et 7), on cherche à tirer le maximum d'informations possibles de ces évaluations, au-delà du seul calcul de dose. Les chapitres qui abordent la conception du stockage (chapitre 3), la maîtrise des incertitudes (chapitre 6) ou les enseignements de l'analyse de sûreté (chapitre 8) n'ont pas une importance moindre.

Enfin, les qualités suivantes sont attendues de la part d'un « safety case » :

- la « transparency », c'est-à-dire la clarté et l'intelligibilité, avec un souci d'adaptation aux différents lecteurs visés ;
- la « traceability », permettant de remonter à l'origine de toute affirmation, donnée, hypothèse, par une présentation claire et par l'utilisation de références ;
- l'« openness », c'est-à-dire l'exposé et la discussion des incertitudes, questions ouvertes, ou de tout élément qui puisse mettre en question la sûreté du stockage ;
- l'organisation de revues des pairs, à la fois internes et externes.

Le dossier 2005, dont la structure et la rédaction sont partiellement antérieures aux documents les plus récents formalisant ces réflexions de l'AEN, s'est néanmoins fortement inspiré du schéma du « safety

case » tel qu'il a été défini. Réaliser un « safety case » complet et en parfaite cohérence avec les recommandations de l'AEN demeure un effort de longue haleine, envers lequel le dossier 2005 n'est qu'une étape.

1.5.4.3 Autres textes

La réglementation courante sur les installations nucléaires et la réglementation plus générale du travail ou des installations souterraines ont également été prises en compte, dans la mesure où elles avaient une influence potentielle sur les choix de solutions techniques. La conformité réglementaire n'est pas visée à ce stade du dossier, et aucune démonstration formelle n'en est apportée. Les concepts sont cependant développés de manière à être compatibles avec la réglementation.

En particulier, l'arrêté du 10 août 1984 [14] est pris en référence dans son principe, c'est-à-dire que les études contribuant au dossier 2005 ont été conduites avec des règles d'assurance de la qualité strictes. En revanche, il n'est pas défini d'« éléments importants pour la sûreté », ni d'« activités concernées par la qualité » dans le dossier, celui-ci ne constituant pas un rapport de sûreté. La définition de telles notions ne pourrait intervenir qu'à un stade ultérieur du dossier, quand les études de sûreté en exploitation auront été conduites jusqu'à un stade plus avancé.

1.5.5 Évaluation des travaux

La qualité des résultats produits dans le cadre du dossier 2005 repose également sur un dispositif d'évaluation, prévu par la loi, commandité par les tutelles de l'Andra, ou mis en œuvre à l'initiative de l'Agence elle-même. Les remarques et recommandations issues de ces diverses instances, couvrant le spectre des activités du projet HAVL (ingénierie, données scientifiques, sûreté) sont prises en compte pour contribuer à l'amélioration permanente du projet.

1.5.5.1 La commission nationale d'évaluation

Instaurée par la loi du 30 décembre 1991, la commission nationale d'évaluation évalue la qualité des travaux scientifiques de l'Andra. Depuis sa création jusqu'à la production du dossier 2005, elle a régulièrement auditionné les scientifiques de l'Agence sur l'ensemble des thématiques liées à l'acquisition de connaissances, à la modélisation et à l'ingénierie. La commission produit un rapport annuel dans lequel elle émet un avis sur les travaux conduits par l'Andra.

Cet avis et les recommandations afférentes sont des données d'entrée pour affiner les priorités du programme de recherche. En plus des auditions consacrées à des thématiques particulières, le bilan des études et travaux publié annuellement par l'Agence est présenté à la CNE.

1.5.5.2 L'autorité de sûreté nucléaire

L'autorité de sûreté nucléaire examine l'avancement du programme de l'Andra. Elle peut pour cela saisir le groupe permanent constitué d'experts sur la question des déchets, pour émettre un avis sur les documents produits. Celui-ci statue sur la base d'une analyse technique conduite par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. De manière générale, les avis portent sur la sûreté des concepts proposés par l'Andra pour le stockage des déchets HA et MA-VL, et la qualité de l'ensemble des données qui sous-tendent les évaluations de sûreté.

Ces évaluations ont été conduites au travers d'une analyse des dossiers intermédiaires remis par l'Agence, notamment le dossier 2001 qui a fait l'objet de cinq examens thématiques (quatre en groupe permanent, sur l'hydrogéologie, la géomécanique, la géochimie et les modèles de relâchement, et enfin sur la démarche de sûreté dans son ensemble ; un sur la base d'une instruction de l'IRSN, portant sur le modèle d'inventaire). Des avis et recommandations ont été formulés en fonction des conclusions de ces analyses, et pris en compte par l'Andra.

Par ailleurs, l'autorité de sûreté effectue également des « visites de surveillance » soit au siège de l'Agence, soit sur le laboratoire de Meuse / Haute-Marne, au cours desquelles elle porte une appréciation sur la qualité des travaux en cours. Parmi les thèmes traités à fréquence régulière

(annuelle en règle générale) figurent : la maîtrise des connaissances sur les colis de déchets, l'organisation du projet, la qualité des travaux conduits dans le laboratoire souterrain.

1.5.5.3 Évaluation par les pairs

À la demande des ministères de tutelle de l'Andra, une revue par les pairs a été organisée entre octobre 2002 et février 2003 pour évaluer le programme de l'Andra au regard des pratiques internationales. La revue a été organisée par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE ; elle était constituée d'experts internationaux issus soit d'organismes homologues de l'Andra, soit d'organismes de recherche ou d'appuis techniques d'autorités de sûreté.

La revue a examiné le dossier 2001 de l'Andra et s'est appuyée sur des présentations des ingénieurs de l'Agence et des échanges de questions-réponses. Elle reposait sur un cahier des charges défini par les ministères de tutelle. La revue a émis un avis général, notamment sur la qualité de la documentation et la manière dont le programme de recherche se compare aux standards internationaux ; elle a émis des recommandations sur un certain nombre de points techniques particuliers. Le rapport est disponible pour le public [15].

Les recommandations ont été prises en compte dans la définition des priorités du programme de recherche. Elles ont également nourri la réflexion sur l'organisation de la documentation du dossier 2005, celle-ci s'inspirant directement des remarques des experts.

1.5.5.4 Le conseil scientifique de l'Andra

Institué par décret [16], le conseil scientifique de l'Andra est chargé d'« *émettre des avis et recommandations sur les priorités [du programme de recherche]* » et d'en évaluer les résultats. Il est composé d'experts nommés par les ministères de tutelle de l'Agence. À ce titre, il émet des avis qui sont pris en compte dans la définition des programmes de recherche. Il a examiné les travaux menés dans le cadre du dossier 2005 au fur et à mesure de leur production.

1.5.5.5 Autres évaluations

En plus de ce dispositif, l'Andra s'est attachée à soumettre les résultats de son travail à une évaluation indépendante, dès que cela paraissait pertinent. Cela passe par :

- la constitution de groupes de travail d'experts ayant contribué à relire les documents du dossier 2005 (les tomes et les référentiels) au fur et à mesure de leur production ;
- la présentation des travaux de l'Andra dans un grand nombre de congrès et de colloques internationaux afin de recueillir les réactions sur les présentations.

1.6 Spécificité de l'approche de sûreté du dossier 2005 argile

Après avoir introduit les grands principes sur lesquels s'est fondée la constitution du dossier 2005, et avant de passer au contenu même du tome « évaluation de sûreté », il est apparu utile de préciser au lecteur quelles pouvaient être les spécificités de l'approche de sûreté adoptée, en regard d'approches plus classiques mises en œuvre pour les rapports de sûreté des installations nucléaires de base.

1.6.1 Place de la faisabilité dans l'évaluation de sûreté

La démarche de sûreté du dossier 2005 prend en compte le fait que les études sont au stade de la faisabilité. Cela induit, par rapport à un dossier de sûreté plus classique, des spécificités. Le but de la faisabilité est de mettre en évidence l'existence de solutions techniques, mais pas de les figer de manière irrévocable. En particulier, les concepts pourront évoluer au fil des étapes de conception qui pourraient conduire jusqu'à l'ouverture d'un stockage. Dans un certain nombre de cas, plusieurs solutions technologiques existent pour répondre à un problème donné, en particulier en exploitation. L'évaluation de faisabilité se fonde alors sur une des technologies les mieux maîtrisées, mais il demeure possible d'en mettre en œuvre une autre.

De ce fait, et bien que la sûreté ait été un critère majeur pour la définition des architectures et leur développement, leur optimisation n'a pas nécessairement été conduite jusqu'à son terme ultime. En fonction des progrès de connaissances, des voies d'amélioration sont possibles et pourraient être développées dans des phases ultérieures du projet. Une démarche « ALARA », conduisant à optimiser la protection radiologique des travailleurs et du public, n'est pas développée dans toute sa complétude. Nonobstant, les concepts proposés présentent déjà un niveau de sûreté important, et constituent des fondements solides pour des travaux ultérieurs.

1.6.2 Place et rôle du site de Meuse / Haute-Marne

La particularité du dossier 2005 argile est qu'il s'appuie sur les observations et les résultats d'expérimentations réalisées sur un site réel, en l'occurrence sur le site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne. Ce contexte particulier permet d'asseoir la faisabilité, et donc en particulier les évaluations de sûreté, sur des données de site. Il ne doit cependant pas induire de confusion sur le sens de la démarche de sûreté du dossier 2005. Son but n'est pas de positionner le stockage sur un site particulier en vue de solliciter une autorisation de création. La décision de mettre en œuvre une telle démarche ne relève pas de la responsabilité de l'Andra. Il appartient à la Représentation nationale de décider si un stockage doit être construit, et dans quelles conditions. Si cette décision était prise, un processus d'instruction en vue de l'autorisation de construction, puis d'exploitation serait enclenché. Les étapes de ce processus ne sont pas définies à ce jour, mais on peut imaginer qu'elle impliquerait une consultation large du public et une instruction détaillée de dossiers portant sur la sûreté du stockage, par les autorités compétentes. Le dossier 2005 ne constitue pas un tel dossier.

L'objet du dossier 2005 est d'évaluer la faisabilité du stockage dans une formation géologique particulière, le Callovo-Oxfordien. À ce titre, elle traite bien évidemment de la sûreté du stockage, partie intégrante de la faisabilité. Elle s'appuie sur les données recueillies sur le site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne. Ce site est celui qui a, par nature même, fait l'objet de la reconnaissance la plus détaillée. L'Andra s'est cependant assurée que les grandes caractéristiques de la couche, observées localement, étaient extrapolables à une zone plus large, dite « zone de transposition », dont on trouvera la définition dans [17]. Cette transposabilité est le gage que les résultats obtenus ne sont pas dépendants des spécificités d'une zone de faible dimension.

Aborder la question de la localisation exacte du stockage dans ce cadre est en revanche prématuré. On verra que, pour les besoins de certaines évaluations de sûreté (chapitre 5, chapitre 7), il est nécessaire de « localiser » le stockage dans la zone. Dans un tel cas, le choix a été fait en général de positionner le stockage conventionnellement à l'emplacement du laboratoire (choix effectué pour les études d'ingénierie, pour les études d'impact). On prend cependant en compte dans les évaluations, et

notamment dans la gestion des incertitudes, la possibilité que, à d'autres emplacements au sein de la zone, les propriétés de la roche puissent être un peu différentes. La nécessité d'effectuer ce type de choix ne doit pas induire de confusion sur le sens de la démarche : il n'est procédé à aucune « optimisation » de la position du stockage en fonction de critères de sûreté ou d'autres critères.

1.6.3 Sûreté en exploitation et sûreté à long terme

Les considérations précédentes conduisent à souligner la double spécificité de l'approche de sûreté du dossier 2005 :

- pour la part relative à la sûreté d'exploitation, elle s'apparente globalement à une démarche classique. Elle se concentre sur les problématiques spécifiques au stockage, et ne traite pas de manière détaillée l'ensemble des dispositions de sûreté dès lors que celles-ci sont déjà bien connues dans un autre contexte. C'est en particulier le cas pour les installations de surface. Elle ne s'inscrit pas non plus dans une démarche de demande d'autorisation de création d'installation ;
- pour la part relative à la sûreté à long terme, l'accent est porté sur la maîtrise des connaissances scientifiques et des incertitudes.

L'Andra a donc développé deux volets complémentaires : l'un destiné à la sûreté d'exploitation, l'autre destiné à l'évaluation de la sûreté en phase de post-fermeture. Chacun se doit de prendre en compte les contraintes de l'autre.

En effet, les conditions d'exploitation, au sens le plus large, sont contraintes par les besoins de sûreté à long terme. Une solution technologique (par exemple pour le creusement des ouvrages, ou pour la manutention des colis) qui apparaîtrait la plus adaptée du point de vue des conditions d'exploitation, mais qui induirait une non maîtrise des conditions d'évolution à long terme (endommagement de la roche d'une ampleur inconnue, risque au regard de la stabilité à long terme de la roche, etc.) est proscrite.

On notera que la sûreté à long terme est également contrainte dans une certaine mesure par l'exploitation. D'une part, les concepts ne doivent pas correspondre uniquement à une vision optimale de la sûreté à long terme, mais ils doivent pouvoir également être exploités dans des conditions sûres et sans complexité technique excessive. On s'assure, lors de la définition des concepts, qu'ils sont effectivement réalisables dans de bonnes conditions, et que les solutions proposées sont réalistes.

D'autre part, il peut s'avérer nécessaire dans l'analyse de sûreté à long terme de prendre en compte explicitement les conditions dans lesquelles les architectures de stockage auront été construites et exploitées : comment les ouvrages ont-ils été creusés, et cela influe-t-il sur leur état après fermeture ? Pendant quelle durée les ouvrages ont-ils été laissés sans remblayage ? Quels vides peuvent être présents entre les colis ?... Les conditions de déroulement de la phase d'exploitation au sens large (construction, incorporation des colis, observation et fermeture) définissent pour partie l'état initial du stockage pour son évolution en post-fermeture.

Le principe d'équité intergénérationnelle impose de ne pas privilégier une échelle de temps plus qu'une autre. Les conditions de sûreté en opération et à long terme sont donc prises en compte toutes deux au moment des choix de concepts.

Dans le dossier 2005, la description des concepts et l'explication des choix effectués font donc appel en tant que de besoin à la sûreté de l'exploitation et à celle à long terme. En revanche, et en cohérence avec le principe évoqué ci-dessus, une fois cette description effectuée, les évaluations de sûreté en exploitation et à long terme sont conduites de manière indépendante, mais avec une approche similaire.

L'approche de sûreté du dossier 2005, si elle reprend les concepts et l'esprit général d'une démarche de sûreté « classique » d'installation nucléaire, s'en distingue en définitive par quelques traits principaux :

- la nécessité d'aborder de manière coordonnée des phases de vie différentes (exploitation, post-fermeture) ;
- la prise en compte d'échelles de temps dépassant l'expérience humaine ;
- le lien très étroit entre conception, acquisition de connaissances et évaluation de sûreté, dans un objectif d'évaluation de faisabilité ;
- la place centrale accordée à la notion de maîtrise des incertitudes, en particulier pour la phase de post-fermeture.

Ces particularités résultent tant de la spécificité de l'objet étudié (le stockage en formation géologique profonde) que de la question posée (celle de la faisabilité). Elles requièrent l'appel à des disciplines nombreuses (ingénierie minière et nucléaire, sciences de la terre, sciences des matériaux, sûreté) et la mise en œuvre de méthodes spécifiques, à l'interface entre ces disciplines.

1.7 Présentation générale de la démarche – introduction aux chapitres suivants

Ce dernier paragraphe du chapitre 1 constitue une introduction et un guide de lecture pour tout le reste du dossier. Il explique comment l'Andra a décliné les principes de son approche de sûreté au cours des études, et comment le résultat de ce travail est retranscrit dans le dossier 2005. Il décrit les principaux éléments et leur articulation. Le lecteur est invité à se reporter aux références citées au fur et à mesure pour approfondir les sujets qui l'intéressent.

La démarche de conception du stockage, de recherche scientifique et d'évaluation de sûreté est une démarche itérative. Elle se développe en tirant les enseignements des étapes précédentes (en l'occurrence, les phases qui ont précédé la production du dossier 2005 : définition des options initiales de conception, puis première évaluation à visée essentiellement méthodologique dans le cadre du dossier 2001). Le dossier 2005 présente cependant, pour la clarté de l'exposé, les acquis des travaux de recherche sans distinguer de manière systématique ce qui peut être issu d'itérations précédentes de ce qui relève plus particulièrement des travaux de la période 2002-2005. En particulier, les architectures de stockage sont présentées et justifiées à partir des éléments de connaissances mis à jour en 2005. Il n'en demeure pas moins que leur définition est issue d'un travail par étapes successives, et pourra encore évoluer au-delà de 2006.

1.7.1 Présentation des données d'entrée

Tout projet de développement d'un stockage doit commencer par une analyse des données d'entrée techniques qui le fondent. Le nombre et la variété de celles-ci augmentent à chaque itération du processus de définition du stockage. Les données d'entrée et le fruit des analyses conduites dans le cadre du dossier 2005 sont structurés dans une architecture documentaire qui est représentée dans la Figure 1.7-1. La manière dont les principaux documents s'organisent en fonction de la démarche de sûreté est exposée dans la suite de ce paragraphe.

Au démarrage du projet, seul l'inventaire des colis à stocker est connu. Il fait l'objet d'investigations d'abord générales, destinées à en comprendre les grandes caractéristiques, puis plus détaillées au fur et à mesure que les études de sûreté permettent de comprendre quelles sont les caractéristiques importantes.

Les données d'entrée sur les colis sont décrites dans le modèle d'inventaire de dimensionnement [18]. Au niveau de ce tome, un rappel des principales caractéristiques des colis, destiné essentiellement à fixer quelques éléments importants pour le reste de l'analyse, figure au chapitre 2.

Un processus de sélection de site est ensuite conduit en parallèle d'une première définition de principe des architectures. Une fois un ou plusieurs site(s) choisi(s) (dans le cas du dossier 2005, le site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne a été retenu pour conduire les études de faisabilité), ceux-ci deviennent des données d'entrée pour l'analyse. Ils font également l'objet d'une caractérisation de plus en plus détaillée, et de plus en plus focalisée sur les questions importantes pour l'ingénierie et la sûreté du stockage.

L'état des connaissances sur le site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne est présenté dans le référentiel de site [17]. Une présentation de quelques grands résultats, destinés à faciliter la compréhension du tome, mais sans volonté d'exhaustivité, figure au chapitre 2.

Une fois le site d'étude retenu, il est possible de conduire des études sur les grands types de matériaux qui seront utilisés dans le stockage, sur le comportement au sein de la roche, en incluant les colis de déchets eux-mêmes. La question du transfert des radionucléides et des toxiques chimiques dans la roche est également un sujet qui est abordé très tôt, dans la mesure où il permet de caractériser les fonctions de confinement qui peuvent être attendues du milieu géologique. Cet ensemble de connaissances constitue, au fur et à mesure que le projet se développe, un jeu de données d'entrée

importantes pour le concepteur, qui définit les architectures en fonction de ce qu'il sait du comportement des matériaux en stockage.

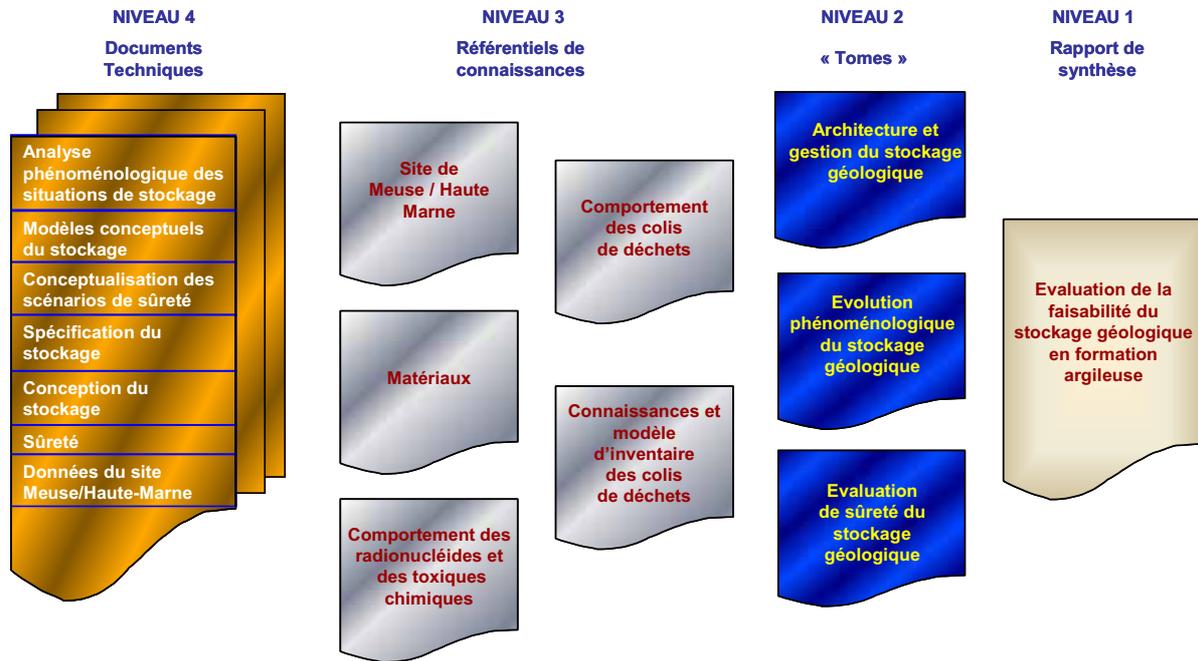


Figure 1.7-1 Organisation de la structure documentaire du dossier 2005.

Ces connaissances sont présentées au sein du référentiel « matériaux », du référentiel « comportement des colis » et du référentiel « comportement des radionucléides et des toxiques chimiques » [19, 20, 21]. Les éléments correspondants ne sont repris dans le présent tome que quand ils éclairent un élément de l'analyse de sûreté.

Au fur et à mesure du développement des architectures, les options techniques se figent progressivement. Au stade de la faisabilité, les choix sont encore ouverts. Les grands déterminants de l'architecture sont cependant considérés comme suffisamment stables, tant du point de vue de l'organisation du stockage (l'architecture d'ensemble et la manière dont se distribuent les zones de stockage, les ouvrages d'accès, etc.) que de la manière dont il serait conçu et exploité (l'exigence de réversibilité en étant un exemple).

Ces éléments de description des concepts sont fournis de manière très succincte au chapitre 2 pour faciliter la lecture de la suite du tome. **Le lecteur qui souhaite une information plus détaillée sur la définition des architectures de stockage est invité à se reporter au tome dédié [22].**

1.7.2 Définition des fonctions de sûreté

La démarche de conception du stockage se fonde sur une analyse des fonctions attendues : qu'attend-on de la part du stockage ? **Cette analyse fonctionnelle dite « externe » est un préalable à la définition des architectures [23].**

Dans un deuxième temps, le concepteur définit la manière dont il entend répondre à ces fonctions : quelles solutions techniques veut-il mettre en œuvre, quelles sous-fonctions va-t-il attribuer à chacun des composants du stockage ? Il est guidé dans sa démarche par un ensemble de contraintes (réglementaires, techniques, économiques, autres) et par l'état des connaissances. Un soin particulier est porté à la déclinaison des fonctions destinées à assurer la sûreté du stockage à long terme, qui s'avèrent les plus structurantes pour la définition des architectures de stockage. **Le fruit de cette analyse, et la manière dont le stockage a été conçu en relation avec cette approche par fonction, sont présentés au chapitre 3 du présent tome, ainsi que dans le tome « architecture et gestion du**

stockage géologique ». Le lecteur intéressé par un niveau de détail plus fin pourra **se reporter aux analyses fonctionnelles internes** [24, 25].

Ces analyses sont un guide pour l'ensemble de la démarche de conception. En particulier, elles fixent les exigences auxquelles l'ingénierie doit répondre, **au travers de la spécification technique de besoin** [26]. Les études d'ingénierie font l'objet du tome « architecture et gestion du stockage géologique » et des documents de conception associés. Seule est présentée dans ce tome la part relative à la sûreté opérationnelle (sécurité des travailleurs et du public pendant la construction, le fonctionnement et la fermeture du stockage). **Cette partie, traitée dans le chapitre 4**, présente successivement le fonctionnement normal des installations associé à une première évaluation dosimétrique qui vérifie la tenue des objectifs de sûreté et une analyse des risques identifiant les situations accidentelles (incendie, chute) qui, compte tenu de leur spécificité ou de leur influence sur la conception des installations de stockage et des équipements, ont fait l'objet d'une étude détaillée.

1.7.3 Définition et description du domaine d'évolution normale

Parallèlement à la démarche de définition du stockage, et en interaction forte avec elle, est conduit un processus fin de description de son évolution dans le temps. Ce travail repose sur un découpage du stockage en situations, chacune de ces situations correspondant à un intervalle de temps et d'espace au sein duquel quelques grands phénomènes dominant l'évolution des composants. **Cette description est l'objet de l'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) en situation d'évolution normale** [27, 28]. Le recensement des phénomènes thermiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques et radiologiques s'effectue dans ce cadre.

La description n'est pas univoque : du fait des échelles de temps et d'espace considérées, des incertitudes existent sur la durée des phénomènes, leur extension spatiale, éventuellement sur leur nature même. Il ne s'agit donc pas de présenter une évolution certaine du stockage, mais un ensemble d'évolutions possibles. Ces évolutions entrent dans le *domaine d'évolution normale* qui regroupe toutes les évolutions jugées probables, ainsi éventuellement que d'autres moins probables mais dont les conséquences sont sans incidence sur la sûreté. Par exemple, si un conteneur a été dimensionné pour durer dix mille ans, il est possible que sa durée de vie soit plus longue s'il est placé dans des conditions favorables : l'ensemble des durées de vie supérieures à dix mille ans entre dans le domaine d'évolution normale. Une durée de vie plus courte, si elle est de nature à compromettre la sûreté du stockage, sort en revanche de ce domaine.

La définition du domaine d'évolution normale est progressive et s'effectue en interaction avec les études de conception du stockage. Elle permet de préciser les performances qui peuvent être attendues de la part des fonctions.

Une fois ce domaine cerné, l'objectif est de vérifier par une évaluation de performances, d'abord composant par composant puis globalement, que le domaine de fonctionnement normal répond aux objectifs de sûreté fixés. Pour cela, le comportement des différents constituants du stockage et de son environnement est représenté par des modèles. C'est la **conceptualisation du stockage, dont les résultats sont présentés dans des documents dédiés** (voir la liste complète dans le tome « évolution phénoménologique du stockage géologique » [7]). Cette conceptualisation est elle-même entachée d'incertitudes qui sont décrites dans ces documents. Afin de procéder à une évaluation globale, les modèles sont sélectionnés et enchaînés les uns aux autres pour constituer un modèle de sûreté global, qui représente le scénario d'évolution normale. Ce dernier peut comporter des variantes et des cas de calculs distincts, de manière à couvrir le domaine d'évolution normale. **La définition du scénario et les résultats du calcul de performances sont présentés au chapitre 5**. Les résultats du travail de conceptualisation et du calcul de performances servent à la fois à vérifier que les objectifs de sûreté sont tenus, mais également à alimenter en retour la conception et la démarche d'acquisition de connaissances.

1.7.4 Gestion des incertitudes et évaluation de la robustesse du stockage

La gestion des incertitudes est au centre de l'analyse de sûreté. Elle oriente la conception, participe à la définition du domaine d'évolution normale, et fonde les analyses de risques. Elle pourrait donc figurer dans l'ensemble des chapitres du présent document ; on a cependant choisi de lui dédier un chapitre à part pour plus de clarté.

Le chapitre 6 présente les résultats de l'analyse qualitative de sûreté, qui consiste à identifier les incertitudes de connaissances et étudier leur influence sur le comportement du stockage. Elle permet de caractériser plus complètement les bornes du domaine d'évolution normale, mais également d'identifier des situations qui en sortent. Elle permet également d'effectuer une première hiérarchisation des incertitudes, en fonction de leur importance au regard de la sûreté.

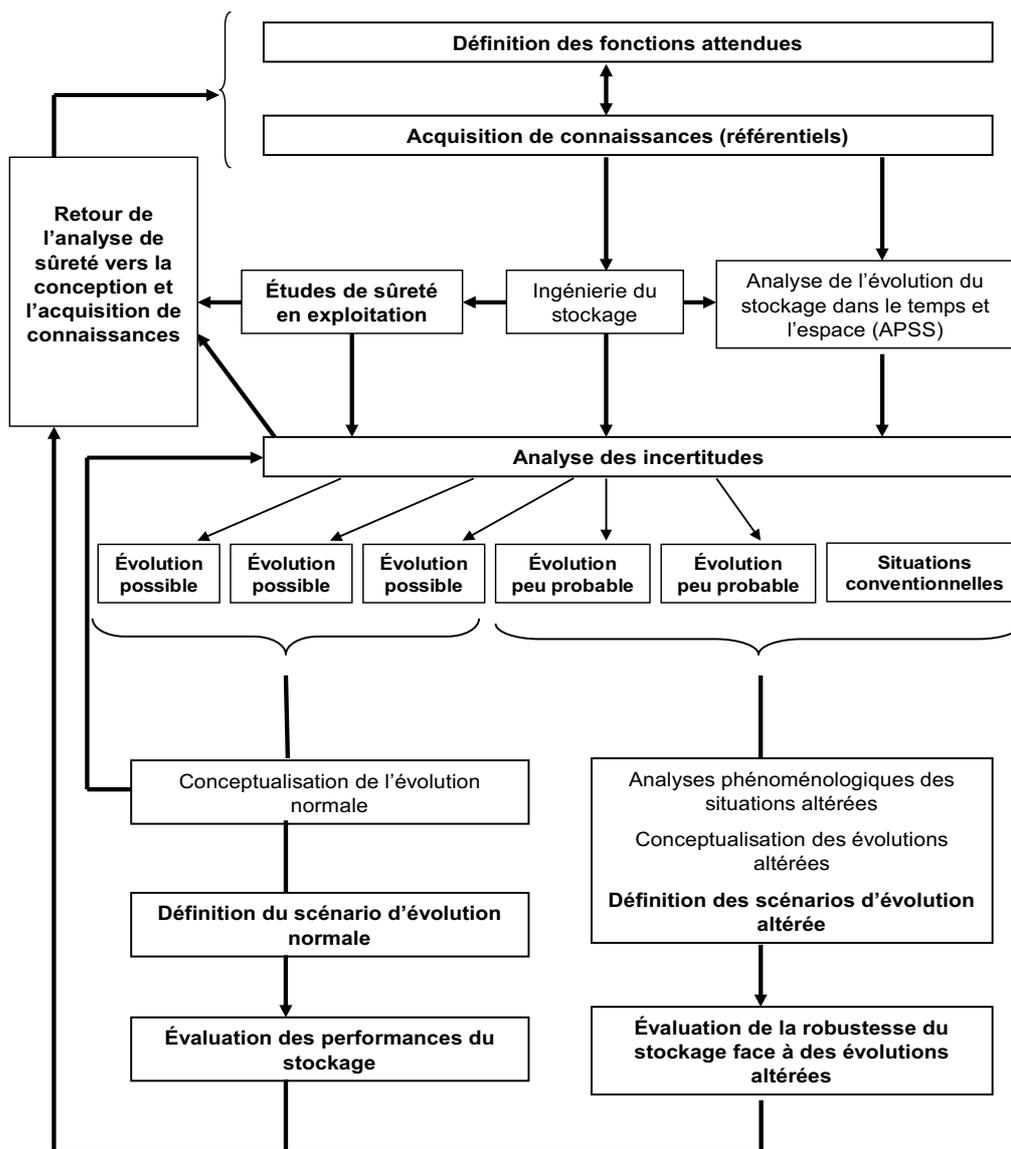
Certaines incertitudes peuvent conduire à une évolution du stockage qui n'est pas souhaitée et ne répond plus aux fonctions de sûreté attendues. De telles évolutions doivent être peu probables. Il est loisible, si cela sert les objectifs de l'analyse de sûreté, d'y ajouter d'autres évolutions, définies purement pour des raisons de sûreté, qui n'ont aucune vraisemblance et sont étudiées uniquement pour en tirer des enseignements sur le comportement du stockage face à une sollicitation non anticipée. **La définition de ces situations, qualifiées d'« altérées », est présentée dans le chapitre 6.** Il convient de noter que, au-delà de la seule définition des évolutions altérées, les analyses d'incertitudes sont utiles pour préciser la conception et la rendre plus robuste aux incertitudes, ou pour donner des priorités au programme de recherche.

Des situations altérées – type, en l'occurrence, une défaillance des dispositifs de scellements du stockage, des éléments de colisage, ainsi qu'un forage intrusif interceptant le stockage et laissé abandonné, ont été définies par avance, en fonction du retour d'expérience de précédents dossiers (de l'Andra et de ses homologues). **Leur phénoménologie est décrite dans des APSS dites « d'évolutions altérées » [29, 30, 31], qui permettent d'appréhender en quoi les processus qui régissent l'évolution normale peuvent être modifiés.** Les situations d'évolutions altérées, issues du recensement des incertitudes, sont rattachées à ces grandes situations – types pour former des scénarios d'évolution altérée, qui font l'objet d'un calcul de performance spécifique. L'objectif est de vérifier si, dans ces conditions plus défavorables, le stockage reste sûr, et d'obtenir des informations complémentaires sur le comportement des composants du stockage. **Les scénarios d'évolution altérées et leurs résultats sont présentés au chapitre 7 du présent tome.**

1.7.5 Conclusion

La conclusion de l'analyse de sûreté (**présentée au chapitre 8**) tire les enseignements de l'ensemble de ces études, complète la hiérarchisation des incertitudes, et s'attache à définir les pistes de progrès, en termes d'ingénierie ou de recherche, qui ressortent de l'analyse de sûreté. Celles-ci, sans anticiper sur les décisions à venir, peuvent contribuer à définir un programme d'étude post-2005, dans le cadre d'une nouvelle itération de la conception du stockage. Elles permettent également de conforter le jugement d'ensemble sur la faisabilité du stockage.

Une représentation schématique de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse de sûreté est donnée par le Synoptique 1-1



Synoptique 1-1

Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse

2

Description générale

2.1	Les déchets à haute activité et à vie longue.....	60
2.2	Le contexte géologique du site de Meuse / Haute Marne	80
2.3	Eléments de description de l'architecture du stockage	92

Ce chapitre donne une vue d'ensemble de l'architecture et de la gestion d'une éventuelle installation de stockage. À ce stade, la formation géologique, les architectures de stockage et les modes de gestion ne sont présentés que de manière succincte, sans justification particulière : l'objectif est uniquement d'introduire les notions essentielles permettant de comprendre la suite du document.

En liminaire on rappelle l'inventaire des déchets à considérer (paragraphe 2.1) et le contexte géologique pour lequel sa faisabilité est étudiée (paragraphe 2.2). Le paragraphe 2.3 introduit ensuite les options techniques en matière d'architecture et de colisage, que l'Andra a retenues pour les études.

2.1 Les déchets à haute activité et à vie longue

Ce paragraphe constitue un résumé des sections relatives aux déchets HAVL des chapitres 2 et 3 du tome « architecture et gestion du stockage géologique » [22]. Il n'est placé ici que pour faciliter la lecture du reste du présent tome. Le lecteur intéressé spécialement par les questions d'inventaire de colis est invité à se reporter préférentiellement au tome cité en référence.

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

Leur contenu en radionucléides à vie longue⁴ leur confère une durée de radio-toxicité longue, associée au risque d'ingestion entraînant une exposition de tissus vivants au rayonnement α ; la période radioactive⁵ de certains isotopes peut dépasser la centaine de milliers d'années.

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

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

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

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

2.1.1 Nature et provenance des déchets HAVL

Les déchets HAVL résultent de l'industrie électronucléaire, ainsi que d'activités de recherche et de la défense nationale. Pour mener l'étude des possibilités de stockage, l'Andra a constitué un « modèle d'inventaire » consolidant les données et hypothèses sur les déchets HAVL [18]. Il prend en compte les déchets déjà produits, et entreposés actuellement sur leurs sites de production, ainsi que les déchets futurs.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.2 Conditionnement des déchets HAVL

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

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

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

Pour constituer l'inventaire, il a été choisi⁶ de se référer à des déchets sous une forme conditionnée. Cela implique de connaître ou de formuler des hypothèses sur la nature et les modes de conditionnement et de colisage des déchets existants non encore conditionnés et des déchets futurs, ainsi que les nombres et volumes de colis dits « primaires » à considérer ; les colis primaires sont les objets qui seraient livrés sur un éventuel site de stockage.

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

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

- Les déchets dits de catégorie B se caractérisent par une activité β - γ faible ou moyenne, et, en conséquence, par un dégagement thermique nul ou faible. Ils représentent le plus grand nombre de colis, ainsi que la plus grande variété de types de conditionnements. Leur inventaire total en radionucléides à vie longue, relativement plus faible que celui des autres colis, est réparti dans le volume important qu'ils représentent.
- Les déchets de catégorie C sont constitués des produits de fission et actinides mineurs séparés lors du retraitement des combustibles. Leur haute activité β - γ génère un dégagement thermique important, qui décroît dans le temps, principalement avec la décroissance radioactive des produits de fission à période moyenne (césium 137, strontium 90). Le conditionnement de ces déchets consiste en une incorporation dans une matrice de verre ; la capacité de confinement de ce matériau est particulièrement élevée et durable, s'il se trouve dans des conditions d'environnement physico-chimiques favorables.
- Les combustibles usés (repérés par les lettres « CU ») présentent aussi une haute activité, et par conséquent un dégagement thermique notable. Ce dégagement thermique est dû à leur contenu en produits de fission à période moyenne, plutonium et américium (issu principalement de la désintégration du plutonium) ; ces deux derniers éléments conduisent à une décroissance plus lente dans le temps. D'autres spécificités sont les grandes dimensions des combustibles déchargés des réacteurs électronucléaires, s'il était choisi de les stocker en l'état, ainsi qu'un contenu plus important en matière fissile, associé à la question d'un risque de criticité.

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

2.1.3 Scénarios pour les études

Le parc actuel de réacteurs électrogènes à eau pressurisée se compose de 58 réacteurs, dont la mise en service s'est effectuée entre 1977 et 1999. Le tonnage de combustibles nucléaires qui serait déchargé de ces réacteurs sur la totalité de leur durée d'exploitation est estimé à 45 000 tonnes de « métal lourd » (tML). Cette estimation se fonde sur une combinaison d'hypothèses portant sur (i) la durée de vie moyenne des tranches (quarante années), (ii) la production d'énergie (16 000 térawatts-heures de

⁶ Toutefois pour les assemblages de combustible usé, l'option d'un conditionnement directement sur le site de stockage est étudiée.

production cumulée), (iii) la montée progressive des taux de « combustion » des combustibles en réacteurs⁷.

Les types de combustibles qui ont été considérés et leurs taux de combustion moyens sont les suivants :

- trois générations de combustibles à l'oxyde d'uranium : UOx1, UOx2, UOx3, irradiés respectivement à 33 gigawatts-jours par tonne de combustible (GWj/t), 45 GWj/t, 55 GWj/t, en moyenne ;
- des combustibles contenant de l'uranium recyclé (URE) irradiés en moyenne à 45 GWj/t ;
- des combustibles mixtes à l'oxyde d'uranium et à l'oxyde de plutonium recyclé (MOX) irradiés à 48 GWj/t en moyenne.

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

Les trois premiers scénarios, notés S1a, S1b et S1c, correspondent à la poursuite du retraitement de combustibles usés déchargés des réacteurs. Le scénario S1a suppose le retraitement de l'ensemble de ces combustibles (UOx, URE et MOX). Il lui est associé l'hypothèse d'une incorporation, dans du verre, de mélanges de produits de fission et d'actinides mineurs provenant de combustibles UOx et MOX ; par ailleurs, dans un objectif d'étude, une part très faible du plutonium provenant de combustibles UOx retraités est supposée incorporée dans certains colis. Ce scénario couvre ainsi des typologies variées de colis C vitrifiés. Dans les scénarios S1b et S1c, les combustibles MOX ne sont pas retraités ; cela conduit à explorer l'hypothèse de leur stockage direct. Les scénarios S1b et S1c ont été distingués pour étudier, dans le scénario S1b, la possibilité d'augmenter la concentration de déchets dans les verres, par rapport aux colis produits actuellement ; cette plus grande concentration se traduirait par un dégagement thermique des colis légèrement supérieur. Enfin, un quatrième scénario, noté S2, qui suppose l'arrêt du retraitement, supporte l'étude exploratoire d'un stockage direct de combustibles UOx et URE, ainsi que celui de combustibles MOX comme dans les scénarios S1b et S1c. Ce scénario suppose que les combustibles soient considérés comme des déchets, ce qui, on le rappelle, n'est pas le cas aujourd'hui.

Pour permettre une estimation quantitative des déchets produits, les scénarios S1a, S1b et S1c se fondent sur la répartition suivante des divers types de combustibles déchargés du parc de réacteurs : 8 000 tML d'UOx1 (33 GWj/t), 20 500 tML d'UOx2 (45 GWj/t), 13 000 tML d'UOx3 (55 GWj/t), 800 tML d'URE (45 GWj/t) et 2 700 tML de MOX (48 GWj/t). Dans les scénarios S1b et S1c, l'étude du stockage direct porte sur la totalité des 2 700 tML de combustibles usés MOX.

Le scénario S2 considère hypothétiquement la poursuite du retraitement d'une partie des combustibles UOx jusqu'en 2010 (soit 8 000 tML d'UOx1 et 8 000 tML d'UOx2), puis l'arrêt de ce retraitement. La suspension du recyclage de l'uranium et du plutonium modifie la répartition totale des différents types de combustibles déchargés des réacteurs. L'étude du stockage direct des combustibles non traités porte alors sur 29 000 tML comprenant 12 500 tML d'UOx2, 14 000 tML d'UOx3, 500 tML d'URE et 2 000 tML de MOX.

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

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

⁷ Le taux de combustion d'un assemblage de combustible nucléaire traduit l'énergie produite en réacteur par la matière fissile qu'il contient (oxyde d'uranium ou mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium)

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

2.1.4 Description des colis types

Les paragraphes suivants fournissent une description des déchets qui sont regroupés en colis type au sein du modèle d'inventaire de dimensionnement (MID).

2.1.4.1 Colis types primaires de déchets B

● Colis type B1

Le colis type B1 regroupe des déchets d'exploitation du parc actuel de réacteurs à eau pressurisée (REP) ainsi que quelques déchets activés en provenance du réacteur à neutrons rapides SUPERPHENIX.

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

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

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

L'hypothèse de conditionnement considérée dans l'étude est un compactage des déchets placés dans des étuis⁸, puis une mise en conteneurs en acier inoxydable appelés « Conteneur Standard de Déchets Compactés ou CSD-C » de petit gabarit (voir Figure 2.1-1).

⁸ Les grappes et les doigts de gant RIC de grandes dimensions sont découpés en tronçons avant leur mise en étui de compactage

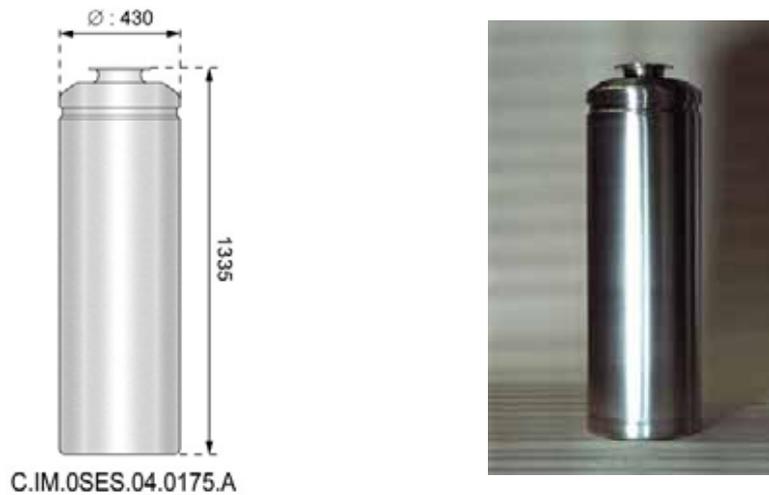


Figure 2.1-1 Conteneur Standard de Déchets Compactés (CSD-C)

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

- **Colis type B2**

Le colis type B2 décrit des enrobés de bitume constitués par des boues issues du traitement chimique d'effluents radioactifs, séchées et enrobées dans du bitume. Les effluents considérés ici sont produits à différentes étapes du retraitement des combustibles et lors d'interventions menées sur les matériels et les installations (décontaminations, rinçages). Ces effluents sont collectés dans des stations de traitement où ils sont décontaminés par des procédés chimiques, avant rejet. Le déchet résiduel est alors récupéré sous la forme de boues.

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

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

Par ailleurs, les colis d'enrobés de bitume ne sont pas tous de même géométrie. Un premier groupe de colis (colis type B2.1), représentant 45 % des colis inventoriés, correspond à des fûts primaires en acier inoxydable de 238 litres (STE3/STE2) et de 245 litres (STEL à partir d'octobre 1996). Ces colis sont illustrés à la Figure 2.1-2.

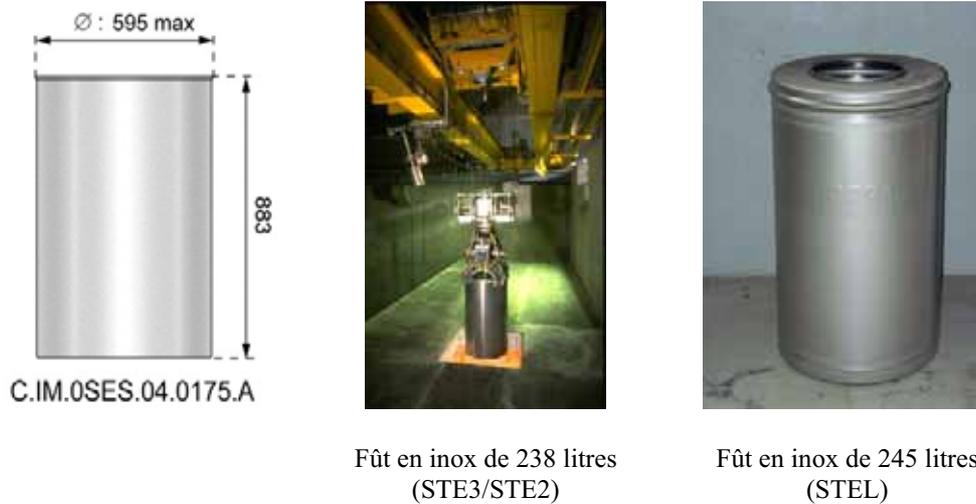


Figure 2.1-2 Fûts inox STE3/STE2 et STEL

Le deuxième groupe de colis (colis type B2.2, 55 % des colis de bitume inventoriés) correspond à des fûts en acier inoxydable de 428 litres. Ces fûts (voir Figure 2.1-3) sont utilisés pour le reconditionnement des fûts primaires en acier non allié produits sur la STEL entre 1966 et octobre 1996.

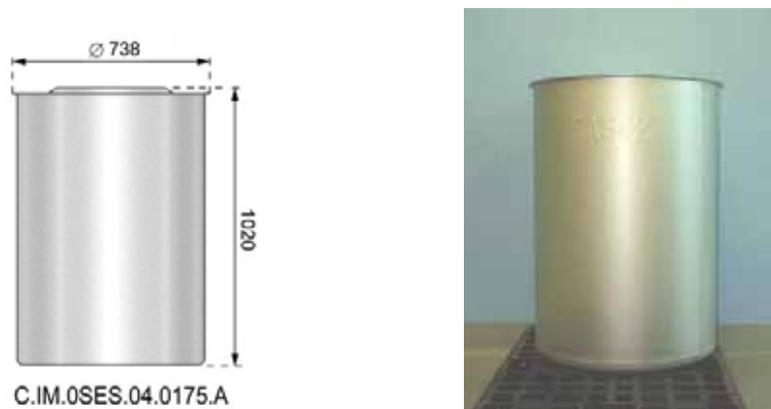


Figure 2.1-3 Fût inox utilisé pour le reconditionnement des fûts primaires en acier non allié

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

- **Colis type B3**

Le colis type B3 regroupe des déchets technologiques issus du fonctionnement et de la maintenance des installations nucléaires exploitées par COGEMA et par le CEA. Ces déchets sont constitués en grande partie de déchets solides de natures diverses (métaux divers, matières organiques), mais comprennent aussi des boues de filtration et des concentrats d'évaporation. Cet ensemble inclut aussi divers déchets produits à Marcoule tels que du graphite, des résines échangeuses d'ions et des zéolithes. L'activité radiologique des déchets, notamment celle des déchets technologiques, est due, le

plus souvent, à la présence d'une contamination à la surface des déchets par des produits de fission et/ou des produits d'activation et/ou des actinides.

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

Pour les besoins d'étude, les divers colis de déchets technologiques existants et prévisionnels sont décrits par des colis types, dont la déclinaison des colis s'effectue sur deux niveaux (voir Tableau 2.1-1). Au niveau 2, les regroupements des colis ont été définis sur la base des matériaux utilisés pour les conteneurs, et du caractère homogène ou hétérogène du déchet conditionné :

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

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

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

	Colis type	Matériau de conteneur	Matrice d'enrobage ou de blocage	Présence de matériaux métalliques	Présence de matériaux organiques
B3.1	B3.1.1.	Béton	Ciment-bitume	Néant	x
	B3.1.2	Béton fibré ou amiante-ciment	Ciment	x	x
	B3.1.3	Béton ou acier non allié	Ciment-bitume ou mortier	x	x
B3.2	B3.2.1	Béton	Ciment	Néant	x
	B3.2.2	Béton fibré	Mortier	x	x
B3.3	B3.3.1	Acier inoxydable	Néant	x	x
	B3.3.2	Acier inoxydable	Ciment	Néant	x
	B3.3.3	Acier non allié ou inox	Ciment-bitume ou liant hydraulique	x	x
	B3.3.4	Acier non allié	Ciment-bitume ou liant hydraulique	x	x

Tableau 2.1-1 *Récapitulatif des principales caractéristiques des colis types de déchets technologiques cimentés ou compactés*

● Colis types B4 et B5

Ces deux colis types regroupent des déchets issus du retraitement des combustibles usés dans les usines COGEMA, correspondant aux éléments formant l'ossature métallique des assemblages combustibles. Les déchets sont séparés des matières nucléaires recyclables (uranium, plutonium) et des produits de fission et actinides mineurs, au début du processus de retraitement, lors des opérations de cisailage et de dissolution des combustibles.

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

Les déchets de structure considérés ici sont issus des retraitements réalisés dans les usines de COGEMA La Hague. Ils comprennent (i) les déchets produits lors de retraitements antérieurs de combustibles UNGG et REP, aujourd'hui entreposés dans des silos et piscines, (ii) les déchets résultant des traitements actuels et futurs des différentes typologies de combustibles REP UOx et MOX, définies dans les scénarios d'étude donnés au paragraphe 2.1.3.

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

Le mode initial de conditionnement des déchets de structure des assemblages combustibles REP consistait en une cimentation dans des fûts en acier inoxydable de grand gabarit (colis type B4, voir Figure 2.1-4). Ce procédé a été appliqué entre 1990 et 1995, puis remplacé par un compactage des déchets, mis en œuvre dans l'atelier ACC (Atelier de Compactage des Coques) de La Hague, à partir de 2002 (colis type B5).



Figure 2.1-4 Fût en inox de 1800 litres contenant des déchets de structure cimentés

Le procédé de compactage s'applique aux déchets de structure issus des combustibles UNGG et REP retraités antérieurement, aujourd'hui entreposés dans des silos et piscines, ainsi qu'aux déchets de structure issus des traitements des combustibles déchargés actuellement et dans les années futures des réacteurs du parc REP. Comme mentionné ci-avant, certains colis contiennent en plus des déchets technologiques compactés issus de l'exploitation et/ou la maintenance des ateliers du site. Compte tenu de la diversité des flux de déchets considérés et de leurs caractéristiques, quatre sous-ensembles de colis de déchets de structure compactés (CSD-C) peuvent être distingués. Ils sont résumés dans le Tableau 2.1-2.

Colis-type	Matériaux des déchets de structure	Présence de déchets technologiques	Présence de matières organiques	Production de gaz de radiolyse (H ₂)	Thermicité, niveau d'irradiation à la date de production des colis
B5.1	Alliages de zirconium-étain ou zirconium-niobium, aciers inox, alliage de nickel	x	x	x	Colis faiblement thermiques, fortement irradiants
B5.2	Idem sous-ensemble B5.1	x	Néant	Néant	Idem B5.1
B5.3	Alliage de zirconium-étain, aciers inox, alliage de nickel	Néant	Néant	Néant	Colis non thermiques, moyennement irradiants
B5.4	Alliages de magnésium-zirconium ou magnésium-manganèse	Néant	Néant	Néant	Colis non thermiques, faiblement irradiants

Tableau 2.1-2 *Récapitulatif des principales caractéristiques des colis types de déchets de structure avec ou sans déchets technologiques compactés*

● Colis type B6

Ce colis type regroupe des déchets produits sur le site de COGEMA Marcoule, aujourd'hui entreposés, comprenant (i) les déchets d'exploitation de l'atelier de vitrification de Marcoule, (ii) des déchets de structure issus des combustibles retraités dans l'usine UP1, (iii) des déchets technologiques d'exploitation et de maintenance des installations du site de Marcoule. Il est décliné en cinq colis types tenant compte des natures et caractéristiques spécifiques des déchets et des dimensions des enveloppes.

Le colis type B6.1 contient des déchets technologiques liés à l'exploitation de l'atelier de vitrification de Marcoule (AVM). Les déchets, constitués d'appareillages, d'outillages et de pièces diverses en aciers, sont déposés dans un conteneur en acier inoxydable de géométrie similaire à celle des conteneurs de déchets vitrifiés AVM. La masse des colis est en moyenne de 160 kilogrammes, pouvant atteindre 320 kilogrammes (hors matériau d'immobilisation des déchets). L'activité radiologique correspond à une contamination à la surface des déchets. Ces colis ne sont pas thermiques.

Les colis types B6.2 et B6.3 contiennent des déchets de structure de combustibles. Le mode de conditionnement prévisionnel est une mise des déchets dans des fûts en acier inoxydable appelés fûts EIP. Les colis sont composés soit de déchets de structure en aluminium et en acier inoxydable (colis type B6.2), soit de déchets de structure en alliages de magnésium (colis type B6.3). La masse moyenne des colis est inférieure à 300 kilogrammes (hors matériau d'immobilisation des déchets). Les colis contenant des déchets de structure en aluminium et en acier ont une puissance thermique de l'ordre de 10 watts, elle sera de 0,5 watt au maximum à l'horizon 2025. Les colis contenant des déchets de structure en alliages de magnésium ne sont pas thermiques.

Les deux autres de colis types contiennent des déchets technologiques constitués, soit d'un mélange de matériaux métalliques et organiques (colis type B6.4), soit de matériaux métalliques seuls (colis type B6.5). Le mode de conditionnement prévisionnel est aussi une mise des déchets en fûts EIP.

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

Les colis contenant des déchets technologiques métalliques seuls ne sont pas thermiques et ne produisent pas de gaz.

Les principales caractéristiques des cinq colis types de déchets de structure et technologiques sont récapitulées au Tableau 2.1-3.

Colis types	Présence de déchets métalliques	Présence de déchets organiques	Production de gaz de radiolyse (H ₂)	Thermicité, niveau d'irradiation à la date de production des colis
B6.1	x	Néant	Néant	Colis non thermiques, faiblement irradiants
B6.2 B6.3	x	Néant	Néant	Thermicité nulle ou moyenne, niveau d'irradiation moyen ou fort suivant les colis
B6.4 B6.5	x	x	x	Colis non thermiques et non irradiants

Tableau 2.1-3 Récapitulatif des caractéristiques des colis types B6 de déchets de structure et technologiques mis en fûts

● Colis type B7

Le colis type B7 regroupe des crayons sources REP ainsi que des sources scellées à usage industriel.

Les sources scellées à usage industriel contiennent des matières radioactives de natures, d'activités et de périodes très diverses. Plusieurs milliers de sources ont fait l'objet, entre 1972 et 1985, d'un conditionnement dans des conteneurs en béton, ces derniers étant ensuite reconditionnés dans des conteneurs métalliques. Ces colis dits « blocs sources » sont actuellement entreposés au CEA, sur le site de Cadarache (colis type B7.1, voir Figure 2.1-5). Ce sont des colis de grand gabarit ; leur masse est comprise entre 6 et 9,2 tonnes.



Figure 2.1-5 Blocs sources

Les crayons sources (colis type B7.2) sont des déchets d'exploitation des réacteurs REP, au même titre que les différents déchets métalliques activés décrits par le colis type B1. Constituant une partie des crayons contenus dans les grappes sources primaires et secondaires, ils servent à élever le niveau de flux à un seuil détectable par les appareils de comptage neutronique, lors du démarrage des réacteurs. Les crayons sources primaires qui contiennent une capsule de californium sont déchargés en fin de premier cycle, tandis que les crayons sources secondaires, constitués d'un mélange d'antimoine-

béryllium, subissent plusieurs cycles d'irradiation avant leur mise au rebut. Les grappes sources primaires déchargées des réacteurs 900 MW ont fait l'objet d'un traitement pour récupération des capsules de californium et ne sont donc pas considérées comme des déchets (elles ne sont donc pas considérées dans l'inventaire). La masse totale de déchets à conditionner est inférieure à deux tonnes.

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

Par ailleurs, plusieurs autres milliers de sources scellées sont aujourd'hui entreposées dans différentes installations. Elles couvrent une très large gamme d'isotopes radioactifs, d'activités et de périodes variables. Pour l'étude, il a été retenu de prendre en compte l'ensemble des sources de période supérieure ou égale à celle du césium 137 (période égale à 30 ans), en cohérence avec le domaine de déchets acceptés en stockage de surface au centre de l'Aube. L'hypothèse de conditionnement envisagée au stade actuel est une cimentation des sources dans des fûts de type EIP (colis type B7.3).

● Colis type B8

Le colis type B8 regroupe différents types de déchets comprenant des sulfates de plomb radifères, des objets au radium à usage médical (ORUM) et des paratonnerres. La prise en compte de ces déchets dans l'inventaire HAVL reste toutefois exploratoire.

Les sulfates de plomb radifères (colis type B8.1) proviennent du traitement de minerai d'uranium dans l'usine du Bouchet. Les déchets ont été mis initialement dans des fûts métalliques ; ces derniers ont fait l'objet de reconditionnements successifs, en vue de leur entreposage. Pour les études, l'hypothèse retenue est la reprise des fûts primaires de sulfates de plomb radifères pour un conditionnement dans des fûts de type EIP. On notera que les modalités de limitation des volumes vides résiduels à l'intérieur des colis primaires n'ont pas été définies à ce stade.

Les paratonnerres (colis type B8.2) sont des objets contenant soit du radium, soit de l'américium. Le conditionnement retenu, déjà appliqué à quelques paratonnerres au radium, est un compactage, puis une cimentation des têtes des paratonnerres dans des conteneurs en acier non allié de 870 litres. Les colis contiennent en moyenne environ 200 têtes de paratonnerres, de type radium ou de type américium, et ont une activité de l'ordre de 10 gigabecquerels (GBq).

Les ORUM (colis type B8.3) sont des aiguilles et tubes métalliques de très petites dimensions, contenant chacun quelques milligrammes de radium. Le radium est incorporé sous une forme chimique solide et insoluble mais pulvérulente (sulfate ou chlorure). L'histoire de l'industrie du radium montre qu'une centaine de grammes de radium a été extraite, dont une cinquantaine de grammes utilisée pour la fabrication d'ORUM. On notera que les ORUM (5000 objets au total) peuvent tous être conditionnés dans un seul fût EIP.

2.1.4.2 Colis types primaires de déchets C vitrifiés

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

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

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

Ainsi, il a été retenu de distinguer plusieurs ensembles de colis de déchets C vitrifiés regroupant respectivement (i) les productions de verres plus anciennes (colis type C0), (ii) les productions de verres actuelles ou envisagées à court terme (colis types C1 et C2), (iii) les productions de verres prévisionnelles, comprenant des verres UOx/MOX et des verres UOx avec une hypothèse d'incorporation d'une faible fraction de plutonium (respectivement, colis types C3 et C4).

● Colis type C0

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

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

Les colis PIVER (colis type C0.1), produits entre 1969 et 1981, sont composés en majorité de verres UNGG. Le déchet vitrifié est conditionné dans des conteneurs en acier inoxydable de même diamètre, mais de hauteurs différentes.

Les colis de verres UMo (colis type C0.2) correspondent au conditionnement futur de solutions de produits de fission existantes ; ces dernières sont issues de combustibles UNGG retraités dans l'usine UP2-400 de COGEMA La Hague. La nature chimique des solutions nécessite le développement d'une formulation de verre spécifique et des adaptations des équipements du procédé, notamment pour ce qui concerne le four de vitrification. Suivant les hypothèses retenues, la masse moyenne de déchet conditionné est de 400 kilogrammes par colis. Ces déchets seront conditionnés dans un conteneur en acier inoxydable identique à celui utilisé aujourd'hui dans les ateliers de vitrification R7 et T7 de COGEMA La Hague. Ce conteneur, dénommé Conteneur Standard de Déchets Vitrifiés (CSD-V), est présenté à la Figure 2.1-6.



Figure 2.1-6 Conteneur Standard de Déchets Vitriifiés (CSD-V)

Les colis de verres AVM (colis type C0.3) regroupent l'ensemble des déchets vitriifiés produits depuis 1978 dans l'atelier de vitrification de COGEMA à Marcoule. Comme cela a été indiqué plus haut, les solutions vitriifiées proviennent en majorité des combustibles UNGG retraités dans l'usine UP1 du site. On notera l'existence de quatre formulations différentes de verre mises en œuvre pour une ou plusieurs campagnes de vitrification. Le déchet vitriifié est conditionné dans un conteneur en acier inoxydable.

- **Colis types C1 et C2**

Ces colis contiennent des solutions de produits de fission issues du retraitement de combustibles REP UOx/URE dans les usines de COGEMA La Hague, conditionnées sous forme de verre dans un conteneur CSD-V (voir Figure 2.1-6). La production et le conditionnement des déchets sont supposés intervenir après une durée moyenne d'entreposage des combustibles de 8 ans, après leur déchargement des réacteurs. La masse de déchets conditionnés est en moyenne de 400 kilogrammes par colis.

Le colis type C1 correspond, d'un point de vue thermique, aux productions industrielles actuelles. Suivant les hypothèses retenues, le déchet vitriifié est constitué d'un mélange de solutions de produits de fission issues de combustibles UOx1 (taux de combustion moyen de 33 GWj/t), UOx2/URE (taux de combustion moyen de 45GWj/t) et UOx3 (taux de combustion moyen de 55 GWj/t).

Le colis type C2 correspond à des colis de puissance thermique légèrement accrue. Le déchet vitriifié est constitué d'un mélange de solutions de produits de fission issues de combustibles UOx2/URE et UOx3, dont les taux de combustion moyens sont, comme précédemment, de 45 GWj/t et 55 GWj/t respectivement.

- **Colis types C3 et C4**

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

Le colis type C3 décrit des verres résultant du conditionnement de solutions de produits de fission issues de combustibles UOx et MOX. Ils sont définis comme étant constitués d'un mélange de 15 % de MOX et de 85 % d'UOx2.

Le colis type C4 décrit des déchets vitrifiés issus du retraitement de combustibles UO_x et qui contiendrait une faible charge supplémentaire en plutonium. Le taux d'incorporation du plutonium dans le verre est fixé à un pour cent massique, soit environ 4 kilogrammes par colis. Le plutonium incorporé provient de combustibles UO₂.

2.1.5 Le cas des combustibles usés

Les combustibles usés pris en compte dans l'étude sont des combustibles issus du parc de réacteurs REP ainsi que des combustibles issus de filières arrêtées et de réacteurs de recherche (UNGG, EL4), des combustibles issus des activités de la défense nationale. On rappelle que ceux-ci sont pris en compte dans l'étude dans le cas où ils seraient considérés comme des déchets, supposant un arrêt du traitement, ce qui n'est pas la stratégie actuellement retenue en France.

Dans le cadre du scénario S2, les combustibles REP sont majoritaires en nombre d'assemblages. Les typologies de combustibles considérées (voir paragraphe 2.1.3) sont : l'UO₂ et l'URE (45 GWj/t), l'UO₃ (55 GWj/t) et le MOX (48 GWj/t).

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

● Colis types CU1 et CU2

L'assemblage combustible de référence correspond à un assemblage de conception FRAGEMA « avancée de deuxième génération » à tubes-guides épaissis et à gainage en alliage de zirconium. Il est représenté à la Figure 2.1-7. Il porte la désignation AFA-2GE pour les réacteurs REP 900 MWe et AFA-2LE pour les réacteurs REP 1300 MWe et 1450 MWe.

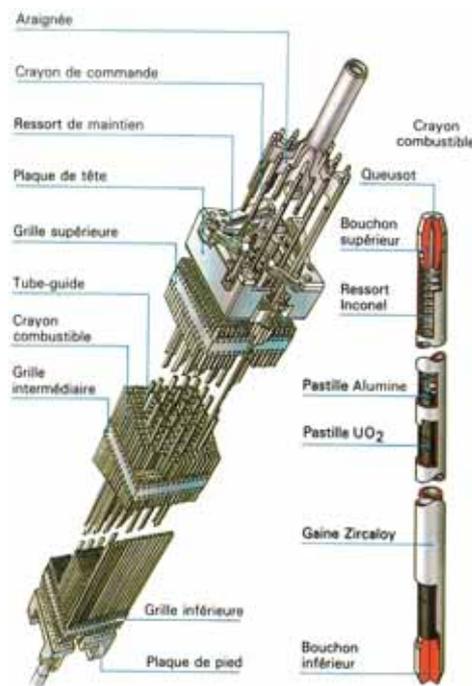


Figure 2.1-7 Assemblage combustible REP

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

Le crayon combustible est constitué :

- d'une gaine métallique cylindrique fermée en parties haute et basse par deux bouchons soudés (le bouchon supérieur présente un queusot, obturé après remplissage du crayon en hélium) ;
- d'un empilement de pastilles combustibles sur environ 95 % de la hauteur du crayon ;
- d'un ressort hélicoïdal en partie supérieure de l'empilement des pastilles combustibles assurant son maintien axial lors des manutentions.

Le colis type CU1 correspond aux combustibles à l'oxyde d'uranium enrichi (UOx) ou à l'oxyde d'uranium de retraitement enrichi (URE). Le colis type CU2 correspond aux combustibles mixtes oxydes d'uranium et de plutonium (MOX).

● Colis type CU3

Les combustibles regroupés dans le colis type CU3 sont de natures assez diverses. Ils comprennent (i) des combustibles issus de réacteurs UNGG, (ii) des combustibles issus du réacteur à eau lourde EL4, (iii) des éléments combustibles issus des réacteurs Célestin implantés à Marcoule et (iv) des combustibles de la propulsion nucléaire provenant de réacteurs à terre ou embarqués dans des navires.

Les combustibles UNGG correspondent à un tonnage résiduel de combustibles non traités, d'environ 15 tonnes. Ils sont conditionnés dans des étuis cylindriques de diamètre 88 mm ou 130 mm et de hauteur égale à 655,5 mm.

Les combustibles EL4 représentent environ 50 tonnes de métal lourd. L'élément combustible se présente sous la forme d'une grappe composée de 19 crayons enserrés dans une structure en ATR (alliage de zirconium avec du cuivre et du molybdène).

Ces deux premiers types de combustibles composent le colis type CU3.1, décliné en CU3.1.1 (combustibles UNGG) et CU3.1.2 (combustibles EL4).

Les éléments combustibles Célestin (colis type CU3.2) sont constitués de plaques métalliques contenant de l'uranium enrichi, montées sur une structure métallique. Ils sont conditionnés dans des étuis en acier inoxydable d'environ 340 mm de diamètre et 1 100 mm de longueur.

Les combustibles de la propulsion nucléaire (colis type CU3.3 décliné en colis types CU3.3.1 à CU3.3.6) sont constitués (i) de combustibles oxydes à base de plaquettes d'oxyde fritté d'uranium, (ii) de combustibles métalliques à base d'uranium métallique très enrichi. Ces derniers combustibles ne sont plus utilisés.

Dans les deux cas, le combustible se présente sous la forme d'un assemblage composé de plusieurs faisceaux. Ces derniers sont séparés de l'assemblage et conditionnés dans des étuis de même diamètre (340 mm environ, comme les étuis contenant des éléments combustibles Célestin) mais de longueurs variables, adaptées aux dimensions des faisceaux.

2.1.6 Nombre et volumes de colis primaires pris en compte

Dans le cadre donné par les scénarios présentés précédemment (voir paragraphe 2.1.3), la quantification du nombre de colis types s'appuie sur les inventaires et les prévisions de production de déchets établies par les producteurs, évaluées par l'Andra sur la base des données produites.

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

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

Les nombres et volumes de colis pris en compte dans les études, pour les déchets B, sont présentés au Tableau 2.1-4 et au Tableau 2.1-5.

Les nombres et volumes de colis types C sont donnés au Tableau 2.1-6.

Les données quantitatives relatives aux combustibles usés REP (colis types CU1 et CU2) sont fournies au Tableau 2.1-7. Par ailleurs, le nombre d'étuis primaires considérés pour les combustibles de type CU3, le cas échéant est de 5 810.

Les volumes indiqués dans les tableaux correspondent aux volumes de déchets conditionnés avec les hypothèses formulées ci-dessus.

Colis type	Sites de production	Scénario S1a		Scénario S1b		Scénario S1c		Scénario S2	
		Nombre	Volume (m ³)						
B1	EDF	2 560	470						
B2	COGEMA La Hague	42 000	10 000	42 000	10 000	42 000	10 000	42 000	10 000
	COGEMA Marcoule	62 990	26 060	62 990	26 060	62 990	26 060	62 990	26 060
Total B2		104 990	36 060						
B3	CEA	15 060	13 370	15 060	13 370	15 060	13 370	15 060	13 370
	COGEMA La Hague	9 890	10 470	9 890	10 470	9 890	10 470	7 340	7 750
	COGEMA Marcoule	7990	3420	7990	3420	7990	3420	7990	3420
Total B3		32 940	27 260	32 940	27 260	32 940	27 260	30 390	24 540
B4	COGEMA La Hague	1 520	2 730						
B5	COGEMA La Hague	42 600	7 790	39 900	7 300	39 900	7 300	13 600	2 490
B6	COGEMA Marcoule	10 810	4 580						
B7	EDF/CEA/Andra	3 045	1 440						
B8	CEA Andra	1 350	775						

Tableau 2.1-4

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

Colis type	Scénario S1a		Scénario S1b		Scénario S1c		Scénario S2	
	Nombre	Volume (m ³)						
B2.1	46 930	11 210	46 930	11 210	46 930	11 210	46 930	11 210
B2.2	58060	24 850	58 060	24 850	58 060	24 850	58 060	24 850
Total B2	104 990	36 060						
B3.1.1	90	90	90	90	90	90	90	90
B3.1.2	8 690	10 250	8 690	10 250	8 690	10 250	6 440	7 590
B3.1.3	180	690	180	690	180	690	180	690
Total B3.1	8 960	11 030	8 960	11 030	8 960	11 030	6 710	8 370
B3.2.1	5 730	2 800	5 730	2 800	5 730	2 800	5 730	2 800
B3.2.2	1 260	1 490	1 260	1 490	1 260	1 490	1 260	1 490
Total B3.2	6 990	4 290						
B3.3.1	1 200	220	1 200	220	1 200	220	900	160
B3.3.2	7 990	3 420	7 990	3 420	7 990	3 420	7 990	3 420
B3.3.3	1 700	850	1 700	850	1 700	850	1 700	850
B3.3.4	6 100	7 450	6 100	7 450	6 100	7 450	6 100	7 450
Total B3.3	16 990	11 940	16 990	11 940	16 990	11 940	16 690	11 880
Total B3	32 940	27 260	32 940	27 260	32 940	27 260	30 390	24 540
B5.1	7 940	1 450	7 400	1 350	7 400	1 350	2 140	390
B5.2	31 760	5 810	29 600	5 420	29 600	5 420	8 560	1 570
B5.3	2 500	460	2 500	460	2 500	460	2 500	460
B5.4	400	70	400	70	400	70	400	70
Total B5	42 600	7 790	39 900	7 300	39 900	7 300	13 600	2 490
B6.1	180	30	180	30	180	30	180	30
B6.2	930	400	930	400	930	400	930	400
B6.3	7 550	3 230	7 550	3 230	7 550	3 230	7 550	3 230
B6.4	1 200	510	1 200	510	1 200	510	1 200	510
B6.5	950	410	950	410	950	410	950	410
Total B6	10 810	4 580						
B7.1	41	155	41	155	41	155	41	155
B7.2	4	0,7	4	0,7	4	0,7	4	0,7
B7.3	3 000	1 285	3 000	1 285	3 000	1 285	3 000	1 285
Total B7	3 045	1 440						
B8.1	1 100	470	1 100	470	1 100	470	1 100	470
B8.2	250	305	250	305	250	305	250	305
B8.3	1	0,4	1	0,4	1	0,4	1	0,4
Total B8	1 350	775						

Tableau 2.1-5

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

Colis type	Sites de production	Scénario S1a		Scénario S1b		Scénario S1c		Scénario S2	
		Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)
C0.1	CEA	180	10	180	10	180	10	180	10
C0.2	COGEMA La Hague	800	140	800	140	800	140	800	140
C0.3	COGEMA Marcoule	3 140	550	3 140	550	3 140	550	3 140	550
Total C0		4 120	700	4 120	700	4 120	700	4 120	700
C1	COGEMA La Hague	4 640	810	4 640	810	3 8350	6 710	4 640	810
C2	COGEMA La Hague	990	170	27 460	4 810	0	0	5 920	1 040
C3	COGEMA La Hague	13 320	2 330	0	0	0	0	0	0
C4	COGEMA La Hague	13 250	2 320	0	0	0	0	0	0

Tableau 2.1-6 Données quantitatives globales, en nombres et volumes de colis, pour les colis types de déchets C

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

Tableau 2.1-7 Nombre d'assemblages combustibles REP

2.1.7 Inventaire radiologique pris en compte

L'inventaire radiologique des colis porte sur une large liste de radionucléides comprenant des produits de fission (PF) et d'activation (PA), et des actinides à haute activité et à vie longue. Il est décrit dans le document « Référentiel de connaissances et modèle d'inventaire des colis de déchets » [18].

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

- 44 radionucléides (31 %), à vie courte, avec une période radioactive n'excédant pas 6 ans,
- 16 radionucléides (11 %), à vie moyenne, avec une période radioactive comprise entre 7 et 30 ans,
- 84 radionucléides (58 %), à vie longue⁹, avec une période radioactive supérieure à 31 ans.

⁹ Le nickel 63 constitue un cas particulier de par sa période radioactive (100 ans) et son caractère de produit d'activation. Il est présent à un niveau d'activité élevé dans un grand nombre de colis. Son activité dans les premiers siècles est particulièrement élevée, voire dominante, par rapport à celle des autres PA/PF à vie longue, dans les colis types B, en particulier les colis B1, B4, B5 (sauf B5.4) et B6.2. L'activité du nickel 63 est comparativement plus réduite dans les colis C et les combustibles, du fait de la prédominance des produits de fission. Le Nickel 63 est donc présenté à part dans l'inventaire radiologique.

La Figure 2.1-8 et la Figure 2.1-9 synthétisent l'inventaire radiologique pris en compte dans les études de sûreté.

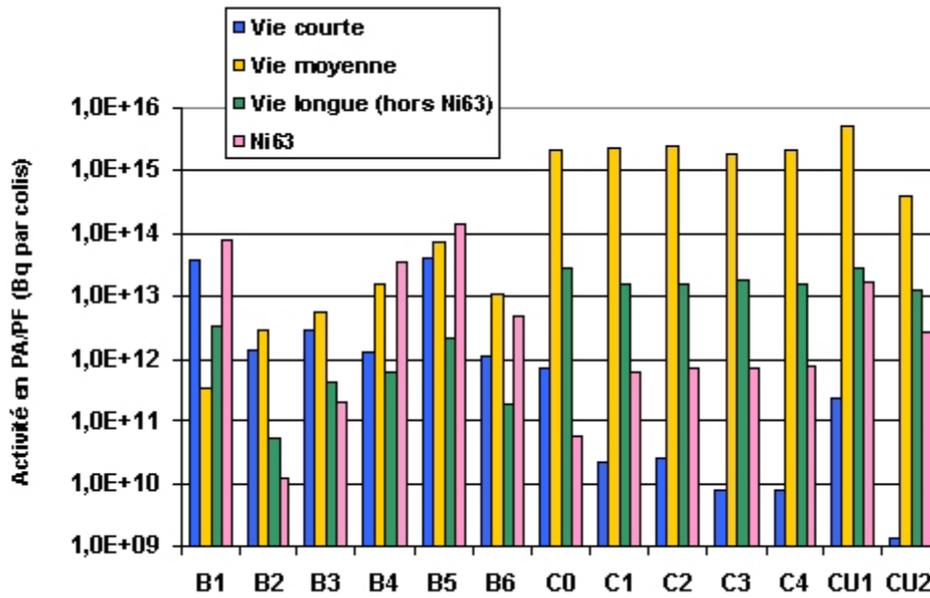


Figure 2.1-8

Activité en PA/PF des différents colis types

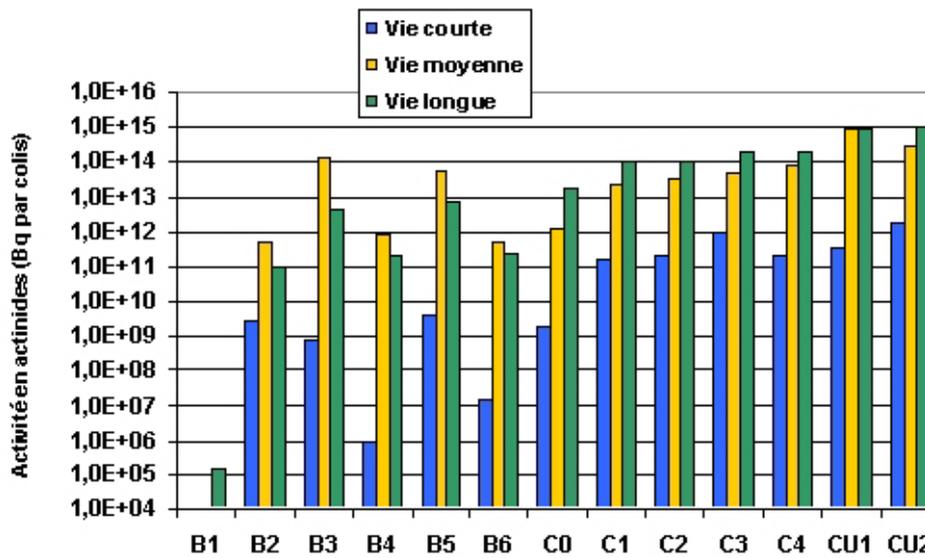


Figure 2.1-9

Activité en actinides des différents colis types

2.2 Le contexte géologique du site de Meuse / Haute Marne

Ce paragraphe est un résumé d'éléments contenus dans le tome « évolution phénoménologique du stockage géologique » [7]. Le lecteur intéressé par une description fine du contexte géologique est invité à se référer à ce tome, ou au référentiel de site [17]. Cette section introduit de manière synthétique le contexte géologique du site de Meuse / Haute-Marne.

2.2.1 Présentation générale du secteur étudié

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

Dans le détail (voir Figure 2.2-1), la série sédimentaire concernée plus particulièrement par cette étude est constituée, de bas en haut (et d'est en ouest aux affleurements), par :

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

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

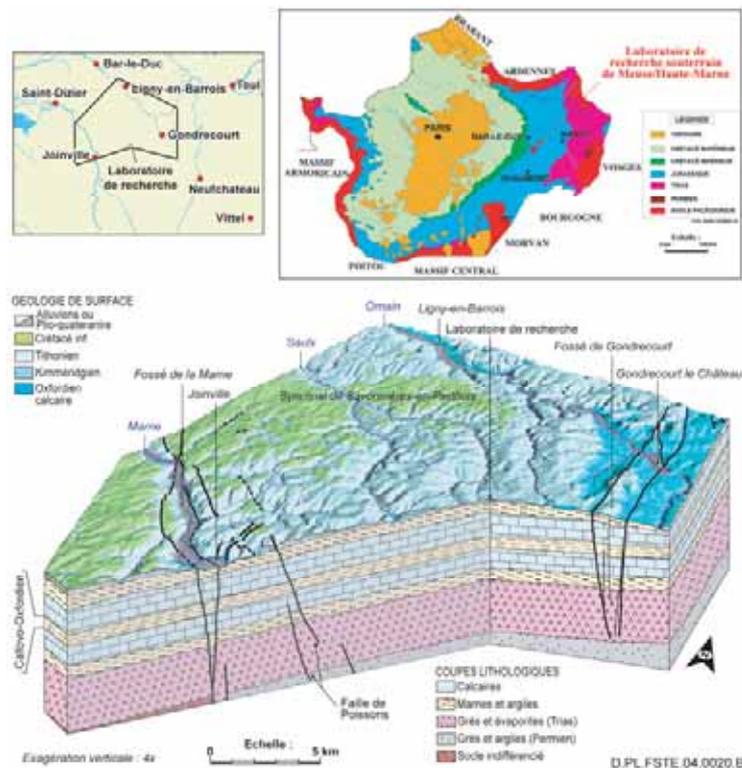


Figure 2.2-1

Bloc diagramme géologique 3D du site de Meuse / Haute-Marne

2.2.2 La formation hôte

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

Dans une zone d'environ 200 kilomètres carrés définie à partir du site du laboratoire de recherche souterrain, la formation du Callovo-Oxfordien présente des caractéristiques physiques et chimiques transposables ou similaires par rapport à celles observées sur le site du laboratoire, on parle de zone de transposition.

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

Verticalement, les proportions des phases minéralogiques principales varient et s'organisent en trois séquences sédimentaires¹⁰. La séquence supérieure se caractérise par une teneur en carbonates plus élevée.

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

La zone de transposition est située à l'écart des failles régionales, comme le fossé de la Marne au sud-ouest. En particulier, aucune faille n'y a été mise en évidence dans le Callovo-Oxfordien et les horizons sus-jacents.

2.2.2.1 L'évolution de la formation depuis son dépôt

Entre la fin de son dépôt et la fin du Jurassique (de -150 à -135 millions d'années), la couche d'argilites est recouverte par au moins 500 mètres de sédiments. Elle subit ensuite différents processus successifs, dits diagénetiques. Le premier de ces processus est la compaction progressive des sédiments, avec expulsion d'eau, sous le poids des dépôts ultérieurs. Interviennent ensuite des modifications physico-chimiques (dissolutions et précipitations minérales) pilotées par les augmentations de pression et de température liées à l'enfouissement ainsi que par la circulation des fluides. Ces processus n'ont eu que peu d'impact sur la couche durant la période étant données les profondeurs atteintes à la fin du Jurassique (5 à 600 mètres).

Par la suite, les grands événements de l'histoire géologique de la fin du Crétacé (retrait de la mer), puis du Tertiaire (phase pyrénéenne, distension oligocène puis phase alpine) ont peu d'effets sur la formation. Ses caractéristiques actuelles sont acquises pour l'essentiel durant le Crétacé, ainsi que le suggère la datation du dernier épisode diagénetique (antérieur à 100 millions d'années). Cet épisode, de faible intensité, a concerné certains échanges entre argiles et carbonates dans de très petits volumes de roche. Les phases initiales et notamment les minéraux argileux n'ont pas été affectés par des modifications majeures de leur cristallogénèse et de leur texture.

Le Callovo-Oxfordien apparaît donc comme une formation géologique formée il y a 155 millions d'années dans un contexte stable. Les transformations minéralogiques postérieures au dépôt de la couche sont des processus limités dans l'espace et précoces, antérieurs à 100 millions d'années, affectant essentiellement les ciments carbonatés. L'évolution thermique modérée de la couche durant son histoire n'a pas permis d'initier de transformations minéralogiques des phases argileuses (illitisation notamment).

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

2.2.2.2 Les propriétés texturales et la porosité

Le volume poreux est conditionné par l'arrangement des trois principales phases minérales :

- les phases argileuses (majoritaires – 60 % au maximum) se présentent sous forme d'agrégats de minéraux argileux (plaquettes de formes plus ou moins régulières) de taille de l'ordre de plusieurs dizaines à la centaine de micromètres de longueur et de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur. Ces agrégats jouent le rôle de matrice et s'organisent grossièrement, selon la stratification ;
- les éléments détritiques quartzeux, de petites tailles (5 à 10 micromètres) sont répartis de manière homogène dans cette matrice ;
- la phase carbonatée se présente sous forme d'éléments de tailles variables, parfois assez gros (jusqu'à millimétriques) correspondant à des bioclastes et des cristaux automorphes résultant de néoformations secondaires à la suite des phénomènes diagénétiques.

Etant données les proportions relatives des phases argileuses et des autres éléments, ces derniers ne sont pas jointifs et apparaissent dispersés au sein de la matrice.

Cet arrangement détermine dans la roche deux types de porosités :

- la porosité interne à la matrice argileuse (autour des agrégats et des particules d'argiles) qui concerne les tailles de pores infra micrométriques, correspondant à la méso- et à la microporosité (90 % du volume poreux) ;
- la porosité à l'interface entre la matrice argileuse et les particules quartzeuses et les bioclastes qui concerne des tailles de pores micrométriques et des tailles de pores infra micrométriques pour les carbonates néoformés, correspondant à la macroporosité (10 % du volume poreux).

Le volume poreux total ainsi défini est de l'ordre de 18 % du volume total de la roche. Cette porosité induit une tortuosité importante, liée à l'arrangement des agrégats argileux entre eux.

Une représentation schématique de la texture et de la porosité du Callovo-Oxfordien est donnée en Figure 2.2-2.

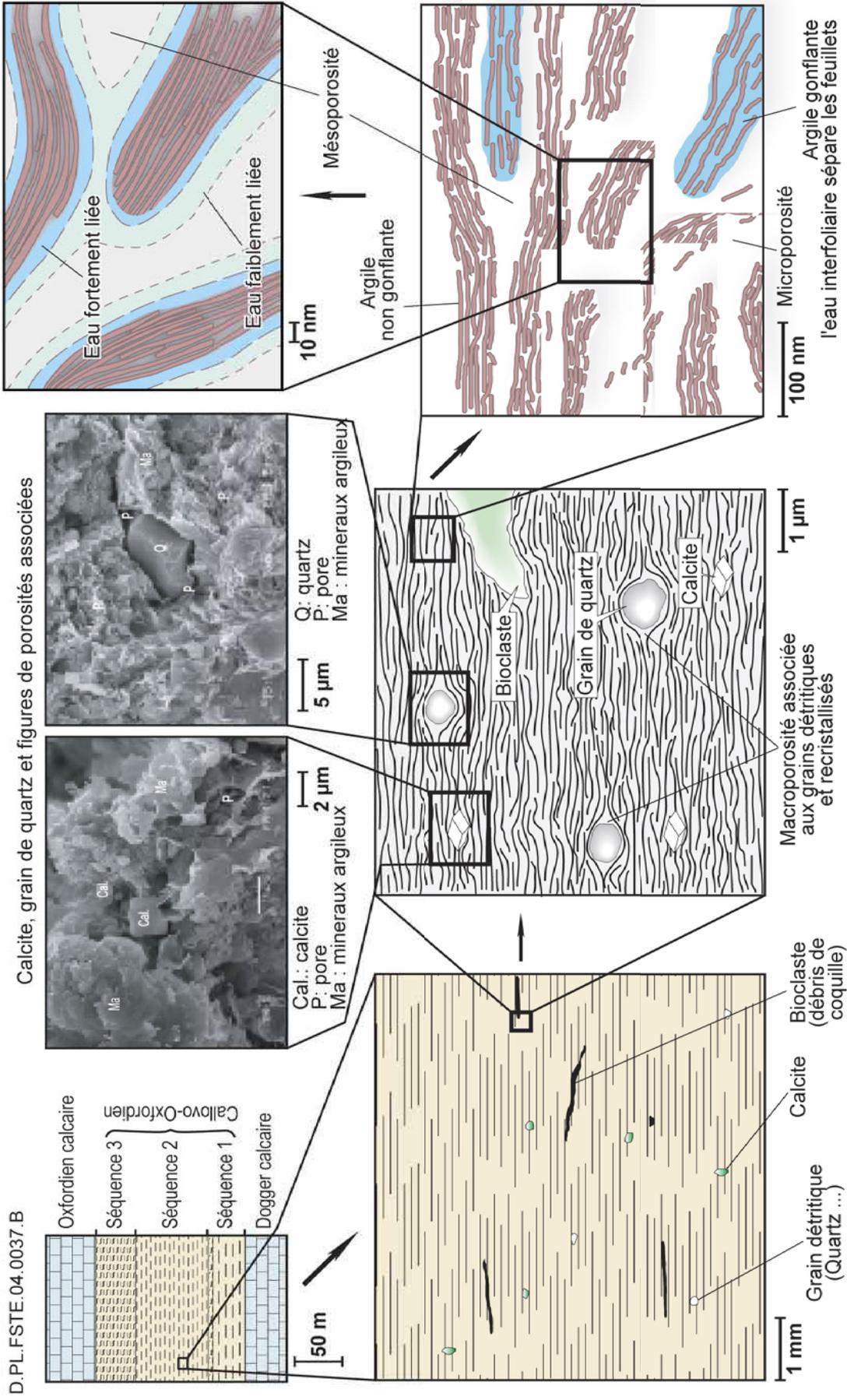


Figure 2.2-2 Schématisation de la texture et de la porosité du Callovo-Oxfordien

2.2.2.3 Le statut de l'eau et les écoulements dans le Callovo-Oxfordien

D'une manière générale, l'eau se structure (*i.e.* s'organise en réseau) au voisinage des surfaces minérales et plus particulièrement près de celles portant une charge électrique résiduelle. Dans un milieu poreux, on définit ainsi une eau liée, et donc non mobile, et une eau libre, non affectée par cet effet.

Les particules d'argiles portent une charge permanente et ont donc un effet important sur la structuration de l'eau à leur voisinage, contrairement au quartz ou aux carbonates, qui présentent des charges permanentes de surface beaucoup plus faibles.

Autour des particules argileuses, il en résulte un film d'eau liée, qui peut boucher certains pores (« goulet électrochimique »). Pour un sédiment tel que les argilites du Callovo-Oxfordien, la taille des pores ainsi obstrués par ce « goulet électrochimique » est de l'ordre de 10 nanomètres. La porosité de la roche se distribuant essentiellement dans la matrice argileuse, la proportion d'eau liée, au contact des particules, est importante. Elle correspond à environ 50 % de l'eau contenue dans la porosité totale. Cette eau liée ne participe pas aux écoulements au sein de la roche.

Ces propriétés texturales confèrent aux argilites du Callovo-Oxfordien une faible perméabilité sur toute son épaisseur.

Les vitesses liées aux écoulements sont dans le détail assez différentes, du fait de la structure porale du milieu. De même, certains pores ne sont pas connectés et ne peuvent participer à cet écoulement. Aussi, on définit une porosité dite cinématique, qui est une fraction de la porosité totale, permettant, macroscopiquement, de calculer une vitesse moyenne de l'eau dans la direction du gradient de charge. Pour le Callovo-Oxfordien, cette porosité cinématique correspond à la fraction d'eau libre dans la roche, soit 9 % environ, correspondant à la moitié de la porosité totale.

2.2.2.4 La composition chimique de l'eau interstitielle dans le Callovo-Oxfordien.

La faible teneur en eau de la formation, 7 à 8 % en pondéral, ainsi que sa faible perméabilité, ne permettent pas d'analyser directement la composition des eaux porales. Celle-ci a été déterminée à partir d'analyses sur échantillons du Callovo-Oxfordien et de modélisations géochimiques. Cette composition est considérée homogène sur toute l'épaisseur de la formation, en cohérence avec l'homogénéité lithologique globale de celle-ci. Les compositions des eaux ainsi évaluées montrent un pH neutre (légèrement supérieur à 7). Elles sont réductrices, comme le montre la présence de pyrite et de matière organique. Chimiquement, les eaux présentent un caractère calco-sodique carbonaté. Les analyses des isotopes stables de l'eau, confirmées par celles réalisées sur les gaz (H₂O et CO₂) dissous, montrent que celle-ci a clairement une origine météorique. Cette eau aurait donc remplacé l'eau au cours de processus très anciens. En revanche, les données sur les isotopes stables du carbone démontrent l'équilibre chimique et isotopique des eaux interstitielles avec les phases carbonatées. Les eaux sont également sulfatées et chlorurées (la chlorinité étant déterminée analytiquement). Les autres éléments (cations majeurs et silicium) sont contrôlés par les différentes phases minérales.

Les concentrations de certaines espèces mobiles (chlore notamment) varient sur l'épaisseur de la couche (entre 1 000 et 500 mg/l, de bas en haut pour le Cl, à l'aplomb du site), traduisant un échange de ces espèces entre le Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes. À l'échelle du secteur, ces profils montrent :

- un contrôle du profil de salinité dans le Callovo-Oxfordien par la salinité du Dogger (sensiblement plus forte au Nord-Est qu'au Sud-Ouest),
- des salinités basses de l'Oxfordien carbonaté, contrastant avec celle du Callovo-Oxfordien et du Dogger.

2.2.3 Les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien

Les deux encaissants carbonatés immédiatement sous- et sus-jacents au Callovo-Oxfordien, le Dogger et l'Oxfordien carbonaté, sont des ensembles calcaires, qui imposent les conditions aux limites, notamment hydrauliques et chimiques, de la couche du Callovo-Oxfordien.

2.2.3.1 Le Dogger

Le Dogger (voir Figure 2.2-3), reposant sur les argiles du Lias, est une formation de 300 mètres d'épaisseur. Il correspond, à l'échelle du Bassin de Paris, au développement de grandes plates-formes carbonatées, sous une très faible tranche d'eau, dans un environnement de type tropical. Ces conditions sont responsables de la grande variété de faciès observés (débris coquilliers, sables calcaires, récifs...) qui se déposent au gré des courants et des évolutions de la profondeur d'eau. Ces rapides variations se retrouvent tant latéralement que verticalement. Un intervalle plus argileux, présent partout dans l'est de la France (« Marnes de Longwy ») et séparant les deux ensembles calcaires du Bajocien et du Bathonien, marque un approfondissement relatif des conditions de dépôt. Au toit de la formation, la Dalle nacrée, très riche en débris coquilliers, marque le passage entre le Dogger et le Callovo-Oxfordien.

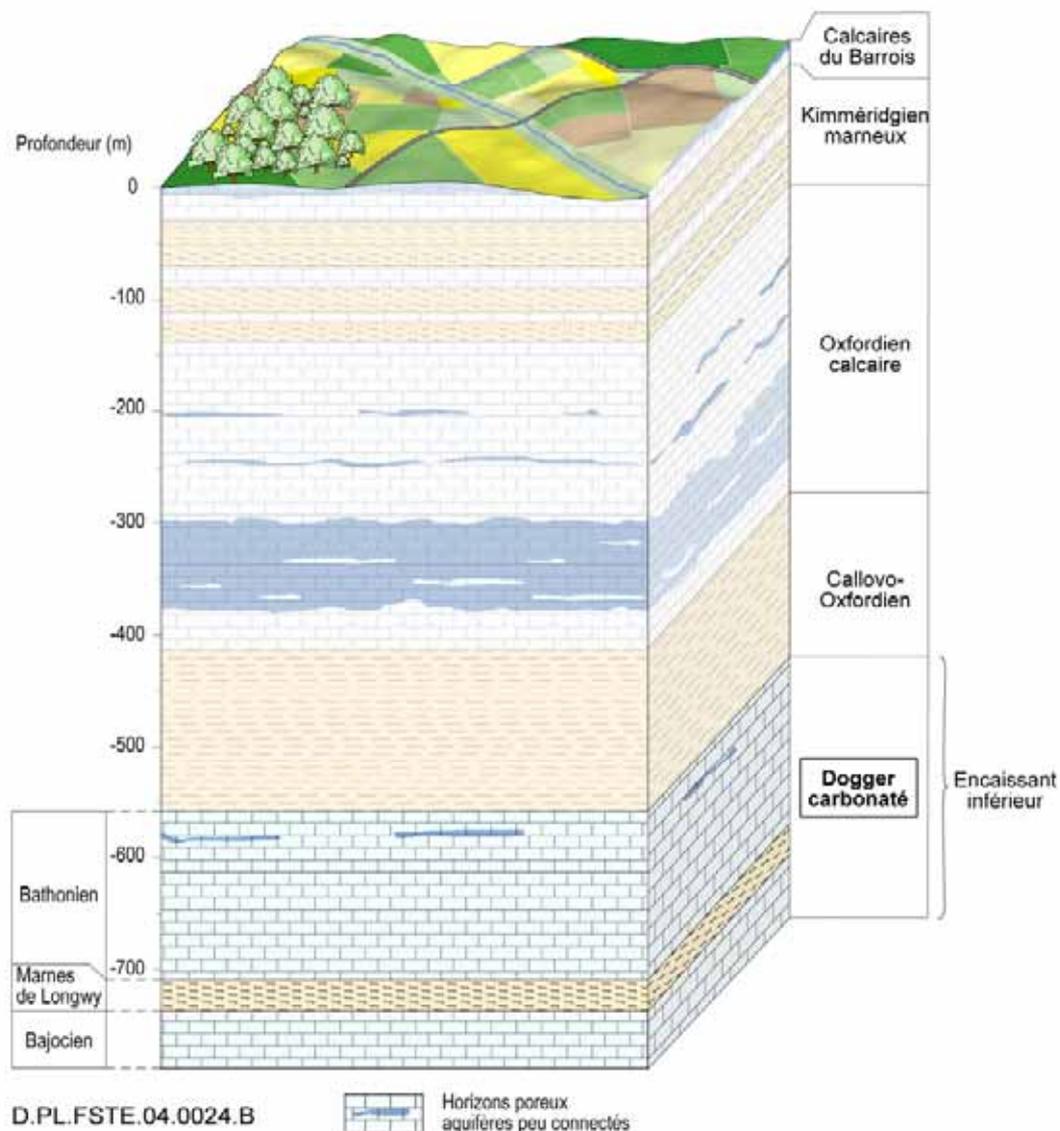


Figure 2.2-3

Représentation schématique des lithologies et des horizons poreux dans le Dogger carbonaté sur le site de Meuse / Haute-Marne

Juste après son dépôt, le Dogger a été soumis à un ensemble de processus diagénétiques qui vont contrôler des phases successives de dissolutions et de recristallisations de carbonates. Ces processus, classiques pour les formations carbonatées, s'inscrivent dans une évolution continue :

- les premières phases sont précoces et se déroulent pendant et juste après le dépôt du sédiment,
- les phases suivantes sont liées à l'enfouissement de la série,
- enfin les dernières phases concernent la dénudation des séries sédimentaires et leur retour à l'affleurement.

Le Dogger présente des faibles porosités (6 à 10 %) et des perméabilités globales du Dogger (de 10^{-10} à 10^{-9} m/s). Seules quelques zones d'extensions plurikilométriques, isolées au sein des calcaires compacts et indépendantes du faciès, présentent des porosités et des perméabilités sensiblement plus élevées (respectivement 15 % et 10^{-8} m/s). Les productivités de ces horizons poreux sont faibles : de l'ordre du litre par minute, voire inférieures. Les circulations profondes d'eau se font principalement au sein de ces derniers.

Les eaux du Dogger sont, à l'aplomb du site, à l'équilibre chimique avec la formation. Il s'agit d'eaux très minéralisées de type chlorurées-sulfatées-sodiques, montrant un pH neutre (légèrement supérieur à 7) et réductrices ; elles sont chimiquement proches de celles observées dans la même formation ailleurs dans le bassin. Ces eaux d'origine météorique (voir ci-dessus) montrent des temps de résidence longs (de l'ordre du million d'année dans le forage MSE101), ainsi que l'indiquent les approches menées à partir des gaz rares.

À l'échelle du bassin parisien, les rejeux successifs des failles régionales (faille de Bray notamment) semblent avoir facilité les transferts verticaux entre aquifères ainsi que le suggèrent différentes approches menées à partir de modélisation et de traceurs géochimiques et isotopiques.

À l'échelle de l'auréole orientale du Bassin de Paris les approches menées plus particulièrement à partir des isotopes de l'hélium montrent que les argiles du Lias, situés sous le Dogger et le séparant du Trias, isolent efficacement ces deux formations. Cela permet, dans les modélisations, de ne pas prendre en compte les formations sous-jacentes du Dogger. Dans ce cadre, les signatures isotopiques triasiques retrouvées dans les calcites de remplissage de fractures à proximité des accidents apparaissent bien comme un phénomène très localisé, et correspondant à des communications très limitées dans le temps. Ceci est illustré par les différences de salinité existant entre les aquifères : de l'ordre de la centaine de g/l pour le Trias à quelques g/l pour le Dogger. Les salinités du Dogger restent néanmoins élevées pour des eaux météoriques : elles semblent être acquises par diffusion du sel triasique au travers du Lias argileux. Ces échanges se font donc sur des échelles de temps longues, de plusieurs millions d'années.

2.2.3.2 L'Oxfordien carbonaté

Au-dessus du Callovo-Oxfordien, l'Oxfordien carbonaté (voir Figure 2.2-4) montre des conditions de dépôt assez semblables à celles du Dogger : il s'agit, sur une épaisseur d'environ 300 mètres, de la superposition de différentes plateformes carbonatées. Cependant, les environnements de dépôt sont sensiblement plus contrastés que pour le Dogger. À la place d'une vaste plate-forme à fleur d'eau, très étendue, il est possible de distinguer, pour chacune des plates-formes de l'Oxfordien carbonaté, des environnements bien distincts. Ainsi, les faciès les plus grossiers et correspondant à de faibles tranches d'eau au moment du dépôt (sables argileux, faciès de lagon, récifs...) sont globalement situés au Nord-Est du secteur (région de Commercy) alors qu'au Sud-Ouest, au-delà de Joinville, se développent des faciès de bassin plus argileux.

L'ensemble est affecté, sous couverture, par une diagenèse importante, à l'image de celle affectant le Dogger. Comme pour ce dernier, cette diagenèse est responsable d'une recristallisation plus intense au niveau du secteur que dans les autres endroits du Bassin Parisien, notamment dans les faciès granulaires. Ainsi, sur la totalité de la formation, les perméabilités globales sont faibles : de l'ordre de 10^{-9} m/s, soit deux ordres de grandeurs inférieures à celles mesurées plus au centre du bassin. Cependant, certains niveaux de l'Oxfordien carbonaté correspondant en majorité à des faciès fins

montrent des porosités et perméabilités plus fortes que dans le reste de la formation. Ces horizons dits « poreux » sont définis à l'aplomb du laboratoire souterrain et identifiés par une numérotation de 1 à 7, soit Hp1 à Hp7. Ils correspondent principalement à certains faciès bien précis (boue carbonatée de lagon, faciès inter-récifaux...), homogènes, pour lesquels une diagenèse « crayeuse » secondaire a transformé le faciès primaire en une micrite fine homogène, montrant une porosité élevée par rapport au reste de la formation. L'organisation de ces niveaux poreux est donc directement liée aux conditions initiales de dépôt des sédiments ce qui explique leur géométrie globale et leur corrélation avec la stratification ainsi que le montre les données de sismique 3D enregistrées sur le site. À cette échelle, ces données illustrent bien que la répartition des zones les plus poreuses peut cependant devenir irrégulière, expliquant ainsi les difficultés de corrélation de détail, sans toutefois modifier sensiblement les caractéristiques hydrodynamiques globales de la formation.

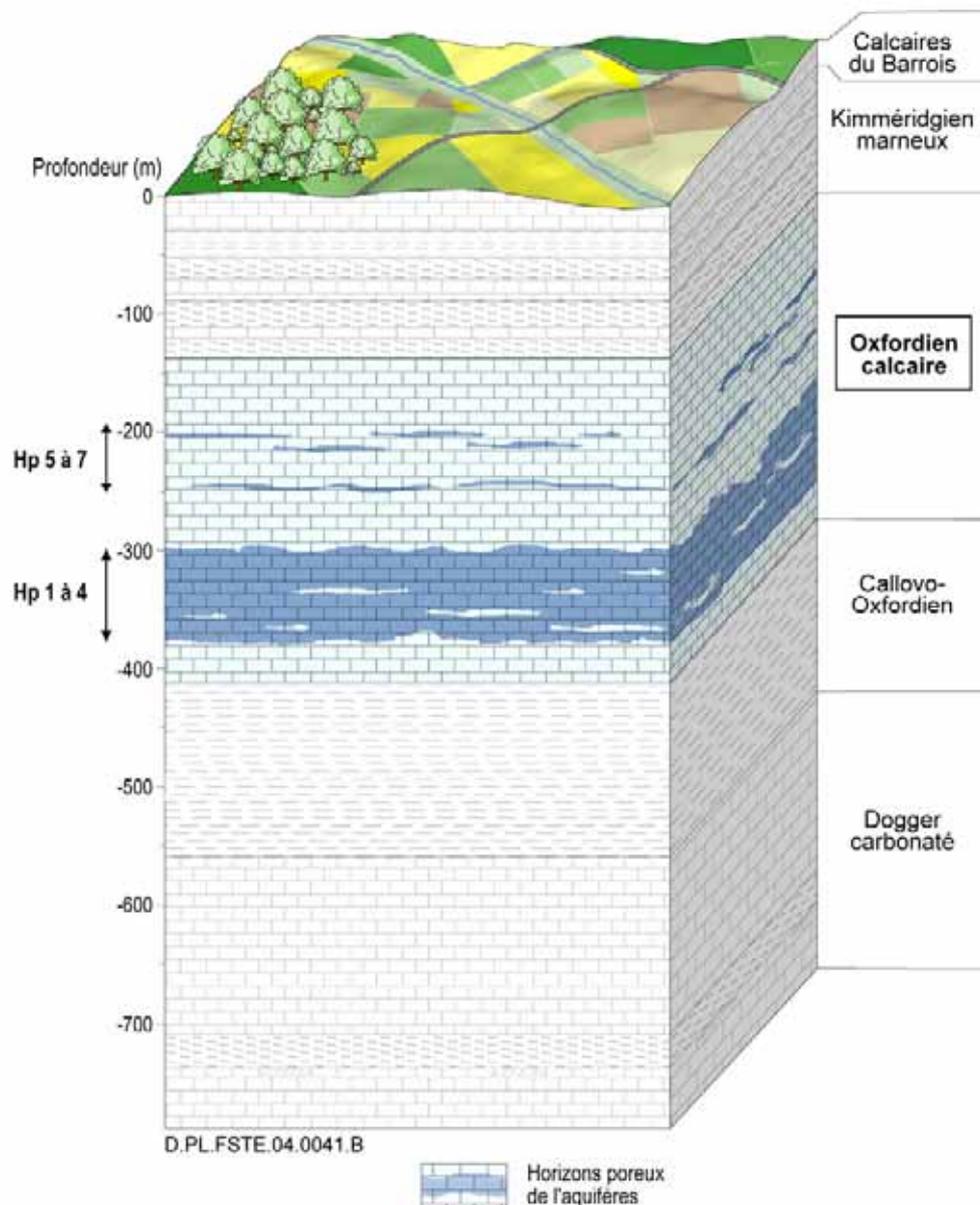


Figure 2.2-4

Représentation des niveaux poreux dans l'Oxfordien carbonaté à l'état actuel

On distingue, au-dessus de faciès correspondant à la mise en place de la première plate-forme carbonatée, très peu perméables et présents sur l'ensemble du secteur (faciès C3a/C3b : perméabilité de l'ordre de 1.10^{-11} m/s) :

- un ensemble d'horizons poreux (Hp1 à Hp4) reconnu dans toute la partie Nord-Ouest du secteur et correspondant en grande partie à des faciès de lagon. Ces horizons montrent des porosités de l'ordre de 20 % et des perméabilités de quelques 10^{-8} m/s. Ils s'individualisent au sein de calcaires plus compacts (porosités de 15 % et perméabilités de 1.10^{-9} m/s). À quelques kilomètres au Sud et à l'Ouest du site, les résultats des forages EST321 et EST351 montrent que le passage de ces faciès de lagon à des faciès de barrière recristallisés, puis, au-delà à des faciès argileux de bassin (région de Joinville) se traduit par la disparition de ces horizons poreux ;
- dans l'Oxfordien supérieur, des horizons poreux (Hp5 à Hp7), plus minces que Hp1 à Hp4, présents systématiquement, même s'ils ne sont pas continus à l'échelle du secteur.

C'est principalement au sein des horizons poreux que les circulations d'eaux se font en profondeur. Comme pour le Dogger, les écoulements régionaux sont globalement dirigés des zones d'alimentation que constituent les zones de plateaux au Sud et à l'Est du site, sur lesquelles la formation est karstifiée, vers le centre du bassin. Cependant, au droit du site, du fait de la proximité des affleurements, une partie de ces écoulements se dirige vers un point bas local, dans le cours de la Marne au Sud-Ouest. Ce point bas représente, pour les trajectoires passant à l'aplomb du site de Meuse / Haute-Marne, le seul exutoire actuel de l'aquifère de l'Oxfordien calcaire sur le secteur.

Une des conséquences de l'écoulement au sein d'horizons poreux bien différenciés dans l'Oxfordien carbonaté est une nette individualisation chimique, à l'aplomb du site, des eaux entre les horizons poreux inférieurs et les horizons poreux supérieurs :

- le faciès chimique des eaux des horizons inférieurs est sodique carbonaté ; elles sont réductrices, avec un pH neutre (7,5) ;
- le faciès des eaux des horizons supérieurs est magnésien carbonaté avec un pH de 7,5 également, mais elles montrent un caractère moins réducteur, voire faiblement oxydant.

Ces différences sont à relier à l'histoire géologique légèrement différente de ces deux ensembles, notamment vis-à-vis des environnements de dépôts, des paléocirculations et des processus diagénétiques.

2.2.3.3 Le Kimméridgien marneux et les calcaires du Barrois

Au-dessus de l'Oxfordien carbonaté, les marnes du Kimméridgien marquent un nouvel approfondissement des conditions de dépôt : les sédiments redeviennent plus argileux. Cette formation, de 110 mètres d'épaisseur à l'aplomb du site, est constituée de marnes avec des intercalations de calcaires argileux.

Les conditions de dépôt, à l'image du Callovo-Oxfordien, expliquent la grande constance des faciès et de l'épaisseur de cette couche à l'échelle régionale. Lorsqu'elle est à l'affleurement, sa perméabilité, initialement faible (de l'ordre de 10^{-11} à 10^{-12} m/s), augmente du fait des altérations de surface affectant plus spécifiquement les intervalles carbonatés.

Sous couverture, les eaux interstitielles du Kimméridgien montrent un faciès assez proche de celui des horizons supérieurs de l'Oxfordien carbonaté : eaux réductrices, de faciès bi-carbonaté magnésien et avec un pH de 7,5. À l'affleurement (ou sous couverture pour la partie au contact avec l'aquifère des Calcaires du Barrois), la formation est soumise à un environnement oxydant qui modifie profondément ce faciès (notamment, oxydation de la pyrite, avec production de sulfates et augmentation de la concentration en fer de la solution) et les eaux deviennent naturellement oxydantes. Ces marnes séparent la nappe aquifère des calcaires de l'Oxfordien de celle des Calcaires du Barrois.

Les calcaires du Barrois, qui sont à l'affleurement sur une grande partie du secteur, correspondent, à l'échelle du bassin de Paris, au retour des grandes plates-formes carbonatées à boues calcaires. La formation est épaisse de plus de 200 mètres lorsqu'elle est complète. La nature initiale du calcaire

(calcaires argileux, plus ou moins vacuolaires) et son évolution à l’affleurement sous l’action des eaux météoriques permettent de séparer cette formation en deux unités aux comportements bien distincts :

- une unité de base (représentative des environs du laboratoire) d’une épaisseur d’une trentaine de mètres dans laquelle les développements karstiques sont limités ;
- une unité supérieure dans laquelle les karsts sont fréquents. Ils sont d’autant plus développés que du Crétacé argilo-sableux est préservé au-dessus de la formation.

Quelle que soit l’unité considérée, les écoulements dans cet aquifère de surface fluctuent rapidement avec la pluviométrie. Les transferts, globalement en direction du Nord-Ouest, y sont rapides (plusieurs centaines à milliers de mètres par jour). Du fait de la recharge rapide de la nappe par les eaux météoriques, les eaux de formation sont oxydantes et montrent un faciès bicarbonaté calcique, plus ou moins chloruré.

2.2.4 Evolution géoprospective

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

2.2.4.1 Évolution climatique

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

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

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

2.2.4.2 Stabilité géodynamique à long terme

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

La convergence actuelle entre la plaque africaine et la plaque européenne est faible, de l’ordre de quelques millimètres au centimètre par an. L’essentiel de ce mouvement est absorbé par la déformation se produisant dans les zones montagneuses (Maghreb et Alpes à la latitude de la France). Le reste des mouvements est absorbé par les glissements le long des grandes failles de la plaque : c’est le cas notamment du rift ouest-européen. Hors de ces zones, les mouvements possibles sont très faibles et ne concernent que les failles régionales qui affectent le socle (failles de la Marne et de Vittel par exemple). Sur ces failles, le glissement possible est extrêmement lent, estimé entre 0,001 et 0,0001 mm/an, selon l’importance de la faille.

Ces considérations expliquent pourquoi le bassin de Paris est une région à très faible sismicité, à l’écart des zones actives situées sur ses bordures (fossé rhénan notamment).

Dans ce domaine intra-plaque, le secteur de Meuse / Haute-Marne apparaît comme une zone remarquable de la plaque ouest européenne. La lithosphère y présente une épaisseur uniforme, contrastant avec les régions plus orientales, notamment au fossé rhénan (voir Figure 2.2-5). Cette uniformité est caractéristique des zones stables et peu déformées. La zone apparaît asismique, tant vis-à-vis de la sismicité historique que pour les périodes géologiques récentes : il n'a pas en effet été retrouvé d'indices quaternaires d'activité tectonique sur les failles majeures encadrant le secteur. Le secteur correspond ainsi à une zone très stable d'un point de vue sismo-tectonique. Les séismes maximums possibles dans ce contexte sont de l'ordre de $6,1 \pm 0,4$ sur les failles régionales encadrant le secteur (fossé de Gondrecourt, failles de la Marne), avec des périodes de retour comprises entre 100.000 et 1.000.000 ans.

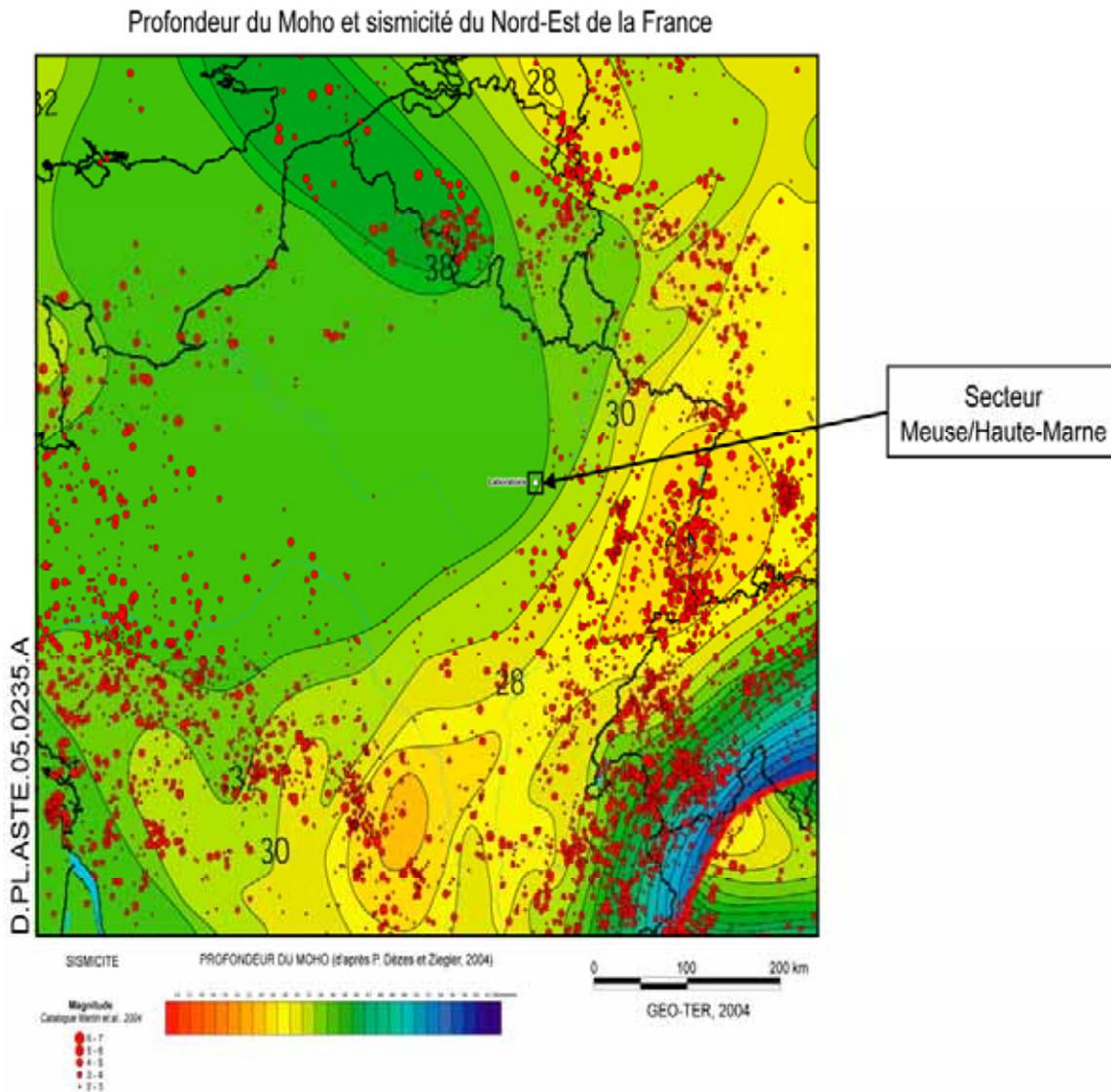


Figure 2.2-5

Cadre géodynamique de l'Est de la France : liaison entre la sismicité et l'épaisseur de la croûte

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

Pour évaluer l'impact d'un séisme à très long terme, on détermine quel serait le séisme maximum physiquement possible (SMPP) pour la configuration des failles les plus proches du site, en les supposant actives (longueur, profondeur d'enracinement, segmentation). On a retenu pour ce séisme une magnitude de 6,1 à 6 kilomètres du site du laboratoire et à une profondeur d'environ 12 kilomètres. Un tel séisme induirait une accélération maximale à la profondeur d'un stockage d'environ 0,3 g.

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

2.3 Éléments de description de l'architecture du stockage

La description des architectures de stockage, et leur justification au regard des fonctions de sûreté attendues, font l'objet du chapitre 3. On se contente ici d'une description générale des architectures, destinée à introduire des éléments de compréhension et de vocabulaire utiles pour la suite, sans justification particulière. Ce paragraphe est un résumé d'une partie du chapitre 2 du tome « architecture et gestion du stockage géologique » [22].

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

L'architecture étudiée regroupe les alvéoles de stockage des différentes catégories de déchets au sein de zones de stockage spécifiques (voir Figure 2.3-1). Les zones de stockage de déchets B, de déchets C et, le cas échéant, de combustibles usés, sont ainsi physiquement distinctes les unes des autres. Cette disposition est envisagée pour offrir une indépendance en matière (i) de gestion des différents déchets (ii) et de comportement de chaque zone, au regard des caractéristiques propres des déchets qu'elle contient.

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

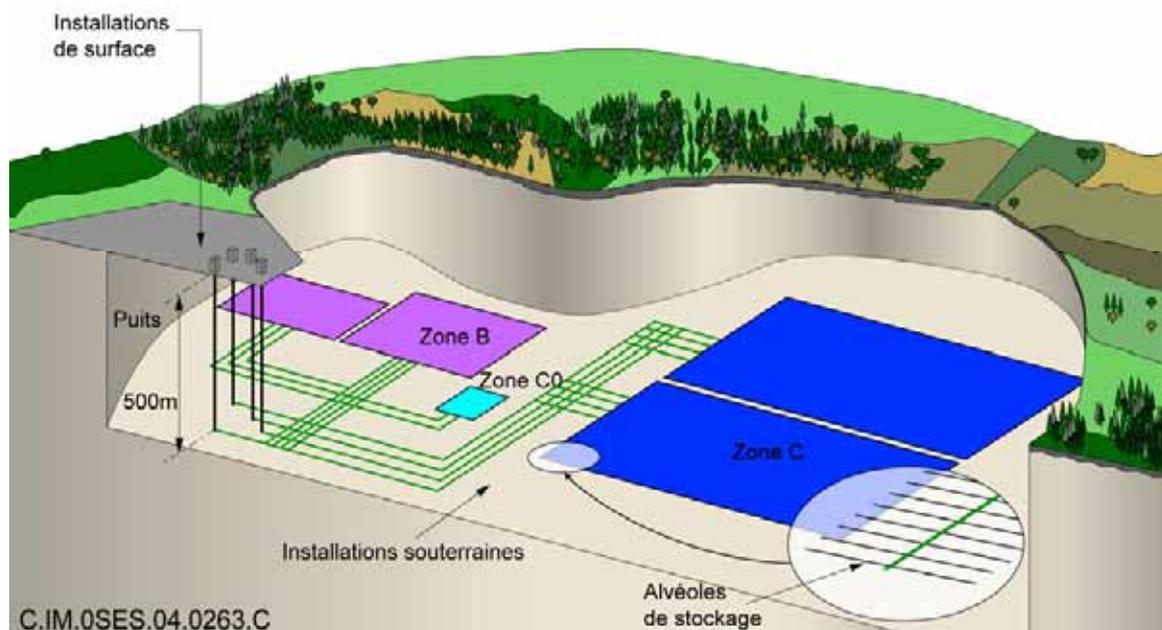


Figure 2.3-1 *Vue stylisée d'une architecture de stockage en cours d'exploitation*

Pendant la phase d'exploitation, des installations de surface assurent la réception des déchets et la préparation des colis de stockage. Elles comportent aussi une zone de stockage des déblais de

creusement, ainsi que des ateliers et des bureaux en soutien aux travaux souterrains et à l'exploitation. Pour accueillir l'ensemble des déchets décrits précédemment (déchets B, déchets C et combustibles usés), l'emprise en surface de ces installations serait au plus de l'ordre de quelques centaines d'hectares. La plus grande part correspondrait au stockage des déblais.

La conception des installations de surface est similaire à des installations industrielles existantes.

Les installations souterraines et les colis de stockage constituent des éléments plus spécifiques. Les sections suivantes décrivent de manière synthétique les options proposées pour les alvéoles et les colis de stockage de chaque catégorie de déchets, puis un agencement possible des zones de stockage et des puits et galeries de liaison.

2.3.1 Les puits et galeries de liaison

Un ensemble de quatre puits permet d'assurer la liaison entre les installations de surface et le niveau du stockage, dans la formation géologique étudiée :

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

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

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

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

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

2.3.2 Les zones de stockage

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

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

Dans le cas de la zone de stockage de déchets B, un module de stockage est constitué d'une seule alvéole desservie par une galerie d'accès orientée dans l'axe de l'alvéole. Les alvéoles dédiées au

stockage de colis contenant de la matière organique sont éloignées des autres alvéoles (voir explications au chapitre 3).

La Figure 2.3-2 illustre la possibilité de séparer la zone de stockage en deux sous-zones en fonction de leur contenu en matière organique.

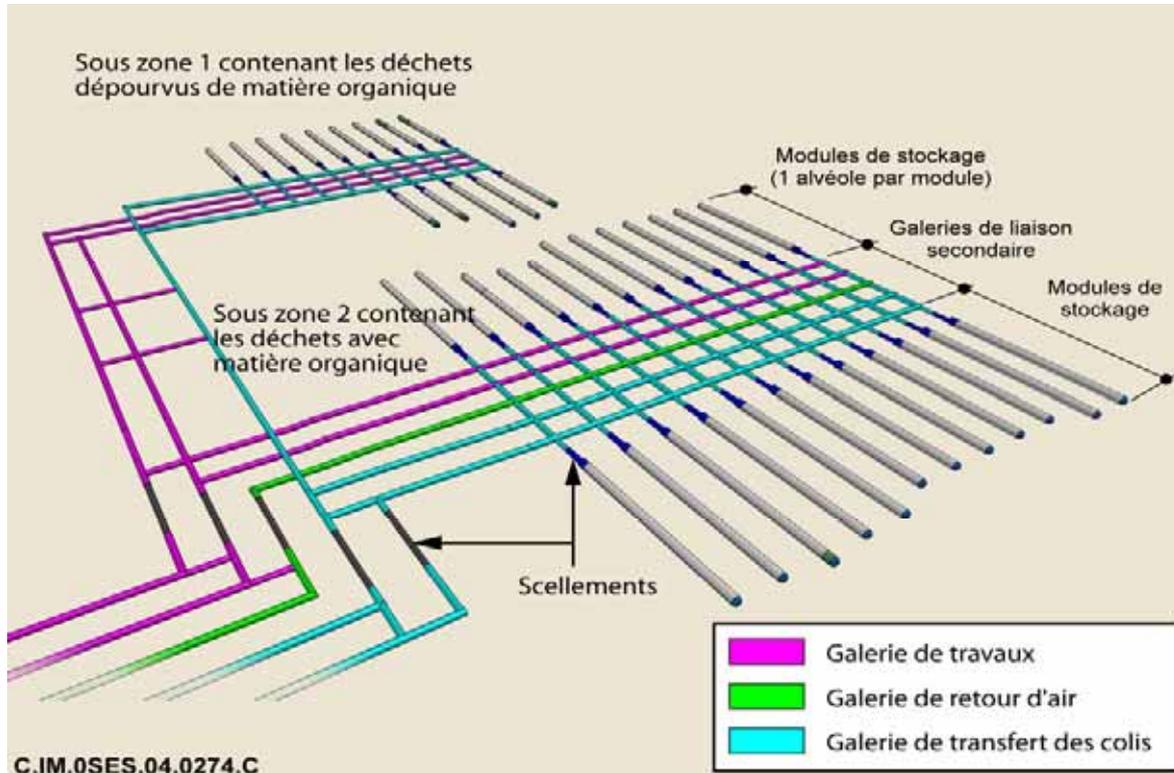


Figure 2.3-2 Organisation de la zone de stockage B

Dans le cas de la zone de stockage de déchets C vitrifiés (et de combustibles usés) un module de stockage est constitué de plusieurs dizaines d'alvéoles. Les alvéoles sont desservies par des galeries d'accès, orientées orthogonalement aux alvéoles (voir Figure 2.3-3). L'espacement entre les alvéoles résulte essentiellement de la prise en compte des phénomènes thermiques et permet une dissipation suffisante de la chaleur.

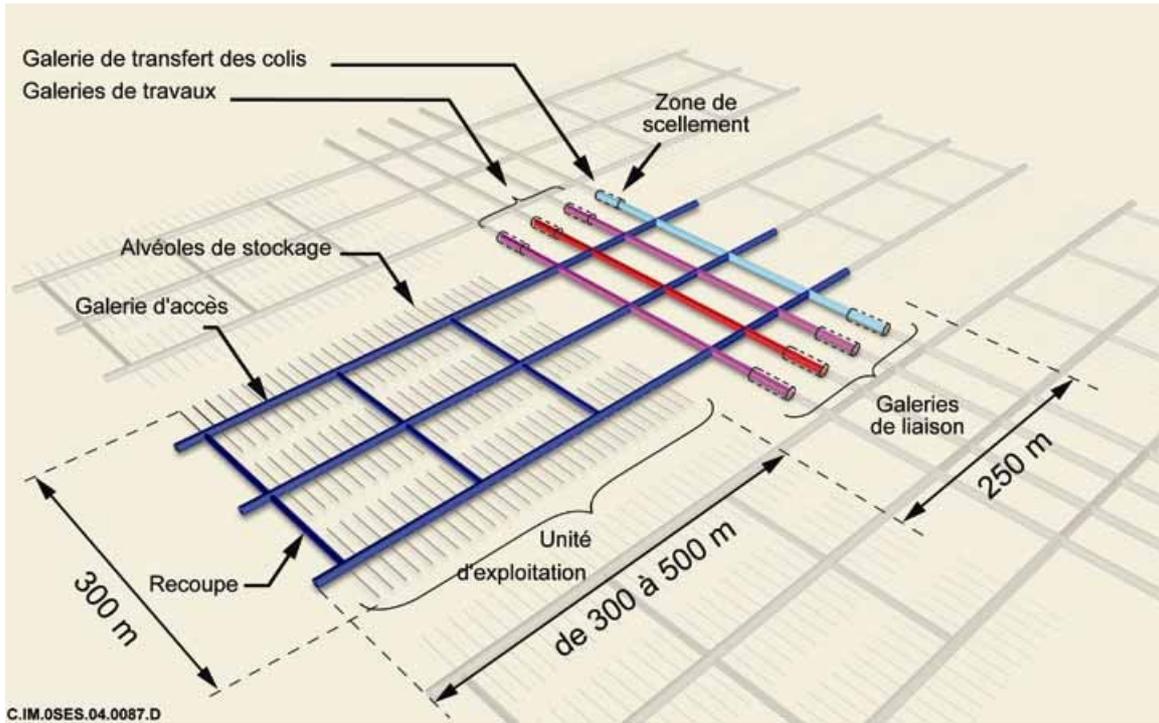


Figure 2.3-3 Modules de stockage de déchets C

La Figure 2.3-4 présente un synoptique simplifié des opérations industrielles de réception, préparation et transfert des colis, puis de fermeture, illustrant le rôle de certains composants dans ces opérations.

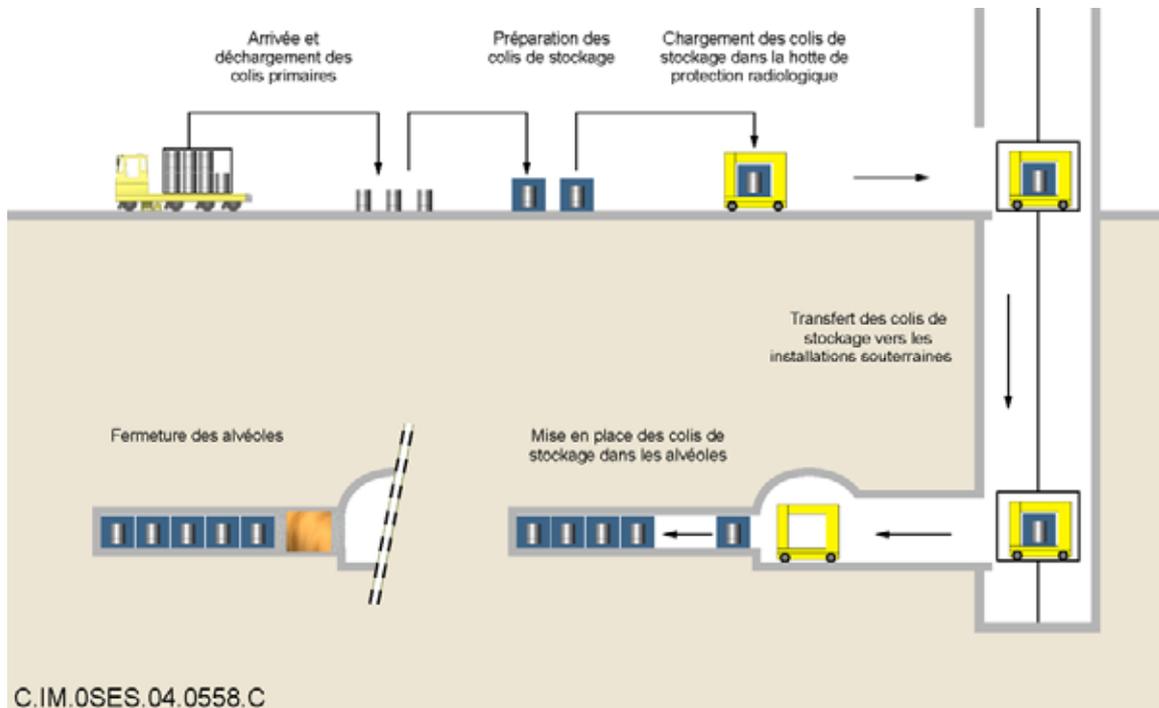
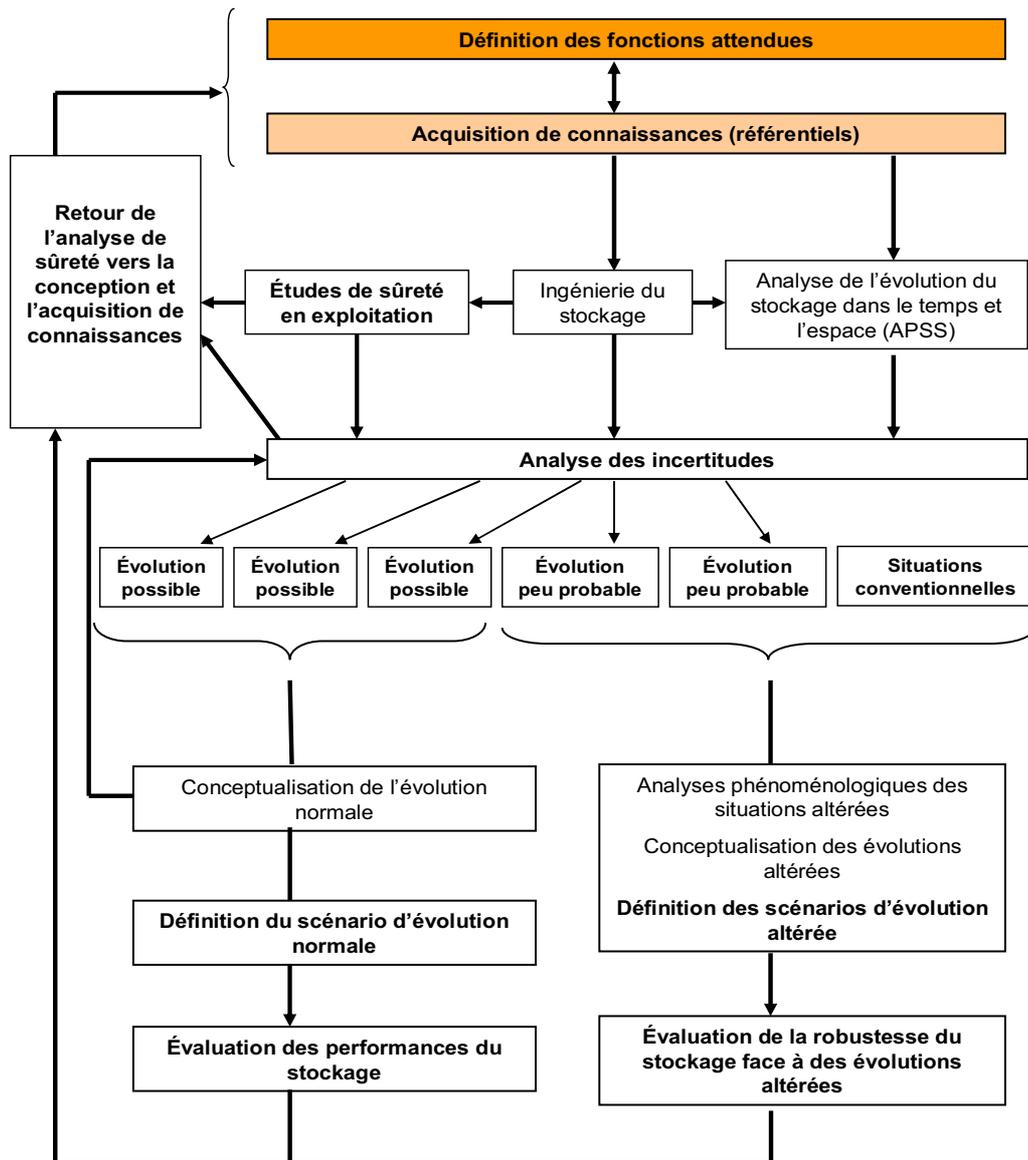


Figure 2.3-4 Synoptique d'exploitation et de fermeture

3

Fonctions de sûreté et conception du stockage

3.1	Introduction sur la conception du stockage.....	99
3.2	Cadre général : les échelles de temps et d'espace	102
3.3	L'approche de la sûreté par les fonctions	112
3.4	Principales fonctions de sûreté du stockage	113
3.5	Méthodologie de l'analyse fonctionnelle	119
3.6	Analyse des fonctions de sûreté en phase de construction, exploitation et observation	124
3.7	Analyse des fonctions de sûreté en phase de post-fermeture	126



THEME ABORDE EN TANT QUE DE BESOIN DANS LE PRESENT CHAPITRE



THEME TRAITÉ SPECIFIQUEMENT DANS LE PRESENT CHAPITRE

Synoptique 3-1

Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : fonctions de sûreté et conception du stockage

Ce chapitre a pour but d'exposer les lignes directrices qui ont guidé la conception du stockage. Il présente les architectures de stockage proposées dans le cadre du dossier 2005, en expliquant comment la sûreté a guidé les choix de conception. Il constitue donc à la fois une description des architectures plus détaillée que les principes généraux exposés au chapitre 2, et un exposé de la démarche de sûreté en conception.

3.1 Introduction sur la conception du stockage

La conception du stockage répond à une démarche classique, qui consiste à identifier les fonctions à remplir par l'installation et à les décliner en solutions techniques. Cette déclinaison est guidée par différents objectifs, dont certains sont bien connus dans d'autres domaines que le stockage de déchets radioactifs. D'autres lui sont en revanche spécifiques.

Parmi les premiers, on compte les problématiques de constructibilité, maîtrise des coûts, gestion des flux de personnels, de matériels, de déchets. On s'intéressera plus particulièrement dans le cadre du présent tome à la sécurité des travailleurs et du public lors des opérations de construction et d'exploitation du stockage, qui renvoie à des problématiques déjà connues dans le cadre des travaux souterrains ou dans les installations manipulant des déchets de haute activité. Seule la combinaison de ces deux aspects au sein d'une même installation constitue en tant que telle une spécificité du dossier.

Deux problématiques sont en revanche entièrement spécifiques de la conception d'un stockage en formation géologique profonde. Il s'agit d'une part de l'exigence de réversibilité du stockage (voir encadré 1). Un document spécifique est consacré à l'analyse des différents niveaux de réversibilité [32] et aux dispositions à prendre pour les assurer. On évoquera ces aspects ici en tant que de besoin, mais ils ne sont pas directement l'objet du chapitre. On s'attache essentiellement à montrer qu'il n'y a pas d'incompatibilité entre cette exigence et la sûreté (voir chapitre 6).

Encadré 1

La réversibilité du stockage

Nota : cet encadré présente de manière très sommaire la manière dont l'Andra a pris en compte l'exigence de réversibilité dans les études. Le lecteur spécifiquement intéressé par ces questions est invité à se reporter au tome « architecture et gestion du stockage géologique » du dossier 2005 [22], qui traite plus en profondeur de ces questions.

L'exploitation réversible d'un éventuel stockage peut être définie comme la possibilité d'un pilotage progressif et flexible du stockage qui laisse aux générations futures une liberté de décision. Dans cette optique, le processus de stockage peut être décomposé en une succession d'étapes qui ménagent, de la réalisation des premiers modules jusqu'à la fermeture éventuelle d'un module ou d'une zone de stockage, la possibilité d'un temps d'attente et d'observation, avant de décider de passer à l'étape suivante ou de revenir en arrière. Le franchissement d'une étape n'est pas un choix définitif, mais un choix raisonné, fait en toute connaissance des paramètres scientifiques, techniques, économiques, sociaux et environnementaux et des conséquences induites par le passage d'une étape à l'autre. Chaque phase n'a par conséquent pas une durée prédéfinie et impérative. La réversibilité implique de laisser au futur exploitant du stockage une latitude sur la durée des différentes étapes successives.

La réversibilité renvoie ainsi à la recherche d'une approche flexible et adaptable dans le temps et peut être appréhendée en terme de niveaux. Pour proposer une telle approche, les études et recherches de l'Andra ont consisté à :

- analyser les principales phases de la vie d'un stockage et les échelles de temps associées, afin de déterminer les étapes clefs qui nécessitent une intervention humaine ;

- imaginer une gestion du stockage par étapes, avec des jalons décisionnels. Le passage d'une étape à l'autre permettrait de rendre le stockage de plus en plus passif, tout en ne diminuant que graduellement le niveau de réversibilité et en conséquence les charges de surveillance et de maintenance.

L'Andra a pris ces objectifs en compte dans les options de conception d'un stockage proposées, au travers notamment d'une architecture modulaire, d'une recherche de simplification des opérations menées au fond, de dimensionnements et de choix de matériaux durables. La réversibilité ne correspond, pour autant, à aucun compromis vis-à-vis des objectifs de sûreté : aucune disposition technique pouvant perturber significativement une fonction de sûreté n'est retenue pour un motif de réversibilité.

La réversibilité est aussi rendue possible par la connaissance de l'évolution de l'état des ouvrages et la définition de moyens d'actions, sur une échelle de temps à minima séculaire mais pouvant être plus longue le cas échéant : cela a conduit à étudier des dispositions opérationnelles pour la gestion du stockage, notamment la reprise des colis, ainsi que des moyens d'observation qui pourraient être implantés dans les ouvrages.

D'autre part, le concepteur doit considérer l'évolution à long terme du stockage, qui doit être sûre sans intervention humaine au-delà d'une période de surveillance institutionnelle nécessairement limitée. Cela implique que l'évolution des déchets, de la roche hôte et des matériaux constituant le stockage permette d'assurer une telle sûreté. Pour cela, trois aspects complémentaires sont à aborder :

- les déchets doivent présenter autant que possible des caractéristiques favorables à la sûreté. Le traitement et le conditionnement des déchets actuellement produits relèvent de la responsabilité de leurs producteurs, qui dialoguent avec l'Andra dans le cadre des études de faisabilité du stockage. Certains conditionnements ont été prévus, dès l'origine, en vue d'une gestion à long terme (par exemple, la vitrification des produits de fission) ; dans d'autres cas, notamment pour les combustibles usés qui ne sont pas considérés comme des déchets, la forme physico-chimique sous laquelle ils se présentent peut offrir des caractéristiques favorables à la sûreté du stockage, même si elle n'a pas été définie dans cet objectif. Le présent dossier considère les objets potentiellement à stocker, déchets et combustibles usés, tels qu'ils sont prévus d'être livrés par leur producteur. On a pu prévoir des compléments de colisage, mais on ne retient pas de possibilité de modifier le conditionnement du déchet primaire ;
- le site retenu doit présenter des caractéristiques favorables. Deux sources permettent d'identifier quelles sont les caractéristiques pertinentes : d'une part, la RFS III.2.f. [2] recommande un certain nombre de « *critères de choix de site* », qui sont favorables de manière générique à l'implantation d'un stockage. D'autre part, au fur et à mesure du développement des études, le concepteur est conduit à préciser ce qu'il attend du milieu géologique, et quelles fonctions doivent être remplies. Cela peut amener à préciser et compléter les critères de choix. Le présent dossier se place dans l'hypothèse d'un stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien. Le processus de sélection de site est donc stricto sensu hors du domaine du dossier. On s'attache néanmoins à identifier les caractéristiques attendues de la part de la formation, et comment le Callovo-Oxfordien y répond, à la fois dans son état initial et dans son évolution prévue à long terme ;
- les éléments ouvragés prévus par le concepteur en vue de construire le stockage, l'exploiter, en assurer la réversibilité et le fermer par étape, doivent soit assurer des fonctions de sûreté en complément de la formation hôte, soit au minimum ne pas perturber les fonctions assurées par elle. Ils doivent être choisis et dimensionnés de manière que leurs caractéristiques intrinsèques, les processus qui régissent leur devenir à long terme et leurs interactions mutuelles, ne puissent conduire à une situation où la protection de l'homme et de l'environnement ne serait plus assurée.

La conception du stockage ne peut cependant pas aborder directement l'ensemble des caractéristiques et processus qui régissent l'évolution des déchets, de la formation hôte et des composants ouvragés, et proposer d'emblée un concept offrant une réponse adaptée à l'ensemble des phénomènes qui peuvent survenir sur de longues échelles de temps. La conception du stockage s'inscrit dans une démarche itérative permettant, à chaque étape, d'identifier les phénomènes importants et de les hiérarchiser, de caractériser les échelles de temps et d'espace dans lesquels ils s'inscrivent, et de préciser au fur et à mesure le concept au regard de cette analyse.

Il ne s'agit donc pas, dans le présent chapitre, de rendre compte de manière exhaustive de la phénoménologie du stockage à toutes les échelles de temps et d'espace. Les connaissances dans ce domaine sont exposées dans l'analyse phénoménologique des situations de stockage [27, 28] et sont discutées du point de vue de leur effet sur le stockage et les fonctions à remplir dans les analyses de sûreté [33]. Un résumé de cette analyse est fourni au chapitre 6. Ne sont présentés ici que les phénomènes les plus importants, du point de vue de leurs effets sur l'évolution globale, considérés lors de la conception et autour desquels l'architecture du stockage est construite.

La conception du stockage et la compréhension des phénomènes qui le régissent, en phase d'exploitation et plus encore sur le long terme, sont indissociables. Il est paru important de situer très tôt dans la présentation les ordres de grandeur des échelles de temps et d'espace dans lesquelles s'inscrivent ces grands phénomènes en post-fermeture (paragraphe 3.2). Ces échelles sont des références importantes pour comprendre la conception du stockage ; elles sont ensuite, avec un niveau de détail plus fin, le support de l'analyse de sûreté.

Une fois ce cadre posé, et après une introduction à la méthodologie mise en œuvre (paragraphe 3.3), les grandes fonctions de sûreté du stockage sont présentées, sans référence à ce stade aux solutions techniques qui seront déployées pour y répondre. Il s'agit uniquement d'expliquer quels ont été les grands principes de conception du stockage (paragraphe 3.4).

La démarche de conception, la déclinaison de ces fonctions générales en sous-fonctions spécifiques et les moyens proposés pour y répondre, font l'objet des paragraphes 3.5, 3.6 et 3.7.

3.2 Cadre général : les échelles de temps et d'espace

Traditionnellement, la question des échelles de temps est abordée dans la sûreté du stockage à travers le calcul d'impact : jusqu'à quelle date est-il nécessaire ou raisonnable de conduire un calcul d'impact à long terme ? Quel niveau de finesse doit-on attendre des modélisations en fonction des échelles de temps traitées ? Tels sont les sujets pour lesquels la RFS III.2.f [2], notamment, apporte des orientations.

Mais la problématique des échelles de temps et d'espace ouvre d'autres perspectives de réflexion [34]. Déterminer les échelles caractéristiques d'évolution des grands composants du stockage (milieu naturel, déchets, éléments exogènes) permet notamment de structurer la réflexion du concepteur dans le temps et dans l'espace. Elle lui permet de déterminer des solutions techniques adaptées à chaque phase de vie du stockage. Le concepteur définit les fonctions de sûreté à assurer pour chaque composant en fonction de chaque période de temps. Pour cela, il prend en compte le comportement prévisible des composants de son système. Cela lui permet à la fois de déterminer s'il est réaliste d'attribuer une telle fonction (« à cette date, le composant est-il encore dans un état physico-chimique qui lui permet de remplir la fonction attendue ? »), et s'il est nécessaire d'ajouter des fonctions nouvelles adaptées aux problématiques de chaque période (« à cette date, l'extension de telle perturbation sera-t-elle d'un ordre de grandeur tel qu'il faille prévoir d'en limiter les effets au moyen d'un dispositif particulier ? »).

Le stockage est, dès sa construction et jusqu'à très long terme, soumis à des évolutions qui peuvent être regroupées en quelques grandes catégories de phénomènes :

- les phénomènes thermiques, liés pour l'essentiel à la chaleur dégagée par certains déchets, qui décroît dans le temps ;
- les phénomènes hydrauliques, liés d'une part aux perturbations des écoulements d'eau naturels sur le site que provoque le stockage, mais également à la production de gaz – essentiellement les gaz de corrosion – ou le cas échéant à l'évolution géodynamique du site (érosion, modification des cours d'eau, etc.) ;
- les phénomènes mécaniques, liés à la modification des contraintes naturelles du site induites par le creusement des ouvrages ;
- les phénomènes chimiques, qui couvrent l'ensemble des transformations que connaissent les matériaux (les déchets, les colis, les matériaux de construction, etc.) sous l'effet de processus chimiques – ou biologiques, dans le cas où des microorganismes présents au sein du stockage peuvent avoir un effet. On inclut également dans cette catégorie les perturbations chimiques du milieu naturel que ces transformations impliquent ;
- les phénomènes radiologiques, avec au premier chef la décroissance radioactive des déchets, et toutes les perturbations que peut induire le rayonnement (radiolyse, effets liés à de possibles accidents de criticité, etc.).

Ces phénomènes déterminent les échelles de temps et d'espace qui sont le support de l'analyse de sûreté. Une dernière échelle de temps s'ajoute, celle liée aux phénomènes de transport des radionucléides et des toxiques chimiques au sein du stockage, inévitables à très long terme.

Les durées caractéristiques de l'ensemble de ces phénomènes ne sont pas toujours indépendantes du concept retenu. Dans un certain nombre de cas, c'est l'objet même du concept de stockage que de gérer cette durée : ainsi, la durabilité de certaines matrices de conditionnement de déchets est favorable à la sûreté (le verre étant un exemple emblématique), et le stockage doit constituer un milieu d'accueil favorisant une cinétique d'évolution lente des phénomènes de dégradation chimique de ces matrices. Dans un autre ordre d'idée, la durabilité mécanique de certains matériaux dépend fortement de leur formulation et de la manière dont ils sont mis en œuvre. Il ne peut en être donnée d'estimation précise sans référence à un concept donné.

Dans la mesure où il s'agit dans ce paragraphe d'introduire la conception du stockage, et non d'en présenter le résultat, on se contente de citer ici soit les temps caractéristiques des processus qui échappent à l'action de l'homme (par exemple la décroissance radioactive) soit des ordres de grandeur dont la seule vertu est de permettre de fixer un cadre général pour la réflexion. On a opté pour la description qui paraît la plus naturelle, en commençant par les grandes évolutions géodynamiques, la décroissance des déchets, puis le comportement des éléments exogènes dans une logique abordant la thermique, puis l'hydraulique, puis la mécanique, et enfin la chimie.

3.2.1 Échelles de temps et milieu géologique

La formation du Callovo-Oxfordien apparaît comme remarquablement stable dans le secteur étudié à l'échelle de plusieurs dizaines de millions d'années. L'activité tectonique, sismique, climatique et l'érosion ont eu très peu d'influence sur elle (voir chapitre 2).

Il n'en va pas de même des encaissants supérieurs et de l'environnement de surface, qui connaîtront à l'échelle du million d'années des modifications significatives, dues principalement aux évolutions climatiques. L'Andra a participé à l'exercice international BIOCLIM, qui a permis de définir des scénarios d'évolution des climats sur le très long terme. Ceux-ci mettent en évidence un enchaînement de cycles climatiques glaciaires / interglaciaires, pilotés par les évolutions de l'orbite terrestre autour du soleil, dont la périodicité est d'environ 100 000 ans. Selon les effets des perturbations liées à l'activité de l'homme et au réchauffement climatique induit à l'échelle du globe, cette échéance pourrait être décalée dans le temps. Cette alternance de climats glaciaires et tempérés provoquera des modifications significatives de l'environnement de surface, bien qu'aucun événement de très grande ampleur (du type de celui que pourrait induire la présence d'un glacier) n'est attendu dans aucun des scénarios établis. Le creusement des vallées, la disparition des couches superficielles du terrain, pourront induire des modifications tant des habitudes de vie des populations pouvant vivre sur le site que du régime hydrographique régional. On estime à une cinquantaine de mètres de profondeur, environ, la profondeur à laquelle les événements climatiques en surface pourraient modifier la configuration des terrains.

Cette double constatation, stabilité de la roche hôte sur la durée, possibilités plus importantes de modification dans les couches superficielles des formations encaissantes, implique un premier choix important de conception. La durée de vie des déchets étant longue et leur possible transport au sein de la formation hôte pouvant se dérouler au-delà de 100 000 ans (voir paragraphe suivant), on se reposera particulièrement sur les propriétés du Callovo-Oxfordien pour assurer le confinement de la radioactivité. Les formations encaissantes auront un rôle différent au sein de l'analyse (voir paragraphe 3.3).

3.2.2 Échelles de temps, décroissance radioactive et transport des radionucléides

Les radionucléides pris en compte dans l'inventaire radiologique des déchets HAVL présentent des périodes très variées, qui vont de moins de quelques mois jusqu'à 10 milliards d'années, leur radioactivité massique décroissant à mesure que la période s'allonge. Sur les 144 radionucléides considérés par l'Andra (c'est-à-dire tous ceux dont la période est supérieure à 6 mois) seuls quelques radionucléides ont une période supérieure à 100 000 ans (voir Tableau 3.2-1).

Isotopes	Période (ans)
¹⁰ Be	1 600 000
¹²⁶ A	720 000
³⁶ Cl	302 000
⁴⁰ K	1 280 000 000
⁴¹ Ca	103 000
⁵³ Mn	3 700 000
⁶⁰ Fe	7 510 000
⁸¹ Kr	210 000
⁸⁷ Rb	48 000 000 000
⁹³ Zr	1 530 000
⁹² Nb	35 000 000
⁹⁷ Tc	2 600 000
⁹⁸ Tc	4 200 000
⁹⁹ Tc	213 000
¹⁰⁷ Pd	6 500 000
¹²⁶ Sn	100 000
¹²⁹ I	15 700 000
¹³⁵ Cs	2 300 000
¹⁴⁶ Sm	103 000 000

Isotopes	Période (ans)
¹⁵⁰ Gd	1 790 000
¹⁵⁴ Dy	2 850 000
¹⁷⁶ Lu	36 100 000 000
¹⁸² Hf	8 990 000
^{186m} Re	200 000
²⁰⁵ Pb	15 2000 000
²⁰⁸ Bi	368 000
^{210m} Bi	3 000 000
²³² Th	14 100 000 000
²³³ U	159 000
²³⁴ U	246 000
²³⁵ U	704 000 000
²³⁶ U	23 400 000
²³⁸ U	4 470 000 000
²³⁶ Np	152 000
²³⁷ Np	2 140 000
²⁴² Pu	374 000
²⁴⁴ Pu	80 000 000
²⁴⁷ Cm	16 000 000
²⁴⁸ Cm	340 000

Tableau 3.2-1 Radionucléides de période supérieure à 100 000 ans

Certains de ces radionucléides à vie très longue ne sont présents dans les déchets qu'à l'état de trace, d'autres n'ont du fait de leur mobilité ou de leur radio-toxicité guère d'importance pour la sûreté du stockage. Au regard de l'ensemble des radionucléides présents initialement dans le combustible usé, on peut dire qu'au bout d'un million d'années (10 fois une période de 100 000 ans), l'inventaire radiologique a considérablement décréu, et que cette échelle de temps, bien que conventionnelle, est pertinente au regard de la décroissance de l'inventaire¹¹.

Un autre ordre de grandeur porte sur le transfert de ces mêmes radionucléides au travers de la formation hôte. Il peut se faire par diffusion, c'est-à-dire sous l'effet du mouvement spontané des particules, ou par convection, en suivant l'eau circulant dans le site. En considérant le cas d'un radionucléide qui n'est pas retenu dans la formation hôte, on peut évaluer un ordre de grandeur grossier de sa distance de parcours (L) dans la roche en fonction du temps (t), en mettant en rapport son temps caractéristique de diffusion et sa diffusivité apparente, par la relation : $L = \sqrt{(2.D.t)}$.

En considérant un coefficient de diffusion apparente de 10^{-10} m²/s, représentatif d'une roche telle que le Callovo-Oxfordien, on obtient les résultats suivants. Ceux-ci ne sont que des ordres de grandeur grossiers, à plus d'un titre : d'une part la diffusivité dépend du type d'élément considéré, d'autre part la formule appliquée correspond à un transport à une dimension dans un milieu homogène et infini.

1 an	100 ans	10 000 ans	1 000 000 ans
0,07 m	0,77 m	7,7 m	77 m

¹¹ On notera cependant que l'inventaire résiduel au-delà du million d'années ne peut être directement comparé à un inventaire représentatif de la radioactivité naturellement présente dans les sols, certains des éléments qui le composent n'ayant pas leur équivalent dans le milieu naturel. Il ne s'agit donc pas à proprement parler d'un « retour à la radioactivité naturelle ».

Pareillement, on peut évaluer un ordre de grandeur grossier des temps de convection, en se fondant sur une perméabilité moyenne de la formation hôte (qu'on retient pour les besoins de ce calcul simple à $K=5.10^{-14}$ m/s) et un gradient fixé à $\text{grad}H=0,2$ m/m. La distance parcourue par un écoulement convectif s'exprime en fonction du temps par : $L = K.\text{grad}H.t$, ce qui donne :

1 an	100 ans	10 000 ans	1 000 000 ans
négligeable	négligeable	0,003 m	0,3 m

Ce calcul d'ordre de grandeur, qui n'a bien entendu pas valeur de démonstration, tend à mettre en évidence que les transferts par convection seront dominés par les transferts diffusifs dans la roche saine, et que pour ces derniers l'échéance du million d'années est celle au cours de laquelle on peut envisager de voir les solutés parcourir une distance égale à l'épaisseur de garde de la roche (distance de parcours d'une cinquantaine à une centaine de mètres).

L'échéance du million d'années apparaît donc pertinente pour le concepteur et pour l'analyse de sûreté. En effet :

- elle correspond à une durée sur laquelle il est possible de prendre en compte les propriétés de la roche hôte telle qu'elles sont aujourd'hui constatées, sans avoir à envisager a priori qu'elles soient significativement modifiées ;
- c'est une période qui correspond à une décroissance très significative de l'inventaire radiologique, donc du « danger » représenté dans l'absolu par l'inventaire radiologique, même si cet argument à lui seul ne permet pas de trancher en faveur d'une durée de 1 000 000 d'années ;
- c'est, dans une première approche grossière, la durée pendant laquelle on peut compter sur la formation hôte pour retenir les éléments radioactifs. Elle constitue donc une bonne échéance pour l'analyse, dans la mesure où elle doit permettre d'évaluer le transfert des éléments et leur impact sur la biosphère.

À l'évidence, au-delà du seul objectif de 1 million d'années, le stockage est conçu pour être sûr aussi longtemps que possible. Cependant, à des échelles de temps supérieures, il devient de plus en plus difficile de prévoir l'évolution du milieu géologique, même dans ses grandes lignes, l'analogie avec l'évolution passée devenant sensiblement plus sujette à caution. De plus, prolonger l'analyse n'apporterait plus de bénéfice notable au regard de la décroissance radioactive. De même, dans un tout autre domaine, les calculs de performances (chapitre 5) sont arrêtés au million d'années. Si une telle manière de procéder conduit à interrompre le calcul avant que le maximum d'impact n'ait été atteint, on veille à s'assurer qualitativement que ce maximum reste modéré.

3.2.3 Échelles de temps, d'espace et décroissance thermique

Les déchets vitrifiés et les combustibles usés dégagent, du fait de leur contenu radiologique, des quantités de chaleur significatives au regard de leur possible impact sur la formation hôte et les phénomènes de transport. La puissance d'un colis de déchet vitrifié est de plusieurs centaines de watts à la production, et celle d'un combustible usé de plusieurs milliers de watts. Les déchets B présentent des puissances plus faibles, qui s'élèvent au maximum à quelques dizaines de watts pour les déchets de structures. Le phénomène de décroissance de la puissance thermique des colis de déchets est illustré par les courbes de la Figure 3.2-1.

La décroissance thermique est d'abord pilotée, sur les premières centaines d'années, par les produits de fission à vie courte et moyenne. Au-delà, ce sont les émetteurs alpha qui prennent le relais, sans que le dégagement de chaleur soit nécessairement négligeable : il dépasse encore la centaine de watts pour les combustibles usés à 1000 ans. On ne peut fixer dans l'absolu de durée au-delà de laquelle la puissance thermique des déchets peut être considérée comme sans importance pour le stockage : cela dépend de l'agencement du stockage et de la capacité de la roche à évacuer le flux de chaleur. On

retient cependant que la thermique des déchets est un phénomène qui se déroule à l'échelle du millier d'années jusqu'à quelques dizaines de milliers d'années pour les combustibles usés.

Parallèlement à ce qui a été regardé pour la décroissance radioactive, il est intéressant également de procéder à un calcul rapide sur la capacité du milieu naturel à transférer la chaleur. En retenant une diffusivité thermique du Callovo-Oxfordien, telle qu'elle a pu être évaluée, de l'ordre de 10^{-6} m²/s, on peut évaluer l'ordre de grandeur de la progression de la chaleur dans le milieu :

1 an	10 ans	100 ans	1000 ans
7,7 m	24 m	77 m	245 m

En première approche, par ce calcul rapide, l'influence thermique des déchets se fait ressentir à moins d'une centaine de mètres à l'échelle de 100 ans, et à 250 mètres en 1000 ans. À de telles dates, la décroissance thermique entre en ligne de compte et la zone d'influence thermique ne s'étend plus.

On retient de cette analyse rapide que la thermique est un phénomène à prendre en compte sur une durée dépendant des déchets, allant jusqu'à l'ordre de grandeur de 10 000 ans. L'influence thermique des déchets dans la formation ne dépasse pas, dans une approche grossière, l'ordre de grandeur de la centaine de mètres.

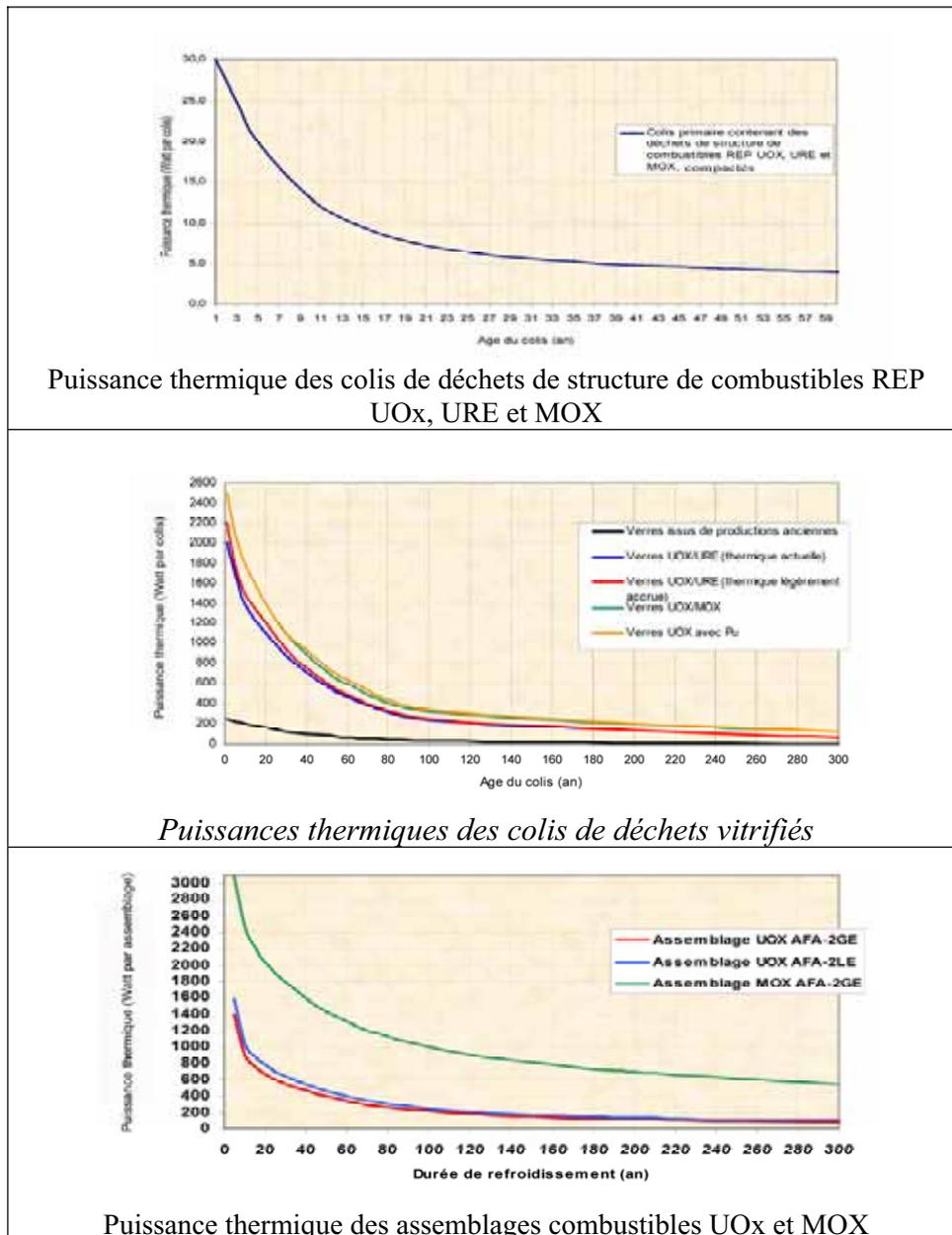


Figure 3.2-1 Puissance thermique des colis de déchets

3.2.4 Échelles de temps des phénomènes hydrauliques

Le milieu naturel est initialement à l'équilibre hydraulique, les écoulements au sein des différentes formations ayant atteint un régime stationnaire. Le creusement des ouvrages du stockage va perturber cette situation (voir la description détaillée dans [35]). On retient simplement ici que les différentes formations traversées subissent une décharge hydraulique, qui se transmet au sein de chaque couche ou entre couches, en fonction des contrastes de perméabilité (voir Figure 3.2-2).

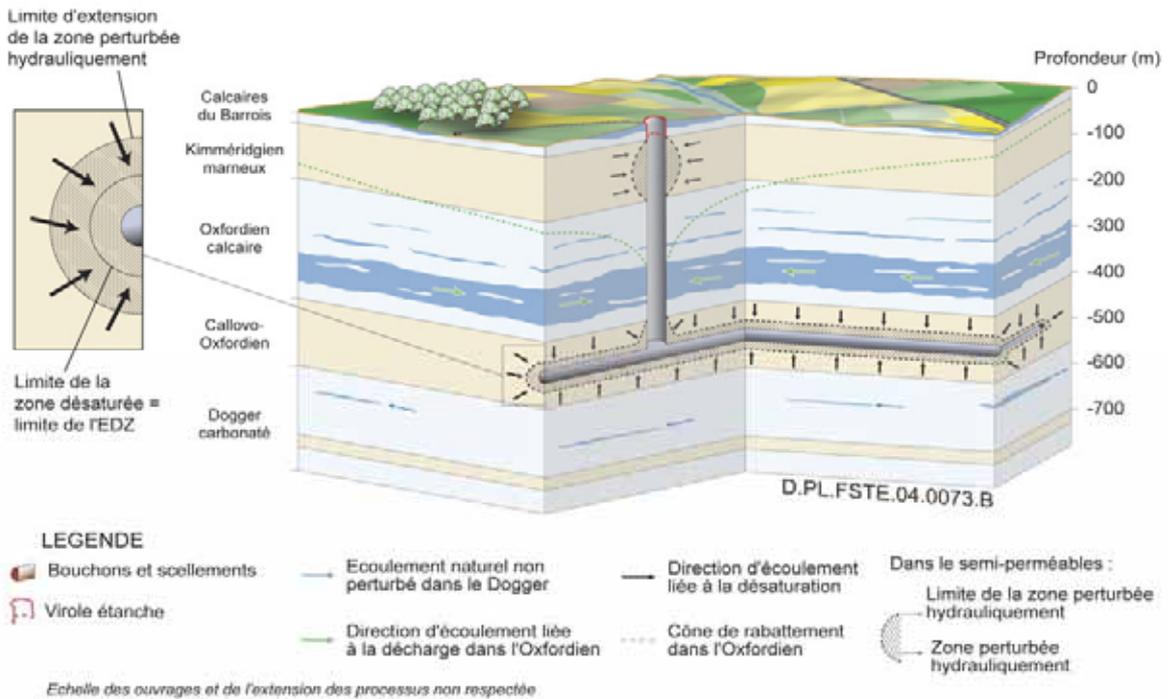


Figure 3.2-2 Transitoire hydraulique pendant la phase d'exploitation

Parallèlement, l'excavation et l'exploitation des ouvrages et notamment la ventilation pour ceux qui en sont munis (essentiellement les alvéoles de déchets B) désaturent la roche en paroi. Ces phénomènes se poursuivent tant que dure l'exploitation du stockage, c'est-à-dire à une échelle a priori d'ordre de grandeur séculaire. En se fondant sur la perméabilité moyenne du milieu, on peut évaluer que, dans la formation hôte, la désaturation ne peut pas s'étendre au-delà de l'environnement immédiat des ouvrages sur cette durée (voir Figure 3.2-3) ; elle reste en principe limitée à la zone endommagée par le creusement (d'ordre métrique à plurimétrique). En cas de prolongement de l'exploitation sur une durée pluriséculaire, par exemple dans un contexte de réversibilité, cet ordre de grandeur de la propagation de la désaturation ne serait pas modifié. Sa cinétique dans un milieu mécaniquement peu perturbé est en effet beaucoup plus lente.

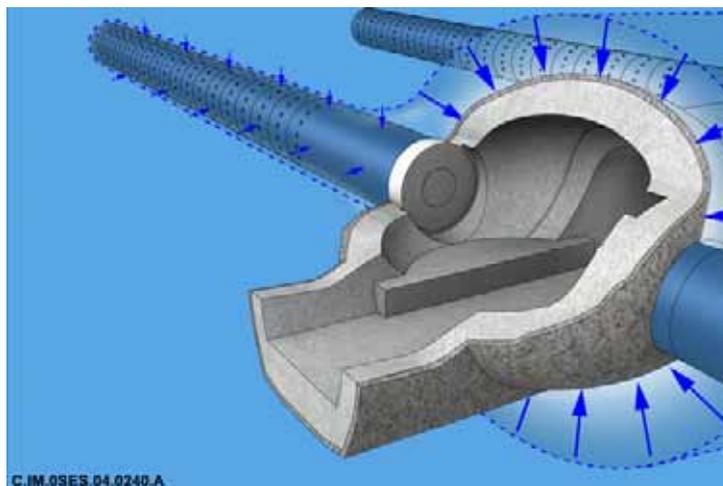


Figure 3.2-3 Schéma des écoulements convergents (→) et de l'extension de la zone désaturée en paroi des alvéoles (----)

Une fois le stockage refermé, le milieu rétablit les charges « naturelles », c'est-à-dire les charges initiales éventuellement modifiées en fonction des évolutions géodynamiques. La durée de resaturation tant de la roche que des ouvrages eux-mêmes est un phénomène complexe, qui dépend à la fois de la perméabilité des milieux rencontrés que des taux de vide, de l'influence des processus chimiques et thermiques qui se déroulent simultanément. Elle peut être significativement influencée par les gaz issus de la corrosion des éléments métalliques. On retient à ce stade qu'elle ne peut être évaluée par un calcul simple, dans la mesure où elle dépend plus directement de la définition des concepts.

Cependant, par anticipation, on peut noter que les ouvrages de petits diamètres (alvéoles C et de combustibles usés) se resaturent globalement ensemble (ordre de grandeur inférieur à la centaine d'années). L'hydrogène dû à la corrosion anoxique est suffisant pour retarder la resaturation des milieux poreux (galeries, alvéoles B) jusqu'à l'échelle de la centaine de milliers d'années. L'estimation des temps de resaturation et de retour à l'équilibre, en tenant compte de l'influence des gaz, est donnée au Tableau 3.2-2.

Constituant	Temps moyen de resaturation à 90 %
Alvéole CU (y compris bouchon)	≈ centaine d'années
Alvéole C (y compris bouchon)	≈ quelques dizaines d'années
Alvéoles B	≈ centaine de milliers d'années
Galeries	≈ centaine de milliers d'années
Scellements d'alvéoles B	≈ milliers d'années
Scellement en galerie de liaison et en puits	≈ milliers d'années

Tableau 3.2-2 Estimation des temps de resaturation et de retour à l'équilibre en tenant compte de l'influence des gaz

En résumé, les phénomènes hydrauliques n'étendent pas leur influence sur des distances importantes (quelques mètres au plus). Les durées caractéristiques sont très dépendantes des concepts mis en œuvre ; elles sont importantes pour le concepteur mais ne peuvent être prises, à ce stade du développement des architectures, pour des données *a priori* de l'analyse. Elles doivent être évaluées de manière itérative.

3.2.5 Échelles de temps et d'espace des phénomènes mécaniques et chimiques

Il ne s'agit pas ici de procéder à une description détaillée des processus mécaniques et chimiques au sein du stockage, mais on se borne à extraire les principaux éléments liés aux problématiques d'échelles de temps et d'espace. On se place à nouveau dans un cadre relativement générique, sans faire appel aux spécificités des concepts, autrement qu'en supposant que les matériaux exogènes introduits dans le stockage (hormis les déchets) sont essentiellement de nature métallique, cimentaire et argileuse.

La formation hôte subit lors du creusement des ouvrages, puis lors de l'exploitation de ceux-ci, un endommagement mécanique et une oxydation en surface. Ces deux processus, d'importance différente pour l'analyse de sûreté, ont tous deux une extension relativement faible à l'échelle du stockage, d'ordre métrique. L'endommagement ne devrait pas s'aggraver avec l'évolution ultérieure du stockage, le fluage de la roche contribuant plutôt à refermer les fissures provoquées par le creusement (voir la discussion plus élaborée de ce point au chapitre 6). De manière plus générale, la perturbation du champ de contraintes du site tend à retourner vers l'équilibre, au fur et à mesure que la roche et le milieu environnant imposent leur charge mécanique. Le fluage du Callovo-Oxfordien étant très lent, cet équilibrage peut s'étendre sur des durées de l'ordre de la centaine de milliers d'années.

Du fait du fort potentiel réducteur des eaux du Callovo-Oxfordien et de la minéralogie de celui-ci (notamment présence de pyrite), le retour à des conditions réductrices s'effectue en revanche très rapidement (de l'ordre de la centaine d'années au plus).

La roche est de plus susceptible de subir des perturbations chimiques autres que l'oxydation, issues des éléments métalliques et cimentaires. Les perturbations fer-argilites et alcaline seront évaluées plus complètement au chapitre 6, on peut retenir de manière générique à ce stade qu'elles se développent à l'échelle du million d'années mais ne dépassent pas l'échelle métrique.

Les déchets ont des durées de vie variées qui dépendent des conditions d'environnement, parfois de manière drastique (le verre étant ainsi sensible à la température). On ne peut tenir de raisonnement générique sur leurs performances de rétention, celles-ci seront proposées au chapitre 5 dans le cadre des choix de modèles de comportement. On retient simplement qu'il est raisonnable à ce stade d'envisager des performances de rétention pour les verres, les bitumes, les combustibles usés et les déchets métalliques, sur des périodes allant du millier à quelques centaines de milliers d'années, voire plus dans des conditions favorables.

Les matériaux cimentaires s'altèrent essentiellement sous l'effet des phénomènes d'hydrolyse, de carbonatation (action du gaz carbonique sur les constituants de la matrice cimentaire) et d'attaque sulfatique. Ils perdent ainsi progressivement leurs performances mécaniques ; l'Andra a défini des modèles pour décrire les effets de ces perturbations, notamment les différentes phases du béton résultant de l'hydrolyse (béton sain, altéré, dégradé et détritique) dont la durée est dépendante de la formulation du béton lui-même et de l'environnement. Ils seront discutés plus avant au chapitre 6. De manière générique, on retient que la cohésion mécanique du béton est dépendante des conditions hydriques auxquelles il est soumis ainsi que des contraintes mécaniques qu'il subit. Des durées d'ordre plurimillénaire, voir significativement plus sous réserve de conditions favorables, sont envisageables. Les performances chimiques du béton (son rôle de tampon basique) peuvent s'envisager sur des durées beaucoup plus longues.

Les matériaux métalliques sont soumis à la corrosion, selon les cas en condition oxydante ou anoxique. La vitesse et le type de corrosion varient selon les conditions d'environnement. Les vitesses de corrosion généralisées sont inférieures au micron par an en conditions anoxiques, de l'ordre de quelques microns par an en conditions oxydantes. Des éléments métalliques d'épaisseur centimétrique ont, sous ces hypothèses et à condition de maîtriser l'environnement, des durées de vie de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'années, voire plus.

Enfin, les matériaux en argile gonflante sont peu sensibles aux interactions avec le milieu, celui-ci étant lui-même argileux. En conditions de stockage, et dans la mesure où les déplacements d'eau sont très lents, ils sont très peu sujets au vieillissement et à l'érosion. Ils peuvent cependant être atteints par les mêmes perturbations que la roche hôte : par le fer, par le ciment, éventuellement par d'autres espèces chimiques. En première approche, dans la mesure où ces perturbations sont d'ordre métrique au plus à l'échelle du million d'années, il apparaît possible pour le concepteur d'envisager que des éléments en argile gonflante, de dimension plurimétrique, conservent sur une partie significative de leurs dimensions une stabilité chimique et mécanique à l'échelle du million d'années.

En résumé, il ressort de cette rapide analyse des échelles de temps et d'espace :

- que l'échéance du million d'années apparaît comme un objectif pertinent, à la fois pour la conception et pour l'analyse de sûreté ;
- que la perturbation thermique est celle qui est, a priori, la plus susceptible de s'étendre, sur une centaine de mètres environ. Les autres sont plutôt limitées à l'échelle métrique ;
- qu'en première approche les questions liées à la thermique ne concernent qu'une première phase de vie du stockage (dont la durée dépend de la nature des déchets). Il apparaît pertinent, pour la conception, de distinguer une phase thermique et une phase post-thermique, les dispositions de conception pouvant être différentes pour gérer l'une et l'autre ;
- que les perturbations hydrauliques, mécaniques, chimiques sont soit d'une évaluation plus complexe et dépendante du concept, soit susceptibles de perdurer sur le million d'années. Elles sont à prendre en compte dans la conception, mais on ne définira pas pour les fonctions de sûreté de stockage, a priori, une « phase hydraulique », une « phase mécanique » et une « phase chimique ». Les fonctions à assurer dans le stockage seront les mêmes dans tous les cas. Cela ne

signifie bien sûr pas que les transitoires correspondants, et leur effet sur les fonctions de sûreté, ne soient pas à prendre en compte ;

- on peut en première approche, et bien entendu sous réserve d'une analyse plus détaillée, définir des ordres de grandeur de durée de vie pour les composés cimentaires, métalliques, et argileux. Dans le cadre d'une approche itérative de la conception, cela permet de savoir quel type de fonction on peut leur attribuer. En particulier, seules les propriétés des composés argileux et les fonctions chimiques des composés cimentaires peuvent être pérennes sur le million d'années¹².

L'ensemble de ces éléments esquisse ainsi des échelles de temps et d'espace, qui permettent au concepteur, comme au scientifique ou à l'ingénieur de sûreté, de poser les bases de leurs démarches respectives. Il va de soi que ces éléments grossiers ne suffisent pas à définir un cadre pour des analyses détaillées. Celui-ci résultait d'une analyse phénoménologique plus fine [36].

Ce cadre général étant posé, il est possible d'aborder la question de la conception du stockage à proprement parler.

12 Il est implicite dans le cas traité ici qu'on a écarté la possibilité de faire appel à d'autres matériaux.

3.3 L'approche de la sûreté par les fonctions

La maîtrise de la sûreté du stockage par l'attribution de fonctions de sûreté est mise en œuvre par l'Andra, ainsi que par certains de ses homologues étrangers [37] comme méthode complétant l'approche dite « multi-barrières ». Celle-ci, mise au point dans le cadre de la sûreté des réacteurs nucléaires, consiste à interposer entre les matières radioactives et l'environnement plusieurs enceintes de confinement, indépendantes les unes des autres autant que possible. Le développement de cette approche a conduit à établir la notion de défense en profondeur, qui complète le concept de « barrières » par celui de « lignes de défense », ajoutant aux seules enceintes de confinement physique l'ensemble des dispositifs matériels et organisationnels qui permettent de se prémunir contre un accident, d'en réduire ou d'en gérer les conséquences.

L'approche par les fonctions de sûreté est un autre développement de la stratégie « multi barrières ». Cette approche est aujourd'hui recommandée au niveau international [12]. Elle consiste à répondre à l'exigence de sûreté en s'interrogeant sur les objectifs à poursuivre. La sûreté ne passe pas nécessairement uniquement par l'interposition de barrières physiques successives entre l'homme et la radioactivité. Dans certaines situations, et particulièrement pour un stockage, une telle approche s'avère en effet mal adaptée.

En effet, certaines barrières peuvent avoir des durées de vie certes importantes dans l'absolu, mais qui demeurent limitées au regard de la période radioactive des déchets (les colisages retenus dans le concept de stockage profond dans l'argile, qui sont en acier ou en béton, par exemple, ne peuvent pas prétendre avoir une durabilité en rapport avec des demi-vies des radionucléides pouvant dépasser des centaines de milliers d'années). Elles ne peuvent assurer leur rôle de barrière pendant toute la durée nécessaire à la démonstration de sûreté.

Pour autant, la dégradation d'une barrière ne signale pas une dégradation de la sûreté du stockage. En effet :

- si un conteneur de déchets vitrifiés dure suffisamment pour permettre une décroissance de l'essentiel de l'inventaire radioactif qu'il contient,
- si, une fois que le conteneur n'est plus étanche, le déchet lui-même relâche son activité suffisamment lentement pour qu'un surcroît de décroissance radioactive ait lieu,
- si enfin les conditions géochimiques dans l'alvéole sont telles que les éléments relâchés ont tendance à être peu mobiles dans le milieu, voire à précipiter pour certains d'entre eux,

alors une même fonction, consistant à immobiliser les radionucléides dans l'alvéole de déchets, est remplie continûment avec des niveaux de performance satisfaisants, même si les barrières sont dégradées progressivement. Réciproquement, l'approche par les fonctions peut justifier l'importance au regard de la sûreté d'un composant qui n'a pas de rôle de barrière. Ainsi, par exemple, on n'attend pas du remblai des ouvrages d'accès qu'il contribue à limiter la migration des radionucléides, dans les concepts développés pour le milieu argileux. Le remblai n'est donc pas une « barrière », du moins au regard des transferts par l'eau de radionucléides. Il remplit néanmoins des fonctions qui peuvent s'avérer importantes le cas échéant : soutien mécanique de la roche pour éviter que s'y développe un endommagement à très long terme, obstacle à une éventuelle intrusion dans le stockage.

La notion de fonctions de sûreté multiples constitue une généralisation de la notion de barrières multiples. Elle consiste à répondre aux objectifs de sûreté par la mise en œuvre d'actions, de natures différentes, qui contribuent toutes à la sûreté du stockage. Ces actions sont accomplies par les composants du stockage, les opérateurs ou les dispositions d'organisation mises en place. Les fonctions peuvent être redondantes, c'est-à-dire avoir le même effet et être capables de se substituer les unes aux autres, mais elles sont la plupart du temps complémentaires, contribuant conjointement à la réalisation des objectifs de sûreté : la perte d'une fonction conduit alors à une dégradation du niveau de sûreté, mais cette perte peut être acceptable du fait du maintien des autres fonctions.

3.4 Principales fonctions de sûreté du stockage

3.4.1 Objectif fondamental du stockage

L'objectif fondamental du stockage vis-à-vis de la sûreté est exprimé par la RFS III.2.f. Il consiste à assurer la protection des personnes et de l'environnement, contre les risques liés à la dissémination de substances radioactives. Cet objectif est formellement retraduit par l'Andra sous forme de fonction : « *protéger l'homme et l'environnement de la dispersion des radionucléides* », les toxiques chimiques contenus dans les déchets s'associant implicitement aux radionucléides.

On notera qu'il ne s'agit pas de la seule fonction attendue d'un stockage. Celui-ci répond également à des objectifs industriels de prise en charge des déchets, par exemple. Une liste plus complète des fonctions du stockage a été établie [23]. À partir de la phase de post-fermeture, l'objectif de sûreté du stockage est le seul qui demeure.

Les voies d'atteinte de l'homme et l'environnement sont de plusieurs natures. On trouve d'abord celles liées au caractère radioactif des déchets : risque d'exposition externe au rayonnement, risque d'ingestion ou d'inhalation de contaminants. D'autres sont plus classiques et renvoient à la toxicité chimique des déchets – substance solubles ou gaz le cas échéant. D'autres risques peuvent également être considérés si cela s'avère pertinent : ainsi, certains déchets tels que les fûts d'enrobés bitumineux dégagent par radiolyse des gaz potentiellement explosifs. C'est cependant la radioactivité qui constitue la particularité de ces déchets, et c'est autour de cette caractéristique qu'est défini le concept de stockage (voir chapitre 1). Celui-ci est avant tout destiné à protéger l'homme et l'environnement de la radioactivité. Les autres aspects ne sont pas négligés pour autant, mais il est loisible de vérifier a posteriori que les dispositions prises vis-à-vis du risque radioactif couvrent aussi le risque chimique, par exemple, ou d'amender les concepts de stockage pour les adapter à des risques particuliers.

La conception du stockage est pilotée par la stratégie de concentration – confinement, telle que définie par exemple dans la publication n°81 de la Commission internationale de protection radiologique [6] et recommandée par l'Agence internationale pour l'énergie atomique [38]. Il s'agit de regrouper les déchets sur un même site, et d'empêcher durablement les éléments nocifs qu'ils contiennent d'atteindre l'homme. On notera que le conditionnement des déchets au sein de matrices stables et présentant des propriétés favorables est également une application de ce principe. Il n'entre pas directement dans le cadre de ce dossier, cet aspect étant pris en charge par le producteur du déchet en amont de son expédition vers un centre de stockage.

3.4.2 Principales fonctions de sûreté en exploitation

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

- de construction, pour mettre en place les ouvrages d'accès, les alvéoles, les utilités nécessaires au fonctionnement ;
- d'exploitation, destinées à la mise en place des colis de déchets, et dans le cas où une telle situation se présenterait, de retrait des colis dans un cadre de réversibilité ;
- d'observation et de surveillance, destinées à acquérir des paramètres sur l'évolution du stockage à court terme¹³ ;

¹³ On désigne par le terme d'« observation » l'ensemble des mesures conduites dans le but de mieux comprendre l'évolution du stockage, que ce soit pour confirmer in situ les modèles retenus (observation thermiques, mécaniques, etc.), pour l'évaluation de sûreté ou pour acquérir un retour d'expérience sur les premiers modules, en vue d'optimiser la construction des modules de stockage suivant. Le terme de « surveillance » recouvre l'ensemble des mesures classiques destinées à s'assurer, dans le cadre de la défense en profondeur, que le stockage reste bien dans son domaine de fonctionnement prévu (mesures de radioprotection, taux de gaz dans l'air, mesure de l'endommagement en paroi, etc.) ou dans le domaine de validité des modèles de prédiction de son comportement à long terme. Les programmes d'observation et de surveillance peuvent se recouvrir en partie.

- d'opérations de fermeture des alvéoles, modules et zones de stockage, dans un processus par étape.

En exploitation, les fonctions de sûreté se déduisent des voies d'atteinte et des risques principaux induits par les déchets radioactifs [24]. Elles sont valables pour toutes les phases au cours desquelles des opérateurs sont susceptibles d'être présents dans le stockage et de manipuler des colis de déchets radioactifs, qu'il s'agisse de les mettre en place, de les surveiller, ou de les retirer dans un cadre de réversibilité. Ces fonctions sont d'ailleurs très similaires aux fonctions considérées dans les installations nucléaires de base classiques. Il s'agit de :

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

On notera qu'il s'agit ici de fonctions de sûreté nucléaire. D'autres, liées plutôt aux phases de creusement, ou à la prévention et la gestion des risques du travail classique, pourraient être ajoutées. Le personnel doit être protégé de nuisances liées au contexte minier, ou plus généralement industriel, du stockage : protection contre les poussières, contre les chutes de blocs et les effondrements, contre le risque électrique, par exemple. En particulier, la RFS III.2.f. demande que la formation hôte permette une construction des ouvrages sans intervention pour reprise du gabarit pendant leur remplissage, ce qui se rattache indirectement à un souci de sécurité des conditions d'exploitation. Le Callovo-Oxfordien répond à ce critère, de par ses caractéristiques de fluage très lent.

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

- la protection des eaux souterraines (dans les horizons aquifères traversés) contre les différentes formes de pollution possibles ;
- la protection de l'environnement de surface contre les impacts induits par le chantier (protection des eaux superficielles, de l'air, des sols, de la faune, de la flore, du voisinage et du paysage).

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

3.4.3 Principales fonctions de sûreté à long terme

Les fonctions de sûreté dites « à long terme », c'est-à-dire en phase de post-fermeture, constituent la véritable spécificité du stockage. On se limite ici à celles de plus haut niveau, très largement indépendantes des architectures de stockage retenues in fine. On exposera la manière dont elles sont mises en œuvre, éventuellement en les détaillant en sous-fonctions de sûreté, au paragraphe 3.7.

3.4.3.1 Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines

Il s'agit là de la première fonction de sûreté du stockage, qui fonde l'un des principes d'une installation en formation géologique profonde. Il s'agit de privilégier une solution de gestion dans laquelle les déchets sont maintenus hors d'atteinte des populations, afin d'empêcher que celles-ci se trouvent exposées à la radioactivité (exposition au rayonnement que les déchets émettent ou risque d'ingestion / inhalation), et ce pendant des durées en rapport avec la décroissance de la radioactivité.

On cherche donc à éviter que des phénomènes de surface tels que les événements climatiques, l'érosion, les inondations, ainsi que des activités humaines « banales », ne conduisent à de telles situations. En ce sens, une installation d'entreposage peut répondre à la même fonctionnalité, mais sur des périodes qui ne sont pas réputées pérennes. Le principe du stockage géologique est de réaliser cette fonction de manière passive, c'est-à-dire sans nécessiter de surveillance au-delà d'une période définie.

Il s'agit là d'un objectif général, qui ne vise pas de phénomène de surface ou de type d'action humaine bien spécifique. Pour autant, on ne peut véritablement déterminer que les déchets sont à l'abri de telles atteintes qu'après avoir conduit une analyse de sûreté permettant d'identifier largement les différentes actions possibles, leur vraisemblance dans le contexte particulier considéré, et leurs effets potentiels. Certains types d'action, telle une intrusion humaine fortuite à la suite d'un forage profond, ne peuvent jamais être totalement exclus bien que leur probabilité d'occurrence, ainsi que leurs conséquences potentielles, puissent être réduites.

3.4.3.2 Préserver la mémoire du stockage

La règle fondamentale de sûreté RFS III-2.f précise que 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) ». Cela n'est pas contradictoire avec la volonté de maintenir la mémoire du site aussi longtemps que possible.

Le souci du maintien de la mémoire commence dès la phase d'exploitation où il s'agit d'assurer la préservation des connaissances et des compétences techniques nécessaires à la gestion des installations. Dans un second temps, après le stockage des colis de déchets, la mémoire peut constituer un élément de défense en profondeur permettant notamment d'éviter les risques d'intrusion à l'intérieur du stockage, ou d'y pénétrer en toute connaissance de cause. Sur ce dernier point, elle se rattache à la fonction précédente, mais couvre également un objectif plus large. Nonobstant, l'oubli à long terme du stockage, qui ne peut être totalement exclu, ne doit pas avoir de conséquence néfaste pour la sûreté.

3.4.3.3 Fonctions de sûreté visant à protéger l'homme et l'environnement des relâchements d'éléments toxiques (radionucléides et toxiques chimiques)

De même que les déchets doivent être protégés des phénomènes qui se produisent en surface, l'environnement de surface doit également être protégé contre une possible remontée des radionucléides contenus dans les déchets, ou des toxiques chimiques. Les fonctions qui visent à protéger l'environnement de surface des atteintes liées aux déchets consistent à maîtriser les voies de transfert qui peuvent conduire à long terme les éléments nocifs (radionucléides et toxiques chimiques) des déchets jusqu'à l'homme.

Ces voies sont potentiellement variées. Il s'agit de :

- la voie aqueuse, les éléments étant susceptibles de se mettre en solution et de cheminer jusqu'à la surface ;
- la voie gazeuse, certains radionucléides pouvant exister et migrer sous cette forme ;
- la voie solide uniquement dans le cas où un événement particulier provoquerait une remontée d'une partie des déchets à la surface, du fait d'une intrusion humaine dans la plupart des cas.

Pour ce qui relève de la voie gazeuse à long terme, la majorité des radionucléides gazeux sont à vie courte au regard des temps de transfert dans la formation (krypton 85, tritium...). Parmi les éléments à vie longue, seuls l'iode 129, le chlore 36 et le carbone 14 sont susceptibles de migrer significativement. Les deux premiers ont des propriétés telles que, dans les conditions qui prévalent au sein du stockage, ils seront mis en solution rapidement. Seul le carbone 14 pourrait se maintenir en phase gazeuse plus longtemps bien qu'en faible quantité.

Cette question sera abordée plus avant au chapitre 6, paragraphe 6.2.10. À ce stade, on peut cependant constater qu'au regard du faible inventaire radiologique concerné et de la probabilité importante que les gaz se dissolvent au sein du stockage, la voie gazeuse n'apparaît pas une voie très significative de transfert des radionucléides. Elle ne nécessite pas de mesure de conception spécifique. Cela ne préjuge pas de dispositions d'une autre nature, visant à gérer les gaz inactifs qui pourront s'accumuler dans le stockage (gaz de corrosion, gaz de radiolyse, etc.). De manière plus générale, on emploiera dans le reste du dossier le terme « hydraulique » pour désigner les questions faisant appel à la fois aux voies de transferts par l'eau et par le gaz, la prise en compte de ces deux modes de transfert conduisant à des dispositions de conception similaires. Par défaut, c'est l'eau qui est traitée ; la spécificité des gaz est soulignée autant que de besoin au fil du texte.

La conception s'oriente autour de la maîtrise des transferts de radionucléides par les voies hydrauliques, et plus spécifiquement par l'eau. Ceux-ci peuvent se produire par convection, c'est-à-dire par un phénomène d'entraînement des radionucléides accompagnant un flux d'eau, ou par diffusion, c'est-à-dire par un mouvement brownien des éléments dans l'eau.

- **« S'opposer à la circulation d'eau »**

La diffusion des éléments est inévitable à terme, lorsque les colis de stockage n'assurent plus un rôle d'isolation suffisant. Il est en revanche possible de limiter très fortement la convection, c'est-à-dire les circulations d'eau, au sein du stockage (voir Figure 3.4-1). On a vu au paragraphe 3.2.2 que le Callovo-Oxfordien présentait des propriétés favorables à cet égard.

La limitation de la convection contribue à la protection du stockage dans la première phase qui suit sa fermeture, au cours de laquelle la roche, puis les composants du stockage lui-même, se resaturent. L'absence de mouvements convectifs contribue à une cinétique lente et mieux maîtrisée des processus de dégradation. La limitation de la convection est également favorable à plus long terme, vis-à-vis du transfert des radionucléides ; dans un milieu relativement perméable, elle pourrait devenir comparable ou plus rapide que la diffusion.

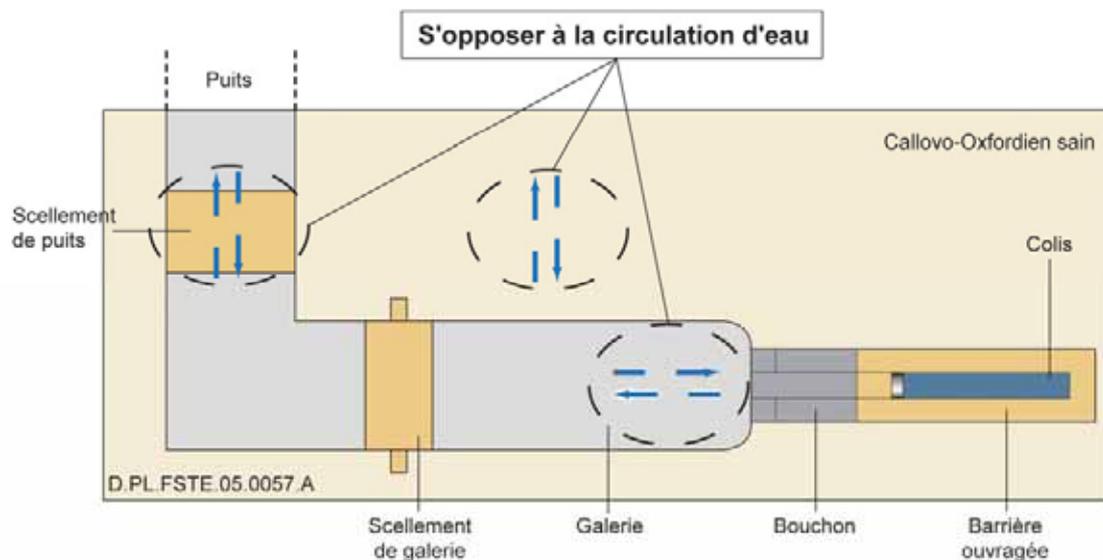


Figure 3.4-1 *S'opposer à la circulation d'eau*

- **« Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »**

Il s'agit de limiter le relâchement des radionucléides, et par extension des toxiques chimiques, c'est-à-dire d'empêcher leur mise en solution, et quand cela devient inévitable, de favoriser leur précipitation ainsi que les formes chimiques peu mobiles des solutés (ce que l'on désigne par le terme « immobiliser »). Cette fonction est généralement effective en champ proche, au plus près des colis, là

où les conditions physico-chimiques sont réunies pour qu'elle s'accomplisse (voir Figure 3.4-2). Cet objectif est cohérent avec la pratique plus générale en termes de sûreté, de gestion du risque « au plus près de la source ». Cette fonction est maintenue tout au long de la vie du stockage, mais prend différentes formes selon les échelles de temps, comme on a pu l'évoquer dans l'exemple cité en introduction du paragraphe 3.3.

Cette fonction fait appel, au moins dans les premières phases, aux propriétés favorables des colis de déchets. Elle renvoie donc notamment à la nécessité de protéger les colis de déchets de l'eau, et de les placer dans des conditions physico-chimiques favorables.

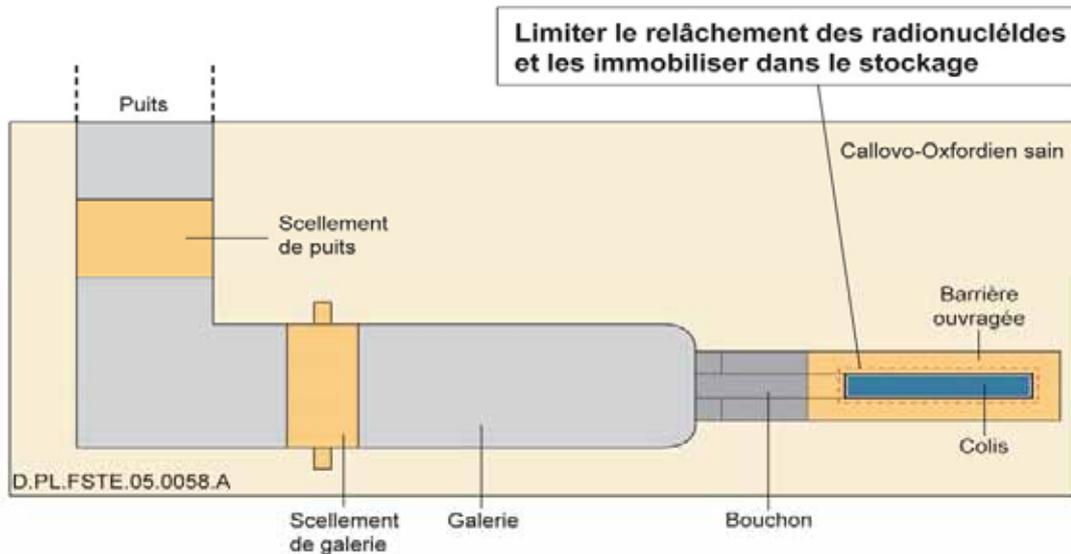


Figure 3.4-2 *limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage*

- **« Retarder et atténuer la migration des radionucléides »**

Une fois les radionucléides en solution, et moyennant le fait que la première fonction de sûreté est efficace, le mécanisme de transfert dominant des radionucléides, et par extension des toxiques chimiques, doit être la diffusion. Il est possible de les retarder et d'atténuer leur transfert.

« Retarder » signifie augmenter la durée du transfert vers la surface, ce qui permet de réduire l'impact du fait de la décroissance radioactive. « Atténuer » la migration doit se comprendre dans une double acception, à la fois dans le temps et dans l'espace. Pour un temps de parcours moyen donné et à quantité constante, un flux de radionucléides sera d'autant moins nocif qu'il s'étend sur une plus grande distance et que son arrivée dans la biosphère est répartie sur une période plus longue (voir Figure 3.4-3 et Figure 3.4-4).

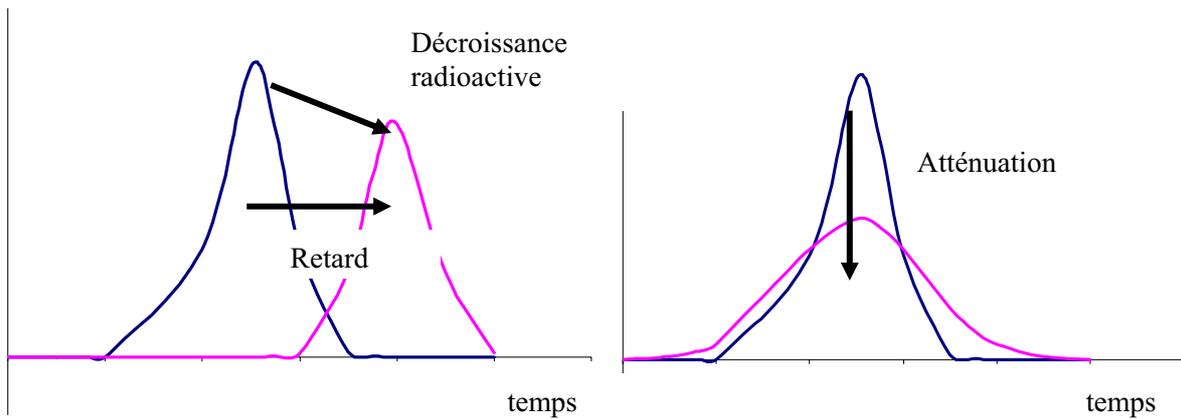


Figure 3.4-3 Illustration schématique du retard et de l'atténuation apportés sur une concentration de radionucléides en solution, en fonction du temps

Cette fonction n'intervient pas tant que la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » est totalement efficace (puisque la diffusion n'a pas encore lieu) mais commence à agir dès les premiers relâchements. Elle est disponible également en cas de perte prématurée de confinement, sous l'effet d'un incident. On la dit pour cette raison « latente » dans les premiers temps du stockage (voir cette notion au paragraphe suivant).

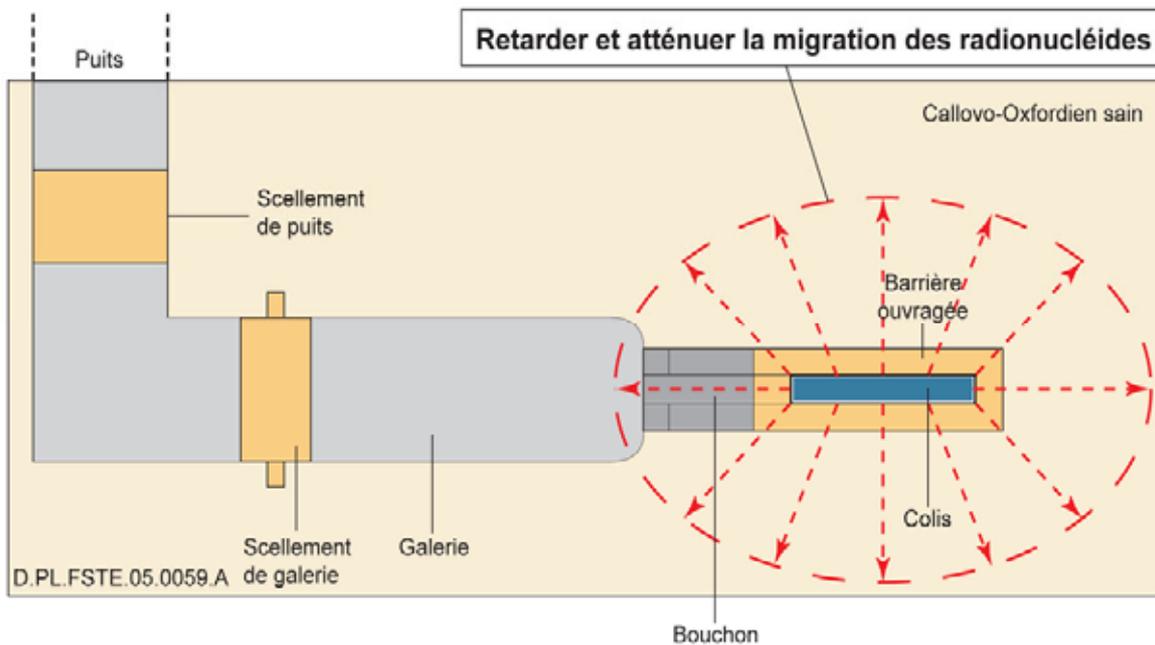


Figure 3.4-4 Limiter et atténuer la migration des radionucléides

3.5 Méthodologie de l'analyse fonctionnelle

L'objet du présent paragraphe est de présenter les modalités de réalisation de l'analyse fonctionnelle interne du stockage, c'est-à-dire la manière dont les fonctions au niveau le plus général telles qu'elles ont été présentées ci-avant sont déclinées selon les phases de temps et les échelles d'espace, sous forme de sous-fonctions accomplies par des composants spécifiques du stockage. Cela permet de présenter les architectures de stockage tout en exposant le besoin auquel elles doivent répondre.

Chaque fonction de sûreté peut en effet être décomposée en sous-fonctions, et ainsi de suite jusqu'à un niveau de détail que le concepteur juge adéquat vis-à-vis de ses besoins pour caractériser et spécifier les composants du stockage. Ces besoins dépendent eux-mêmes du degré d'avancement du projet.

La déclinaison des fonctions en solutions techniques s'effectue dans le cadre d'un « système » défini, c'est-à-dire dans des limites sur lesquelles le concepteur se propose d'agir. Le système se distingue de son « environnement », ensemble des éléments qui sont considérés comme des données de l'analyse fonctionnelle, dont le comportement est subi et à prendre en compte tel quel.

Encadré 2

La définition du système de stockage

Le système de stockage est constitué de l'ensemble des composants qui contribuent à la stratégie de concentration – confinement : la formation hôte du Callovo-Oxfordien et les éléments ouvragés apportés par l'homme dans le stockage. La formation hôte ne peut à l'évidence pas être « conçue » puisqu'elle préexiste au projet de stockage. Elle a cependant été sélectionnée parmi d'autres pour l'étude de faisabilité, et on attend d'elle qu'elle remplisse un rôle important vis-à-vis des fonctions de sûreté.

Dans la mesure où ils préexistent à la conception du stockage, les déchets en tant que tels ne font pas partie au sens strict du système de stockage. Cependant, la matrice de certains d'entre eux contribue à confiner la radioactivité, en général parce qu'elle a été choisie dans ce but par le producteur du déchet, soit dans l'optique d'une gestion à long terme (la matrice des déchets vitrifiés, par exemple) soit pour des questions de sécurité opérationnelle (la gaine des combustibles usés, par exemple). On inclut donc par extension la matrice des déchets dans le système de stockage.

En revanche, les formations encaissantes ne font pas partie du système de stockage. Même si certaines peuvent présenter des propriétés favorables de rétention, elles n'ont pas été sélectionnées prioritairement pour cela, la rétention étant avant tout assurée par le stockage et la formation hôte. De plus, leurs propriétés sont davantage soumises aux aléas se produisant en surface (érosion, événements climatiques). Pour autant, elles ont fait l'objet de programmes de caractérisation.

La décomposition des fonctions en sous-fonctions n'est pas unique a priori. Elle traduit un choix du concepteur. Il s'appuie :

- sur l'état des connaissances acquises sur le comportement des composants du stockage, qui donne confiance dans leur capacité à accomplir des fonctions ;
- sur le retour d'expérience d'évaluations de sûreté antérieures, qui ont confirmé ou infirmé l'intérêt de certaines fonctions de sûreté par rapport à d'autres, et ont notamment permis d'identifier les événements extérieurs ou les agressions internes qui peuvent mettre en péril le bon fonctionnement du stockage, et contre lesquels il est possible de prendre des dispositions constructives.

La décomposition en fonctions traduit donc un état des réflexions du concepteur. Elle se développe au fur et à mesure de la conception. Une fois le schéma fonctionnel posé, la conception est revue et détaillée de manière à favoriser l'accomplissement des fonctions de sûreté. Le programme de recherche est orienté notamment sur les phénomènes qui sous-tendent l'accomplissement des fonctions (par exemple : la corrosion pour la fonction d'étanchéité des conteneurs, le programme de reconnaissance de la formation pour ses propriétés de confinement, etc.).

Chaque fonction est caractérisée au moins par :

- un niveau de performances, c'est-à-dire une quantification du niveau d'efficacité de l'action attendue. Il n'est cependant pas forcément pertinent de fixer a priori un niveau de performances. Celui-ci n'a de sens que s'il sert à dimensionner les composants qui doivent accomplir la fonction. Si la fonction doit être remplie par au moins un composant qui échappe à l'action du concepteur (le milieu géologique par exemple) ou si le lien entre le dimensionnement et la performance dépend du fonctionnement de l'ensemble du système (par exemple, la perméabilité d'un scellement donné influe certes sur la limitation des flux d'eau, mais au sein d'un ensemble plus vaste conditionné par d'autres paramètres), il n'est guère utile de fixer un niveau de performances a priori ;
- une durée pendant laquelle la disponibilité de la fonction est requise ;
- un ou des composants qui doivent assurer la fonction, et le ou les phénomènes physiques qui permettent à ces composants de la remplir. Dans le cas particulier de la sûreté en phase de post-fermeture, et compte tenu des longues échelles de temps en jeu, ne sont retenus comme composants ayant une fonction de sûreté que la formation hôte, les colis de déchets, les éléments ouvrages apportés par l'homme (scellements, conteneurs, remblais, etc.). Les autres éléments présents dans le stockage du fait des conditions d'exploitation ou par son évolution naturelle (jeux fonctionnels au sein des alvéoles de stockage, gaz de corrosions générés au sein du stockage, etc.) ne peuvent remplir de fonction car la description de leur évolution à long terme est entachée de trop d'incertitudes.

Une fonction peut, selon les cas :

- être disponible, éventuellement sous une forme dégradée, au delà de la période prise en compte par le concepteur. On parle alors de « fonction de réserve », la durée de cette réserve ne pouvant pas toujours être quantifiée. Mais identifier les réserves donne confiance dans le fait que le système dispose d'une meilleure sûreté que ce qui est strictement prévu et quantifié ;
- être disponible avec un niveau de performances supérieur à celui pris en compte par le concepteur. On parle alors de « marge » sur la performance, c'est-à-dire que le concepteur ne tire pas parti de l'ensemble des performances qu'il pourrait attendre. L'existence de marges contribue également à la confiance. L'existence d'un phénomène favorable à la sûreté mais non pris en compte en tant que fonction peut à la fois être considéré comme une réserve ou comme une marge ;
- enfin, une fonction peut être latente, c'est à dire qu'elle n'agit pas du fait de l'existence d'une autre fonction. Par exemple, le confinement apporté par la matrice d'un déchet est latent tant que celui-ci n'est pas soumis à l'action de l'eau, c'est à dire tant que le conteneur parvient à l'en protéger. L'existence de fonctions latentes permet de gérer des pertes de fonctions accidentelles (par exemple, ici, une perte d'étanchéité du conteneur).

Une illustration des marges et des fonctions de réserve est fournie par la Figure 3.5-1.

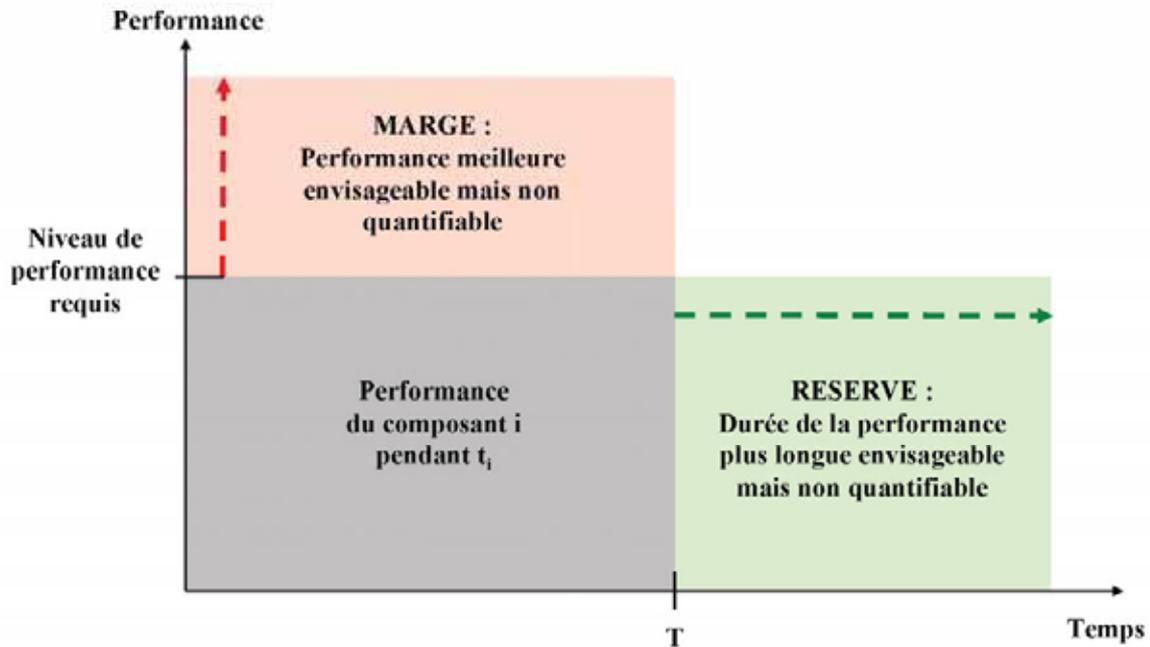


Figure 3.5-1 Illustration des marges et des fonctions de réserve

Dans la suite de ce chapitre, l'état de la conception est présenté. On ne cherchera pas à ce stade à justifier que la conception permet de répondre aux objectifs de sûreté, ni à vérifier le niveau de performances de chaque fonction ; tel est l'objet des chapitres suivants sur l'évaluation des performances. Il s'agit ici d'exposer le schéma des fonctions de sûreté proposées par le concepteur au sein du système de stockage, de s'assurer de leur complémentarité, de l'existence de redondances, de marges, de réserves, d'identifier les fonctions latentes. On explique ainsi sur quelle stratégie de sûreté s'est appuyé le concepteur pour guider les choix tout au long du développement des concepts.

Lors de la présentation des fonctions, on identifie les dispositions de conception et les principaux phénomènes physico-chimiques en lien avec ces fonctions. Ces phénomènes peuvent être favorables (auquel cas les fonctions de sûreté doivent en tirer parti) ou défavorables (auquel cas les fonctions doivent permettre de se prémunir contre leurs effets). Ils peuvent, le cas échéant, n'être de manière tranchée ni l'un ni l'autre, et sont simplement à prendre en compte. La vérification que le système, une fois conçu, est robuste face à un ensemble plus vaste de perturbations, de phénomènes particuliers, sans nécessairement préjuger qu'ils sont favorables ou non, est l'objet des analyses de sûreté ultérieures (chapitres 5 et suivants).

Encadré 3

La méthode mise en œuvre pour l'analyse fonctionnelle

Cet encadré explique selon quelle méthode a été établi le découpage en fonctions de sûreté. Il n'est pas indispensable à la lecture du résultat de l'analyse, mais permet de comprendre quelle garantie de systématisme elle présente.

L'établissement des fonctions de sûreté procède d'une analyse fonctionnelle interne, à la fois pour la phase d'exploitation – observation et en post fermeture [24, 25]. Dans le premier cas, on s'est appuyé sur le retour d'expérience d'installations qui sont amenées à gérer des colis de déchets ou de combustibles usés de haute activité pour définir des fonctions de sûreté classiquement retenues dans un tel cas.

Pour la phase de post-fermeture, il s'agissait de définir une méthode garantissant le systématisme du recensement des fonctions, dans un contexte où le retour d'expérience est plus faible. L'Andra a retenu d'appliquer une méthode s'appuyant sur l'organisation des fonctions sous forme d'arborescence [39] et l'identification de « flux ». Une fonction étant une action d'un composant sur son environnement, cette action peut toujours être interprétée en terme de gestion d'un flux. Par exemple, une fonction de confinement consiste à ralentir ou bloquer un flux de radionucléides. Une fonction de dissipation de chaleur gère un flux thermique.

Identifier des fonctions de sûreté revient alors à identifier des flux qu'il importe de maîtriser. Le flux de radionucléides et de toxiques chimiques au sein du stockage est bien sûr le flux le plus évident, mais d'autres sont à prendre en compte également :

- le flux d'eau au sein du stockage, dans la mesure où le concept du stockage dans l'argile repose sur la minimisation des circulations d'eau ;
- les flux de contraintes thermiques, chimiques ou mécaniques s'ils sont susceptibles de perturber les qualités des composants.

La méthode consiste par conséquent à suivre les flux importants et à s'assurer que des fonctions permettent de les maîtriser. Cette vérification ne permet pas de garantir une complétude du dispositif fonctionnel, puisque celui-ci ne peut être par définition complet : il traduit un choix du concepteur parmi l'ensemble des manières possibles de définir et d'agencer des fonctions de sûreté. En revanche, elle permet de s'assurer de la cohérence de l'analyse.

Pour illustrer la méthode, on peut par exemple expliquer comment ont été dérivées les trois fonctions principales permettant de gérer le risque de dispersion par l'eau des radionucléides (déjà évoquées au paragraphe 3.4.3).

Le risque est celui lié à l'action de l'eau. Il s'agit donc dans un premier temps de « capter » ce flux, c'est-à-dire d'en gérer l'arrivée. Une première fonction doit donc permettre de s'assurer que les circulations d'eau sont sous contrôle, et que les flux sont limités (fonction « s'opposer à la circulation d'eau »). Ce flux est ensuite « transformé » : l'eau est susceptible de se charger en radionucléides. Il faut donc définir les moyens de s'opposer à ce phénomène, c'est-à-dire empêcher la mise en solution des radionucléides et leur transport par l'eau (fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »). Enfin, tout flux « entrant » doit « sortir » du système. Cette sortie doit également être gérée. Une fonction permet de s'assurer que les radionucléides circulent le plus lentement possible et que les flux sont réduits (fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »). Le suivi des flux par la méthode capter/transformer/restituer permet de s'assurer du caractère systématique de la décomposition fonctionnelle.

La conception est de plus « contrainte » par des éléments qui échappent à l'action du concepteur. Parmi ceux-ci, on peut citer :

- les recommandations de la RFS III.2.f (limitation des flux d'eau, protection des colis...) qui guident la conception en orientant les choix principaux ;
- certains objectifs qui ne découlent pas directement de l'objectif de sûreté du stockage, mais que le concepteur estime nécessaire de remplir à titre complémentaire. Il peut s'agir par exemple de prévenir l'occurrence d'événements qui, sans contribuer directement à accélérer ou augmenter les flux de radionucléides, sont de nature à mettre en péril ou à compliquer l'analyse de sûreté. Par exemple, empêcher un

accident de criticité à long terme au sein du stockage permet d'éviter de prendre des dispositions pour étudier de manière détaillée les performances des composants soumis à un flash ;

- des exigences autres que celles de la sûreté, par exemple, celles liées à la réversibilité.

L'ensemble de ces éléments est considéré comme des « contraintes ». Les contraintes sont mentionnées dans l'analyse fonctionnelle pour mémoire. Dans certains cas, elles orientent le découpage d'une fonction en sous-fonctions.

D'autres méthodes auraient probablement conduit à un autre agencement des fonctions de sûreté entre elles, et à une expression différente des contraintes. Mais, dans la mesure où l'analyse fonctionnelle restitue l'état des connaissances et les choix du concepteur, la liste des fonctions identifiées au terme de l'analyse aurait été proche.

3.6 Analyse des fonctions de sûreté en phase de construction, exploitation et observation

Le présent paragraphe traite de manière générique des dispositions de sûreté adoptées pendant les opérations de construction, exploitation, observation et fermeture du stockage.

Les opérations de construction s'assimilent à des techniques minières classiques, dont la spécificité réside essentiellement dans la prise en compte dès ce stade des contraintes induites par la sûreté en exploitation et à long terme. La maîtrise de l'endommagement de la paroi des galeries et des alvéoles, en vue d'améliorer la sûreté en phase de post-fermeture, en est un exemple. Ces dispositions particulières sont évoquées dans la suite du présent chapitre, au paragraphe 3.7.3.1, dans le contexte de la sûreté à long terme.

On notera par ailleurs que le tome évaluation de sûreté est organisé de manière à regrouper dans un chapitre dédié, le quatrième, l'ensemble des problématiques relatives à la sûreté d'exploitation (dispositions de prévention et de protection, analyse de risques, évaluations de situations accidentelles potentielles). On reste donc, au niveau du présent paragraphe, à un stade générique. Ne sont citées que les grandes options de sûreté adoptées vis-à-vis des fonctions à accomplir.

3.6.1 Confiner la radioactivité

En ce qui concerne la protection des personnes vis-à-vis de l'exposition interne, la RFS III.2.f. recommande que les déchets soient conditionnés sous une forme non dispersable. Il faut néanmoins considérer l'éventualité de relâchements atmosphériques résultant d'opérations de traitement, de dégagement de radionucléides gazeux ou de remise en suspension de la contamination labile des colis.

Le besoin de confinement de la radioactivité pour le stockage se ramène donc d'abord à la prévention de la contamination, laquelle peut être provoquée soit par contact avec des surfaces elles-mêmes contaminées, soit par émission de gaz et d'aérosols radioactifs.

Ainsi, il convient de prévoir les dispositions pour détecter les sources de contamination éventuelles (assemblages de combustibles usés ruptés, contamination de surface sur les moyens de transport, les emballages et les colis primaires), remédier à ces sources de contamination de façon préventive (par exemple, en refusant de prendre en charge des assemblages nus ruptés) ou éventuellement curative (en décontaminant).

Les colis primaires susceptibles de relâcher des radionucléides sous forme gazeuse sont autant que possible rendus étanches au gaz, sauf dans le cas où l'émission de gaz de radiolyse conduirait à des surpressions ou des concentrations non admissibles. Dans ce cas, ni les colis primaires, ni le complément de colisage qui peut leur être ajouté à l'entrée du stockage ne sont étanches, et une attention particulière est portée à la ventilation.

De manière générale, un zonage adapté au risque de confinement pourra être mis en place dans l'installation.

3.6.2 Protéger les personnes contre l'irradiation

L'exposition radiologique des personnes pourrait être optimisée dans le cadre des études détaillées d'un stockage, en tenant compte des facteurs techniques et économiques (principe ALARA).

Pour le public, du fait de la distance avec les installations nucléaires de surface, seule apparaît potentiellement significative l'exposition due aux rejets par la cheminée. L'impact des gaz radioactifs libérés par les colis a ainsi fait l'objet d'une première évaluation (voir chapitre 4). Il convient aussi de prendre en compte le radon qui pourrait être émis naturellement par les terrains, puis capté par la ventilation, ce qui pourra être fait dans le cadre du développement du projet d'un éventuel stockage.

La protection du personnel passe par le dimensionnement des écrans de protection radiologique et par la définition des conditions d'accès et d'occupation des différents locaux soumis au rayonnement. On trouvera au chapitre 4 une description plus détaillée des dispositions adaptées à chaque configuration, normale ou accidentelle.

Une classification des locaux en matière de risque d'irradiation peut être mise en place.

En ce qui concerne les sources mobiles, notamment les hottes de transport des colis de déchets, aucun poste de travail permanent n'est prévu à proximité immédiate lors des opérations de transfert de ces sources. Les débits de dose sont limités de ce fait.

3.6.3 Rester sous-critique

L'ensemble des colis et des installations reste sous-critique en fonctionnement normal, par conception et de manière déterministe. Des études de configurations accidentelles sont également conduites, permettant de vérifier la sous-criticité dans toute la gamme des situations d'exploitation.

Au stade actuel, on s'assure de l'état sous-critique des colis de déchets et des installations par différents modes de contrôle (géométrie de l'agencement des matières fissiles, masse de matières fissiles, et éventuellement concentration s'il y a présence de phases liquides). On trouvera au chapitre 4 des éléments plus détaillés sur les conclusions des études de criticité.

Même s'il convient de s'assurer de l'absence de risque de criticité pour les colis de déchets B et C, le risque principal est a priori dû aux combustibles usés. On notera que le concept retient, pour des raisons liées essentiellement à la criticité, de se limiter à quatre assemblages UOx par conteneur, ou un assemblage MOX. Les études de criticité (voir chapitre 4) montrent qu'une telle disposition permet d'assurer la sous-criticité des conteneurs pendant l'exploitation. Seuls quelques combustibles UOx, s'ils présentaient des taux de combustion faibles (représentant une portion très faible des assemblages), nécessiteraient d'être stockés seuls. Une installation de mesure du taux de combustion des assemblages, destinée à identifier de telles situations, serait mise en place en surface.

3.6.4 Évacuer la puissance thermique résiduelle des déchets

L'évacuation de la puissance thermique renvoie en grande partie à des préoccupations liées à la phase de post-fermeture : il s'agit notamment d'éviter de placer les matrices de déchets ou les matériaux du stockage dans des conditions de température qui puissent être préjudiciables à leur évolution à long terme.

Des critères de protection des opérateurs seront également définis. Pour les respecter, la ventilation peut participer à l'évacuation de la puissance thermique résiduelle.

3.6.5 Évacuer les gaz de radiolyse

L'évacuation de ces gaz se fait par la non étanchéité des colis et du complément de colisage associé, et par la mise en place d'une ventilation adaptée de manière à respecter les critères exprimés en termes de fraction de la limite de concentration explosive dans l'air, ou de valeurs limites et moyennes d'exposition à des gaz toxiques.

En particulier, lors d'éventuelles opérations de retrait de colis B, il conviendra de s'assurer au préalable que l'atmosphère au sein de l'alvéole permet une intervention, et de prendre des dispositions pour évacuer les gaz en cas de besoin.

3.7 Analyse des fonctions de sûreté en phase de post-fermeture

On évoque ici à nouveau les fonctions de sûreté en phase de post-fermeture, en introduisant en regard les dispositions d'architecture prises pour les accomplir.

3.7.1 Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines

Le choix d'installer le stockage en profondeur (en l'occurrence 500 mètres au minimum) écarte les déchets de phénomènes d'érosion et d'activités humaines banales. Celles-ci n'affectent, à l'échelle de centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur superficielle de terrain. Le choix d'une zone se situant à l'écart des influences volcaniques empêche une remontée à la surface des déchets sous l'action d'un tel phénomène. Les risques de mouvements verticaux importants à l'échelle du stockage, du fait de la géodynamique interne, ont été étudiés [17] et permettent d'exclure tout mouvement de nature à déplacer de manière significative les déchets. Les phénomènes glaciaires et subglaciaires, dans le contexte du site de Meuse / Haute-Marne, n'affectent pas significativement des profondeurs supérieures à 150 mètres. La RFS III.2.f. recommande, plus généralement, que le site soit stable au regard des phénomènes tectoniques et climatiques susceptibles de l'affecter, et ce sur une période d'au moins 10 000 ans. Il apparaît que la formation hôte est stable depuis des durées bien plus importantes [17], et aucun indice ne permet de présager que cette situation puisse se modifier à échéance du prochain million d'années.

Dans ce contexte, les déchets ne peuvent remonter à la surface que par une action volontaire de l'homme, sous forme d'un forage. Ce risque est limité par l'absence de ressources à caractère exceptionnel dans l'environnement du stockage, qui rend très peu vraisemblable une prospection souterraine en vue d'exploiter un gisement de minerais, ou une source d'eau. De ce point de vue, le site de Meuse / Haute-Marne et sa région offrent des garanties conformes aux recommandations de la RFS.III.2.f. : ils se trouvent à l'écart des ressources charbonnières ou pétrolières du bassin de Paris. Les ressources en charbon exploitables se développent plus au nord du secteur, dans le prolongement du bassin sarro-lorrain ; concernant le pétrole, les investigations conduites notamment par l'Institut français du pétrole (IFP) dans les années 70 et 80 ont montré que les zones d'intérêt se situaient plus à l'ouest, vers le centre du bassin [17, chapitre 8]

Par ailleurs, pour ce qui relève d'éventuelles ressources géothermiques, les données cartographiques les plus récentes obtenues par le Bureau de recherche géologique et minière (BRGM) ne montrent pas un intérêt particulier de la zone du site de Meuse / Haute-Marne, ce que corroborent les observations par forage de l'Andra. Les formations sous-jacentes au Callovo-Oxfordien ne sont pas assez aquifères pour présenter un intérêt, les ressources potentielles se trouvant plus à l'est dans la région de Nancy. Elles présentent de plus une salinité élevée à très élevée, défavorable à une exploitation géothermique [17, chapitre 9].

On notera que, dans le cadre d'une démarche de défense en profondeur et afin de prendre en compte tout risque de forage intrusif interceptant la zone du stockage, y compris si ce forage n'est pas motivé par la recherche d'une ressource naturelle, ce type d'événement est cependant pris en compte dans la conception (voir paragraphe 3.7.3.1), et un scénario de forage intrusif est également traité dans l'analyse de sûreté (voir chapitre 7).

3.7.2 Préserver la mémoire du stockage

Dès la genèse du centre de stockage, donc à partir de la phase de recherche initiale, la mémoire du centre est progressivement constituée par la préservation des connaissances et des données liées à la conception du centre, à la justification de cette conception et de la démonstration de sûreté associée, à la réalisation du centre puis à son exploitation, ainsi qu'à la maîtrise des colis de déchets mis en place, et enfin aux fermetures progressives des ouvrages de stockage, jusqu'à la fermeture définitive du

centre. L'ensemble de ces phases aura une durée minimale de l'ordre du siècle, voire beaucoup plus selon l'ampleur souhaitée pour la réversibilité.

Pour gérer ces connaissances, le concepteur, puis l'exploitant, du stockage pourraient disposer d'un système d'informations et de bases de données. Il pourrait être fait appel à ce système pour la maintenance des installations. De sorte à ne jamais perdre la mémoire des connaissances capitalisées, ce système d'informations pourrait faire l'objet de plusieurs dispositifs de protection tant pour les connaissances en elles-mêmes que pour les outils et matériels capables de les exploiter. La redondance de l'archivage, sur des supports distincts et/ou dans des lieux différents, est un moyen couramment utilisé pour préserver les informations en cas d'accident. La préservation des données ne devrait pas poser de problème tant que le stockage sera en phase d'exploitation, car l'exploitant aura besoin du corpus des connaissances acquises et accumulées de manière quasi-quotidienne.

Au-delà de cette première grande phase, de l'ordre du siècle, on peut illustrer la préservation de la mémoire en se fondant sur le retour d'expérience des dispositions mises en œuvre ou envisagées pour le Centre de stockage de la Manche, où la fin du stockage des derniers colis date de 1994. Cet exemple ne préjuge pas des dispositions qui seront mises en œuvre pour le stockage profond. La préservation de la mémoire du Centre de stockage de la Manche repose sur quatre dispositifs : la réalisation d'une « mémoire détaillée » et d'une « mémoire de synthèse » du centre de stockage, des servitudes déposées à terme au cadastre, et des dispositions de communication.

La « mémoire détaillée » du centre de stockage est composée d'une sélection de l'ensemble des connaissances accumulées et gérées jusqu'à la fin du stockage. Cette sélection est réalisée en premier lieu à partir de l'analyse des risques identifiés, de façon à garantir qu'aucune connaissance liée aux risques ne soit perdue, ensuite pour garantir la traçabilité complète des événements liés à ces risques, et enfin dans une finalité purement historique. Cette « mémoire détaillée », au-delà de la mémorisation de l'existence du centre de stockage, permet également de maintenir la maîtrise technique du stockage, de comprendre tous les phénomènes éventuellement observés (problématique qui se pose avec plus d'acuité en surface qu'en profondeur) et d'y apporter des solutions appropriées lorsque nécessaire. La « mémoire détaillée » est conservée sur le site ainsi qu'aux archives nationales, au centre des archives contemporaines. L'utilisation de supports spéciaux, tels le papier « permanent » (voir Figure 3.7-1), permet une durée de conservation de l'ordre de trois à cinq siècles. Il pourrait également être envisagé de la dupliquer à intervalles de temps réguliers.

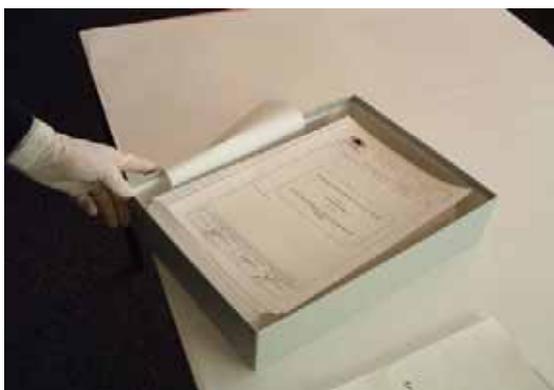


Figure 3.7-1

« Mémoire détaillée » réalisée sur du papier permanent et conservée aux Archives nationales de France, centre des archives contemporaines

La « mémoire de synthèse » est un élément supplémentaire de défense en profondeur proposé par la Commission Turpin en 1996 [40] pour l'évaluation de la situation au Centre de stockage de la Manche. Il s'agit de retracer de façon succincte, en une seule boîte d'archives dans la mesure du possible, l'historique du centre de stockage, sa topographie, l'inventaire général des déchets qui y sont

stockés, les précautions à prendre, les risques encourus... L'objet de cette « mémoire de synthèse », largement diffusée aux décideurs locaux, régionaux et nationaux est de leur fournir des informations facilement accessibles et compréhensibles sur le centre de stockage, de façon à leur permettre de prendre toute décision en connaissance de cause sur le devenir du centre, notamment les aménagements possibles en surface.

Des servitudes pourront être déposées au cadastre, qui viseraient par exemple à interdire tout forage ou sondage dans l'emprise du stockage. Compte tenu de l'importance du cadastre dans la gestion des sols, on peut raisonnablement estimer que ces servitudes porteraient bien leurs effets sur une durée de plusieurs siècles, du même ordre de grandeur que la durée prévue pour la « mémoire de synthèse ».

La Commission Turpin a également proposé de faire perdurer, au-delà de la phase d'exploitation, une commission locale d'information et de surveillance de manière à entretenir un dialogue entre l'exploitant du centre de stockage ou l'entité chargée de sa surveillance, les représentants locaux de l'État, les élus locaux et les représentants de la population et des associations. Ce dialogue, entre autres finalités, permet de conserver au fil des générations la mémoire de l'existence du centre de stockage, mais aussi des deux « mémoires » précédemment décrites. De ce point de vue, ces dispositions constituent un élément de défense en profondeur.

Ces éléments, transposés au cas du stockage profond, amènent à considérer la durée de l'ordre de cinq siècles de préservation de la mémoire du centre, proposée par la RFS III.2.f., comme réaliste. Au-delà, il est difficile de garantir que les deux « mémoires » seront bien dupliquées régulièrement et sans perte d'information. Si la mémoire de l'existence du centre de stockage doit encore être préservée, des réflexions internationales sont en cours pour étudier l'intérêt de marqueurs en surface (par exemple sous la forme de mégalithes, d'ouvrages d'art...) pour une durée de plusieurs millénaires. Cette réflexion se heurte au risque de vol ou de dégradation de ces marqueurs de surface, et dans le cas où ils seraient réellement préservés, à la difficulté d'en retrouver le sens réel que nos générations leur auront donné.

3.7.3 S'opposer à la circulation d'eau

On s'intéresse ici à la maîtrise des circulations d'eau au sein du système de stockage. Celle-ci est assurée d'abord par les propriétés de la roche, en particulier sa faible perméabilité. Un ensemble de dispositions de conception permet de préserver ces propriétés et de les reconstituer là où elles ont pu être perturbées.

Les formations géologiques profondes sont initialement saturées en eau. Dans le cas des argilites du Callovo-Oxfordien, il s'agit d'une eau interstitielle intimement liée à la matière elle-même. Le creusement des ouvrages de stockage désature en partie le milieu, de manière locale, et perturbe les pressions hydrauliques. Le retour à l'équilibre s'effectue progressivement après la fermeture du stockage.

Dans une période transitoire après la fermeture des installations souterraines de stockage, un transitoire hydraulique se met en place sur des durées qui varient selon les ouvrages considérés (voir paragraphe 3.2.4). Au-delà, les écoulements suivent globalement le gradient hydrogéologique naturel. Le renouvellement d'eau au voisinage des déchets constitue le principal facteur susceptible d'altérer les colis, et de permettre le relâchement de radionucléides à l'intérieur du stockage. Une circulation convective de cette eau est aussi un vecteur potentiel d'entraînement des radionucléides.

Aussi, un premier ensemble de sous-fonctions vise à s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage ; il s'agit de :

- limiter le débit d'eau provenant des formations géologiques sus-jacentes, traversées par les ouvrages d'accès (voir paragraphe 3.7.3.1) ;
- limiter le débit d'eau provenant de la formation hôte du Callovo-Oxfordien (voir paragraphe 3.7.3.2) ;
- limiter la vitesse de circulation de l'eau entre le stockage et les formations sus ou sous-jacentes (voir paragraphe 3.7.3.3).

3.7.3.1 Limiter le débit d'eau provenant des formations géologiques sus-jacentes, traversées par les ouvrages d'accès

Cette fonction contrôle le débit d'eau dans le stockage en limitant la progression de l'eau par les cheminements privilégiés que constituent les voies d'accès remblayées du stockage. Celles-ci mettent en effet en relation les formations sus-jacentes, plus ou moins aquifères, avec le stockage lui-même. L'objectif est ici double : avant resaturation, cette fonction permet de retarder l'arrivée d'eau sur les colis de déchets, et de s'assurer par ailleurs que la saturation des ouvrages est contrôlée majoritairement par le débit d'eau provenant de la formation hôte, dont la chimie est mieux maîtrisée. Après resaturation, elle contribue à la limitation des circulations d'eau au sein du stockage.

En premier lieu, le regroupement des puits d'accès est une option retenue à ce stade du projet. L'implantation des puits groupés, et excentrés par rapport aux zones de stockage annule pratiquement la différence de charges entre eux au sein des formations plus aquifères traversées, et la composante associée dans les ouvrages liés au gradient horizontal dans les aquifères. Seul intervient le gradient vertical, ascendant ou descendant, dans l'argilite.

● **Limitation de la zone endommagée**

Une fois cette disposition générique posée, il convient d'étudier plus avant les différentes voies de passage possibles pour l'eau, au sein des ouvrages. En plus des voies d'accès à proprement parler (remblais et revêtement laissé en place), la zone d'argilites endommagées par le creusement, qui borde les ouvrages, constitue elle aussi une voie privilégiée potentielle.

On distingue au sein de celle-ci trois zones : la zone fracturée, la zone microfissurée, la zone influencée [7].

La zone fracturée, au plus près des ouvrages, apparaît si le seuil de rupture des argilites, qui correspond à la résistance maximale de la roche, est dépassé ; elle se caractérise par l'apparition de fractures plus ou moins connectées et pouvant induire une augmentation de la perméabilité de la roche.

La zone microfissurée apparaît soit derrière la zone fracturée, soit directement au contact des ouvrages si la zone fracturée n'existe pas. La décharge mécanique liée au creusement des ouvrages a pour effet des déformations qui se traduisent sous la forme d'une microfissuration diffuse peu connectée. Cette faible connectivité limite l'augmentation de la perméabilité.

La zone influencée, qui s'étend au-delà de la zone microfissurée, n'est le siège que de modifications limitées du champ de contraintes, sans incidence sur les propriétés de la roche (notamment hydrauliques). Elle ne se distingue pas, en pratique, de la roche saine.

On utilisera le terme de « zone endommagée » ou le sigle anglais « EDZ » pour désigner l'ensemble constitué par les zones fracturée et microfissurée (voir Figure 3.7-2).

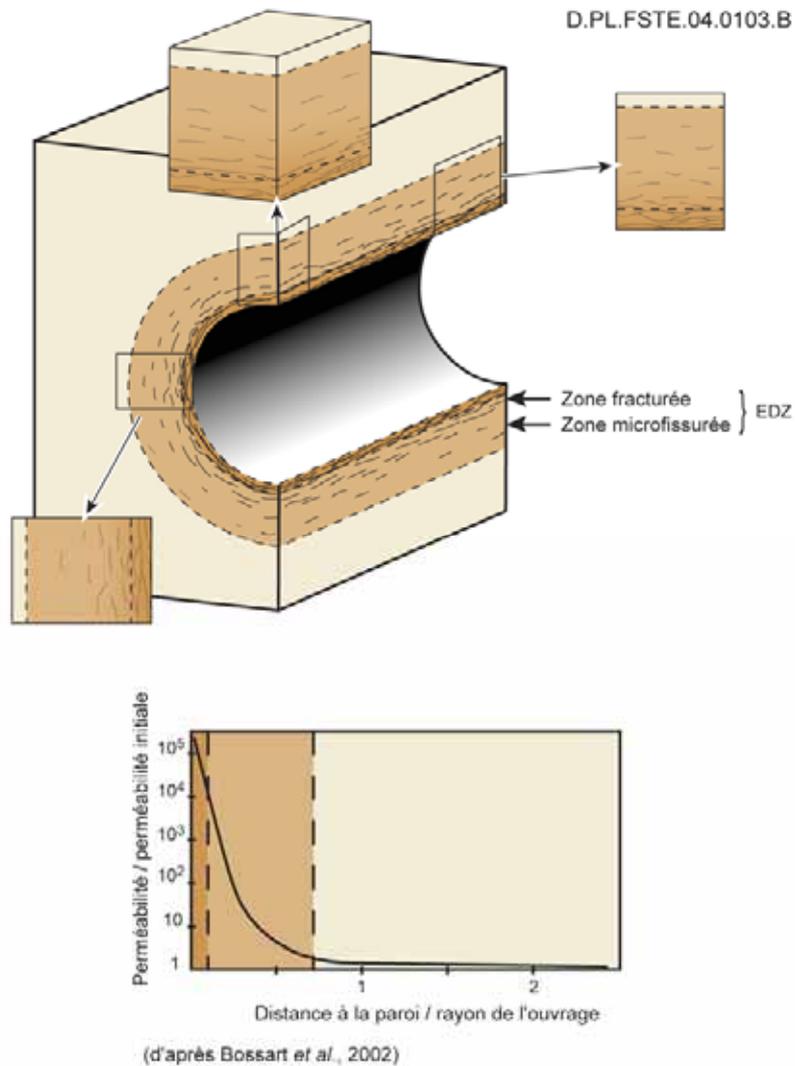


Figure 3.7-2 Représentation de la zone endommagée (EDZ)

La zone fracturée peut constituer une zone de circulation privilégiée de l'eau, au même titre que les remblais. C'est moins probable pour ce qui concerne la zone microfissurée, du fait de la faible connectivité de l'endommagement.

Deux types de dispositions de conception sont mis en œuvre pour assurer la limitation du flux d'eau dans les galeries. Les premières visent à limiter la formation de la zone endommagée, et en particulier fracturée, ou à empêcher son extension après le creusement, à court et long terme. Les autres visent à intercepter les voies d'accès.

Les techniques de creusement à employer pour réaliser le stockage ne sont pas figées à ce stade du projet ; il existe une variété de techniques minières, déjà éprouvées dans d'autres contextes, qui permettent de limiter l'endommagement. À titre d'illustration, on peut mentionner que, pour la réalisation de puits de grand diamètre, la méthode traditionnelle consiste à foncer le puits à partir de la surface en abattant la roche à l'explosif ou à la machine à attaque ponctuelle, et à mettre en place au fur et à mesure du fonçage le soutènement et le revêtement du puits. Cette méthode est bien adaptée aux diamètres envisagés pour les puits, mais peut être combinée à d'autres le cas échéant.

Pour les galeries, la technique de la machine à attaque ponctuelle (voir Figure 3.7-3) ou le creusement à l'explosif en pleine section, peuvent s'avérer des méthodes adaptées selon les cas.



Figure 3.7-3 Exemple de machine à attaque ponctuelle de grande puissance

L'orientation de la plupart des ouvrages (galeries d'accès accueillant les scellements, alvéoles) dans la direction de la contrainte mécanique principale majeure est également une disposition permettant de réduire l'extension de la zone endommagée. La mise en place du soutènement, puis du revêtement, en paroi d'alvéole permet de contraindre les déformations différées de la roche, lors de la phase d'exploitation et très au-delà, jusqu'à ce que le béton perde progressivement sa résistance mécanique. Elle doit cependant s'effectuer en évitant de créer un endommagement supplémentaire, particulièrement à hauteur des futurs scellements (voir plus loin).

Dans le puits, le soutènement en béton est mis en place par boulonnage. Pour minimiser l'endommagement de la roche dans les zones de scellements, on pourra adapter la méthode de creusement. De même, plutôt que des boulons, on pourra utiliser du béton projeté et/ou des cintres. Dans les galeries, on cherche une rigidité maximum du revêtement pour minimiser l'extension de la zone endommagée, et on ne prévoit pas non plus de mettre en place de boulons, à proximité des scellements.

L'endommagement peut être a priori accentué par les conditions régnant en exploitation : oxydation de la roche, désaturation renforcée en paroi sous l'effet de la ventilation des ouvrages, etc. Ces phénomènes ont une influence réduite et ne modifient ni la nature, ni l'ordre de grandeur de la zone fracturée. Dans le cadre de la réversibilité, il apparaît prudent de ne pas contraindre dès à présent la durée pendant laquelle des galeries pourraient être laissées ouvertes, de manière à laisser aux générations futures la plus grande latitude pour organiser la gestion du stockage. La stratégie est donc, compte tenu de l'impact faible de l'oxydation de la roche, d'évaluer l'influence de l'oxydation sur la roche sans prendre a priori de disposition de conception pour y parer, autre que des mesures de protection classiques (parement pour que la roche ne soit pas à nu).

Lors de l'exploitation, peu après fermeture, la zone endommagée pourrait évoluer du fait du fluage de la roche. La RFS.III.2.f. recommande d'étudier ses propriétés mécaniques, qui sont un « *critère important* ». Les argilites présentent un fluage très lent, qui est favorable [17]. Le rôle de soutien mécanique assuré d'abord par le revêtement, puis par les remblais et les scellements à très long terme permet de limiter l'endommagement différé des argilites. Le remblai peut être constitué de béton ou d'argilites du site recompressées et mélangées le cas échéant à de l'argile gonflante ce qui lui permet en se resaturant de reprendre la charge due au fluage différé de la roche, après dégradation du revêtement.

Au niveau des alvéoles, le rôle de protection de la roche est tenu par la minimisation des vides. Le taux de vide résiduel autour des colis de stockage ne dépasse pas 5 % du volume total (voir Figure 3.7-4). Il est compatible avec la manutention des colis dans l'alvéole et avec leur récupérabilité. À long terme, quand les colis de stockage n'assurent plus un rôle de soutien mécanique, les vides à prendre en compte sont à la fois ceux dus aux jeux de mise en place, mais également ceux internes aux colis primaires, ainsi que la porosité des matériaux.

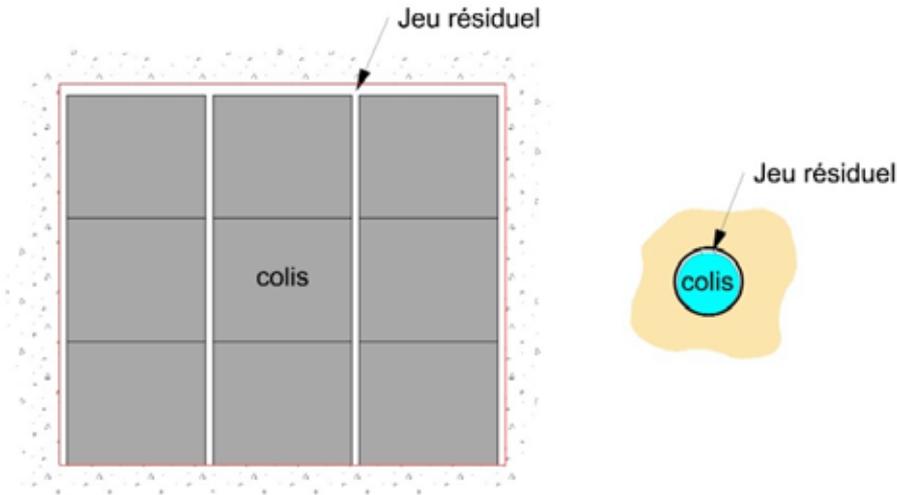


Figure 3.7-4 Taux de vide résiduel dans les alvéoles (principe des alvéoles de déchets B – à gauche et des alvéoles de déchets C – à droite)

Il convient également d'éviter que la zone fracturée, une fois formée, ne se dégrade à long terme par d'autres actions que celles strictement dues au mouvement de la roche : interactions chimiques, interactions mécaniques dues aux gaz, etc. Une contrainte prise en compte est liée aux possibles déformations d'origine thermomécanique à proximité des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés. C'est une des raisons conduisant à limiter la chaleur issue des déchets et à en maîtriser les flux (voir paragraphe 3.7.6).

- **Maîtrise hydraulique des voies d'accès**

Afin de limiter les circulations d'eau, il est nécessaire de reconstituer une faible perméabilité au sein des voies d'accès. Cette fonction est attribuée à des dispositifs particuliers, les scellements, et non au remblai comme cela aurait également pu être imaginé a priori.

En effet, les remblais employés au sein du puits et des galeries pourraient limiter le débit d'eau par leur perméabilité propre. À ce stade du projet, il ne leur est cependant pas attribué de fonction particulière sur ce point. Une perméabilité de l'ordre de 10^{-8} m/s est atteignable mais n'est pas un paramètre dimensionnant pour le projet. En effet, les revêtements laissés en place dans le puits et les galeries constituent, en limite du remblai, des zones qui en se dégradant pourront être d'une perméabilité significativement supérieure et court-circuiter le remblai quelle que soit sa perméabilité.

La fonction repose donc sur les différents scellements mis en place dans les ouvrages : scellements de puits et de galerie, scellements d'alvéoles B et à titre complémentaire bouchons d'alvéoles C et de combustibles usés (dont on verra plus loin que leur fonction première est autre). Ces ouvrages sont constitués par un corps très peu perméable, en argile gonflante (de la bentonite, argile gonflante « MX80 »). Une fois que celui-ci a été resaturé, il permet :

- d'intercepter les voies d'accès elles-mêmes ;
- d'assurer un contact très peu perméable avec la paroi de la roche, en exerçant une pression sur elle au fur et à mesure qu'il gonfle.

Une telle pression est suffisante pour comprimer la zone fracturée si elle demeure d'une extension modérée et restaurer des propriétés hydrauliques performantes. La disposition de scellements redondants au sein des différentes voies d'accès (puits, galeries, modules) permet un fractionnement du stockage en modules pour assurer un bon degré d'indépendance hydraulique. Cette disposition permet de se prémunir, de manière très générique, contre la propagation d'un incident affectant une petite partie du stockage à l'ensemble de l'installation. Un exemple emblématique de ce type d'incident est le forage traversant un module de stockage : on s'attend à ce que son influence reste limitée à un nombre restreint de modules. On pourra donc tester l'efficacité de cette disposition de protection dans le cadre du scénario d'évolution altérée « forage » (voir chapitre 7).

Les scellements de puits sont établis dans la partie supérieure de la formation d'accueil, plus carbonatée. Cette tranche correspond à un horizon géotechnique (horizon A) dont les caractéristiques mécaniques sont plus favorables. Les connaissances acquises conduisent à prévoir que le creusement des puits ne crée pas de zone fracturée dans cet horizon d'argilites. Il est prévu, pour la réalisation des scellements de puits, de déposer le revêtement sur des tronçons de hauteur plurimétrique, de façon à mettre l'argile gonflante en contact direct de l'argilite.

Les scellements de galeries seront situés au niveau principal du stockage, dans l'horizon géotechnique C, horizon médian plus argileux, aux caractéristiques différentes de celles de l'horizon A et à une profondeur, au niveau du site du laboratoire, de 500 mètres (voir Figure 3.7-5).

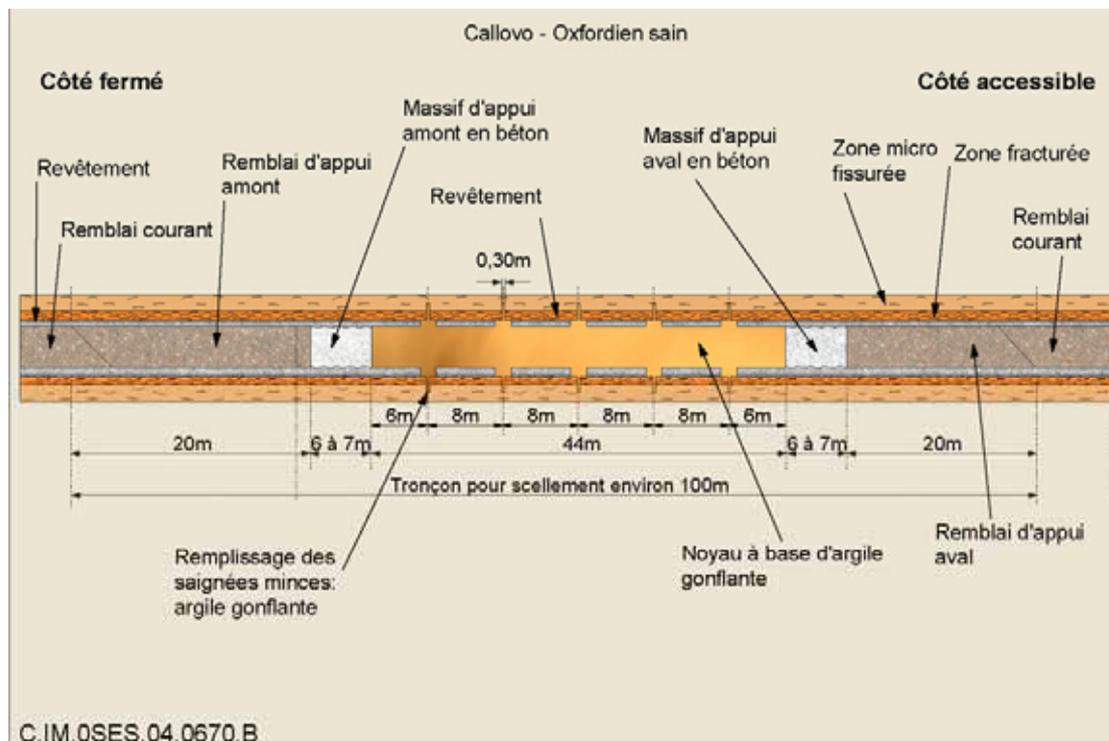


Figure 3.7-5

Schéma de principe des scellements de galerie

Les voies d'accès (les galeries en particulier) ont un diamètre tel que la zone fracturée qui peut s'y développer, proportionnelle à leur rayon, peut devenir importante vis-à-vis du seul corps de scellement. Il peut alors être nécessaire de l'intercepter par une coupure hydraulique, solidaire du corps.

Les dispositions de mise en place des scellements de galeries et d'alvéoles B consistent à créer une saignée dans la roche et à y insérer la coupure hydraulique en bentonite qui, en se saturant, exercera une pression suffisante sur le milieu géologique pour créer une discontinuité dans la zone fracturée et résorber localement cette dernière [41]. Des essais méthodologiques réalisés au Mont-Terri ont montré la faisabilité technologique de la mise en place d'une telle coupure [42]. Comptée à partir de la paroi d'excavation, sa profondeur peut atteindre celle de la zone microfissurée. L'Andra a cherché à minimiser la section des ouvrages à sceller, en particulier afin de limiter l'extension de la zone fracturée.

Les scellements sont adossés à un massif d'appui ou à un remblai en béton qui contribue à les mettre en pression au fur et à mesure qu'ils gonflent sous l'effet de la resaturation. Autour des scellements dans les galeries, un ajout de quartz dans les remblais permet de leur assurer un meilleur coefficient de frottement, toujours dans l'objectif de favoriser un gonflement des scellements dans la direction radiale.

Les performances des scellements en bentonite peuvent être sensibles à la perturbation apportée par l'eau ayant percolé dans le béton (perturbation alcaline) ou s'étant chargée en fer (interaction fer-argile). Ces interactions sont évaluées et peuvent conduire à des dispositions de protection spécifiques pour les scellements : dépose du soutènement à proximité, surdimensionnement de la longueur du corps pour disposer d'une masse « perdue » de bentonite faisant tampon, emploi d'un béton « bas pH » à proximité si le besoin s'en faisait sentir.

L'ensemble des dispositions prises à ce stade du projet pour remplir la sous-fonction « limiter le débit d'eau en provenance des formations géologiques sus-jacentes » se résume en définitive aux éléments suivants :

- regroupement des puits d'accès ;
- maîtrise des techniques de creusement et de soutènement ;
- orientation des ouvrages, autant que possible, dans le sens de la contrainte majeure (en particulier ceux dans lesquels sont mis en place des scellements et des bouchons) ;
- mise en place de scellements peu perméables ;
- rôle de soutien mécanique du remblai et des scellements ;
- minimisation des vides au sein des alvéoles et dans les colis de stockage (hors des colis primaires) ;
- ancrage des scellements dans la zone fracturée, voire au-delà, autant que nécessaire ;
- dimensionnement des scellements prenant en compte les perturbations alcaline ou ferreuse.

On notera que ces dispositions sont en grandes parties identiques à celles qui permettront d'assurer la fonction « limiter la vitesse de l'eau entre le stockage et les formations sus ou sous-jacentes ». Les mêmes dispositions servent les deux objectifs : limitation des arrivées d'eau et des possibilités de sortie de l'eau hors du système de stockage.

On constate qu'un large ensemble de dispositions complémentaires (visant à maîtriser l'EDZ ou à réduire la perméabilité d'ensemble des voies d'accès) contribue à la fonction. Une certaine redondance est assurée par la présence de dispositifs de scellements en série (dans les puits et dans la galerie).

3.7.3.2 Limiter le débit d'eau provenant de la formation hôte du Callovo-Oxfordien

Parallèlement à la maîtrise des voies d'accès, une autre sous-fonction vise à limiter les circulations d'eau provenant de la formation hôte elle-même. Cette fonction s'accomplit grâce au choix d'une roche, le Callovo-Oxfordien, très peu perméable et suffisamment homogène, et présentant des gradients hydrauliques faibles en son sein. Ces caractéristiques sont cohérentes avec les recommandations de la RFS III.2.f. Elles ont fait l'objet d'un programme d'investigation sur site, par forage et in situ, visant à confirmer et préciser ces propriétés favorables : mesures de perméabilité, vérification de l'absence de structures conductrices particulières.

Ce programme permet d'étayer les représentations conceptuelles de la formation hôte, utilisées notamment dans les calculs d'hydrauliques (voir chapitre 5).

Par ailleurs, les dispositions déjà évoquées précédemment (limitation de la zone fracturée, mise en place de scellements dans les ouvrages d'accès), de même qu'elles empêchent l'eau de circuler en provenance des formations sus-jacentes, empêchent également le stockage de drainer l'eau du Callovo-Oxfordien.

L'ensemble des dispositions prises à ce stade du projet pour remplir la sous-fonction « limiter le débit d'eau provenant de la formation hôte » se résume en définitive aux éléments suivants :

- choix d'une formation hôte peu perméable ;
- programme de reconnaissance de la formation hôte, depuis la surface, en laboratoire, et le cas échéant lors de la construction du stockage ;
- dispositions déjà invoquées précédemment (scellements, limitation de l'endommagement, etc.).

3.7.3.3 Limiter la vitesse de l'eau entre le stockage et les formations sus ou sous-jacentes

Une fois le stockage partiellement ou totalement resaturé, il s'agit de ralentir la vitesse des circulations d'eau hors du stockage. Cette fonction est très proche des deux premières dans ses effets. L'ensemble des dispositions de conception déjà évoquées dans les paragraphes 3.7.3.1 et 3.7.3.2 y contribue. Elle n'est par conséquent pas réellement redondante des deux premières, mais s'inscrit dans leur continuité.

Elle consiste à freiner la circulation de l'eau d'abord des premières zones resaturées vers les zones les moins saturées, puis dans la direction des écoulements naturels au sein de la formation. Si la fonction est efficace, la migration des radionucléides n'a pas de direction privilégiée et s'effectue de manière isotrope dans l'ensemble de la formation. Les scellements jouent de ce point de vue un rôle important.

On notera que, afin d'offrir une redondance au moins partielle avec les scellements dans le cas où ils seraient défectueux, l'Andra a de plus retenu une disposition des architectures sous forme d'une arborescence d'éléments borgnes, dont le principe est illustré sur la Figure 3.7-6. À chaque niveau de l'arborescence, (depuis la zone de stockage jusqu'à l'alvéole), on accède à chaque élément par des accès peu nombreux et regroupés. Le flux drainé vers les ouvrages d'accès dans chaque élément borgne se limite ainsi à celui qu'il peut échanger avec l'argilite, et les vitesses d'écoulement d'eau se trouvent ainsi réduites. Les flux ne se regroupent véritablement que loin des alvéoles, au niveau des galeries.

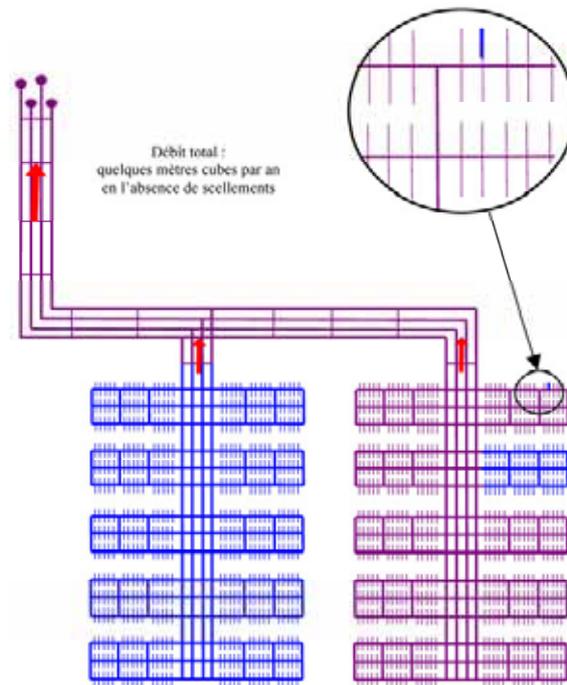


Figure 3.7-6 *Arborescence d'éléments borgnes*

Les performances globales des trois sous-fonctions dépendent in fine d'un ensemble de paramètres :

- certains liés au site, tels que la perméabilité de la roche et les gradients hydrauliques à l'emplacement du stockage ;
- certains liés à l'organisation du stockage : disposition des puits, architecture en cul-de-sac ;
- d'autres technologiques, liés à la performance qui peut être attendue des scellements. Une perméabilité en grand équivalente à 10^{-10} m/s, paraît un objectif minimal atteignable pour les scellements. À titre d'exemple, des mesures conduites dans le laboratoire du lac du Bonnet au Canada, au cours de l'essai TSX [43], ont montré une perméabilité équivalente de 10^{-11} m/s pour un scellement en bentonite ;
- d'autres enfin liés aux perturbations que peuvent apporter d'autres composants du stockage.

C'est l'objet des calculs d'hydraulique au sein du stockage que d'évaluer in fine la performance de ces fonctions.

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

La fonction présentée ici est une fonction en champ proche. Elle consiste soit à s'opposer physiquement au transfert des radionucléides, soit à les mettre sous une forme physico-chimique qui s'oppose à leur déplacement. À ce titre, elle renvoie notamment à la notion de confinement, qui est habituelle dans les fonctions de sûreté des installations nucléaires. Dans le cas d'un stockage profond, le confinement par l'interposition d'une barrière physique ne peut durer indéfiniment, du fait de la dégradation des matériaux exogènes au sein du stockage. On étend donc la notion habituelle de « confinement » à une notion de « limitation du relâchement », et d'« immobilisation », qui prennent en compte respectivement le rôle des matrices de déchets qui retiennent les radionucléides et la capacité du milieu environnant à favoriser l'insolubilisation des radionucléides. On notera en revanche que les fonctions de retard au transfert, qui consistent à freiner le transport des radionucléides sans véritablement l'empêcher, ne font pas partie des phénomènes évoqués ici.

Cette acception de la fonction permet de la maintenir sur toute la durée de vie du stockage, bien qu'elle change, selon les phases, dans la manière dont elle est prise en charge par les composants qui l'assurent (d'abord le conditionnement des déchets, puis les déchets eux-mêmes et les conditions chimiques dans l'alvéole).

Le conditionnement des déchets, tel qu'il existe, est pris comme donnée d'entrée. Le stockage doit en préserver les propriétés favorables, ou ajouter des lignes de défense à celles offertes par le conditionnement initial. Cela s'effectue notamment par l'ajout d'éléments de conteneurage spécifiques au stockage.

Cette fonction est facilitée par des dispositions adaptées à chaque type de déchet. Le fonctionnement du stockage, et la préservation d'une épaisseur de garde entre modules de déchets de nature différente permettent d'optimiser les conditions physico-chimiques au sein de chaque module, sans avoir à prendre en compte d'éventuelles interférences provenant d'autres types de déchets. Cela consiste par exemple à éloigner les déchets bitumineux, qui peuvent y être sensibles, de l'influence thermique des déchets C et des combustibles usés, voire de certains autres déchets B (distance minimale de 250 mètres).

L'ensemble des dispositions génériques prises à ce stade du projet pour remplir la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » se résume aux éléments suivants :

- gestion du stockage par module selon la nature physico-chimique des déchets ;
- éloignement suffisant des modules de déchets de nature différente pour garantir l'indépendance phénoménologique.

L'analyse est conduite par type de déchet.

3.7.4.1 Dans les alvéoles de déchets B autres que les bitumes

On aborde en premier lieu les alvéoles de déchets autres que les boues bitumées. Il s'agit des alvéoles de déchets B1, B3, B4, B5, B6, B7 et B8 (voir chapitre 2). La nature des déchets y est diverse. Le concept prend en charge de manière globale cette variabilité. Quelques caractéristiques sont plus particulièrement favorables à la protection des déchets métalliques (coques et embouts, déchets activés dans la masse, etc.). Elles sont donc identifiées en tant que de besoin.

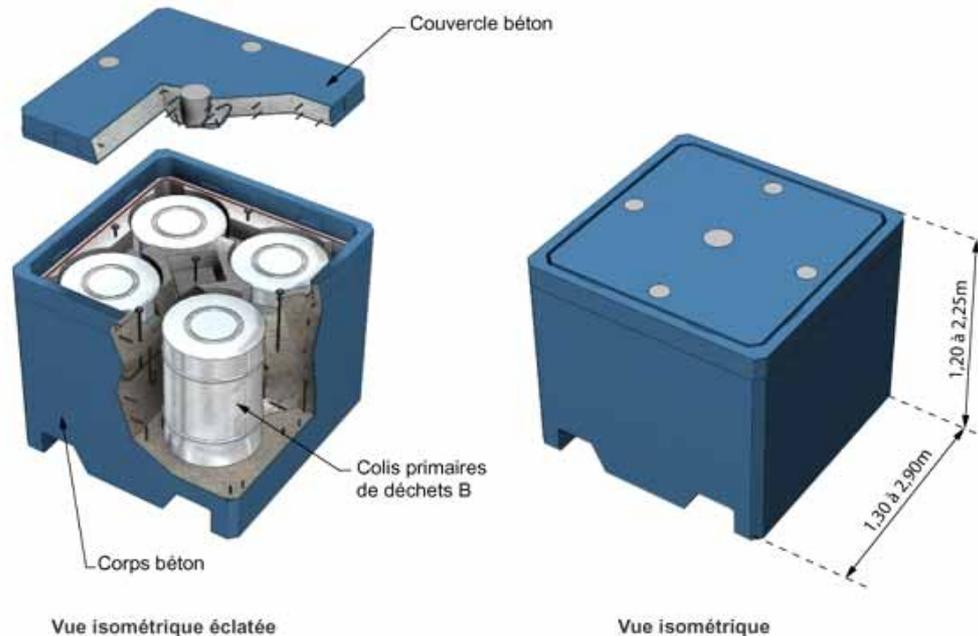
On distingue plusieurs sous-fonctions.

● **Protéger les déchets de la corrosion.**

Cette sous-fonction est spécifique des déchets métalliques. Les éléments toxiques et les radionucléides sont soit présents sous forme de contamination en surface des déchets, soit inclus dans la masse. La structure du déchet a, dans ce dernier cas, une fonction d'immobilisation des éléments, et c'est la corrosion qui pilote leur relâchement. La première sous-fonction est donc de maintenir des conditions favorables à la limitation de la corrosion au sein de l'alvéole. Cela s'accomplit par un contrôle du potentiel d'oxydoréduction et du pH. La corrosion étant inévitable, il n'y a pas de niveau de performance requis a priori pour cette fonction. On cherche à se placer dans les meilleures conditions pour réduire la vitesse de corrosion et favoriser la passivation de l'acier, un pH alcalin favorisant une telle passivation en conditions réductrices. Ces dispositions sont également valables pour d'autres métaux présents au sein des déchets, tels que par exemple la zircon.

Le conteneur standard en béton, qui est à ce stade du projet identique pour tous les déchets B (voir Figure 3.7-7), est défini dans un souci de manutention et d'homogénéité. Il assure également des fonctions pour la phase de post-fermeture. En particulier, il agit sur la régulation du pH, avec l'ensemble du béton qui constitue les alvéoles de déchets B. Le béton compte tenu des masses en jeu, impose un pH alcalin (de 10 à 12,5 en régime stationnaire) dans l'ensemble du milieu. La perturbation de ce pH par les éléments relâchés par certains déchets, essentiellement les acides organiques issus des bitumes, est gérée en plaçant les déchets métalliques dans des alvéoles dédiées. La présence de déchets organiques dans les colis de CSD-C peut avoir une influence, mais elle est négligeable compte tenu

des quantités en jeu. Par prudence, les autres colis contenant de la matière organique pourraient cependant être stockés dans les alvéoles dédiées, comme les bitumes.



C.IM.ASTE.04.0887.A

Figure 3.7-7 Schéma de principe du complément de colisage de déchets B

L'étanchéité du complément de colisage de déchets B contribue également, à titre supplétif, à protéger les déchets contre la phase oxydante associée à la ventilation en exploitation – qui correspond cependant à des conditions relativement sèches. Une fois l'alvéole fermée, le milieu devient globalement réducteur, de par l'absence d'oxygène et les conditions imposées par les argilites.

Les performances requises pour cette fonction dépendent in fine de l'état des connaissances sur les modèles de relâchement qui peuvent être associés aux différents types de déchets. On présentera ces modèles dans le cadre du calcul de performances, au chapitre 5.

L'ensemble des dispositions prises à ce stade du projet pour remplir la sous-fonction « protéger les déchets B métalliques de la corrosion » se résume aux éléments suivants :

- choix de privilégier le béton pour les colis de déchets B et le revêtement des alvéoles ;
- limitation des composants organiques dans les alvéoles et séparation des déchets.

● Limiter la dissolution des radionucléides

Une fois les radionucléides (et les toxiques chimiques) séparés de la masse des déchets, on cherche à limiter leur mise en solution. Les mêmes conditions que celles déjà mobilisées pour limiter la corrosion sont requises : pH basique à neutre, globalement favorable à une limitation de la solubilité, et potentiel réducteur. En effet, seuls quelques éléments (iode, chlore, et césium) sont insensibles à ces conditions chimiques favorables. En revanche, beaucoup d'éléments sont peu solubles en milieu cimentaire [21].

La limitation de la quantité d'éléments organiques dans l'alvéole de déchets B (à la fois par les quantités faibles de déchets organiques et par l'absence de matière organique dans la construction des

alvéoles) permet de minimiser la quantité de substances complexantes qui pourraient se former et faciliter la mise en solution des radionucléides.

On notera que cette sous-fonction, comme la précédente, repose sur l'environnement cimentaire des alvéoles B, et les conditions chimiques qu'il impose. Compte tenu des masses de béton en jeu, et du caractère peu perturbateur des eaux de Callovo-Oxfordien, qui sont proches de la neutralité, ces conditions favorables apparaissent comme particulièrement robustes.

Les dispositions prises vis-à-vis de cette sous-fonction sont les mêmes que pour la précédente.

● **Filtrer les colloïdes**

Les quantités limitées de colloïdes présents dans les alvéoles peuvent augmenter la mobilité de certains toxiques dans les colis. On entend par colloïdes un ensemble de produits qui peuvent avoir plusieurs origines et plusieurs formes. Les différents types de colloïdes potentiels peuvent se distinguer en :

- colloïdes intrinsèques : ils sont formés par la polynucléation et la condensation de certains actinides suite à l'hydrolyse des déchets. Leur formation est étroitement liée aux conditions d'environnement (redox, pH,...). Hors de leur zone de production, ces colloïdes se trouvent généralement dans des conditions d'environnement chimique qui les rendent instables ;
- colloïdes porteurs : ce sont les colloïdes naturels éventuellement présents dans les eaux de pore des argilites (fines particules minérales et molécules organiques), les colloïdes libérés par les matériaux de construction des ouvrages (notamment l'argile gonflante et les liants hydrauliques...) ou créés dans les ouvrages pendant la phase de construction et d'exploitation (prolifération de bactéries, oxydation des argilites...). On compte également les colloïdes produits par des phénomènes de plus ou moins longue durée dus à la présence des colis (dissolution des verres, radiolyse...) et/ou des matériaux de l'alvéole (dégradation des bétons, interaction du front alcalin avec les argilites, corrosion des conteneurs...).

Dans la mesure où il est difficile, dans l'absolu, d'empêcher leur formation et leur relâchement, le choix du concepteur est de se placer dans des conditions permettant de filtrer les colloïdes en champ proche. Cela passe par l'interposition d'un milieu faiblement poreux tout autour des alvéoles. Celui-ci est constitué par le milieu géologique et par le scellement d'alvéole de déchets B. Ce dernier, d'une technique de réalisation similaire à celle des scellements de galeries, est ancré dans la zone fracturée en entrée d'alvéole pour refermer celle-ci (Figure 3.7-8). Une épaisseur de scellement est prévue, de part et d'autre des clés d'ancrage, pour tamponner la perturbation alcaline issue du béton du massif d'appui (également dénommé « bouchon de béton ») et des alvéoles, afin de préserver les propriétés de l'ouvrage.

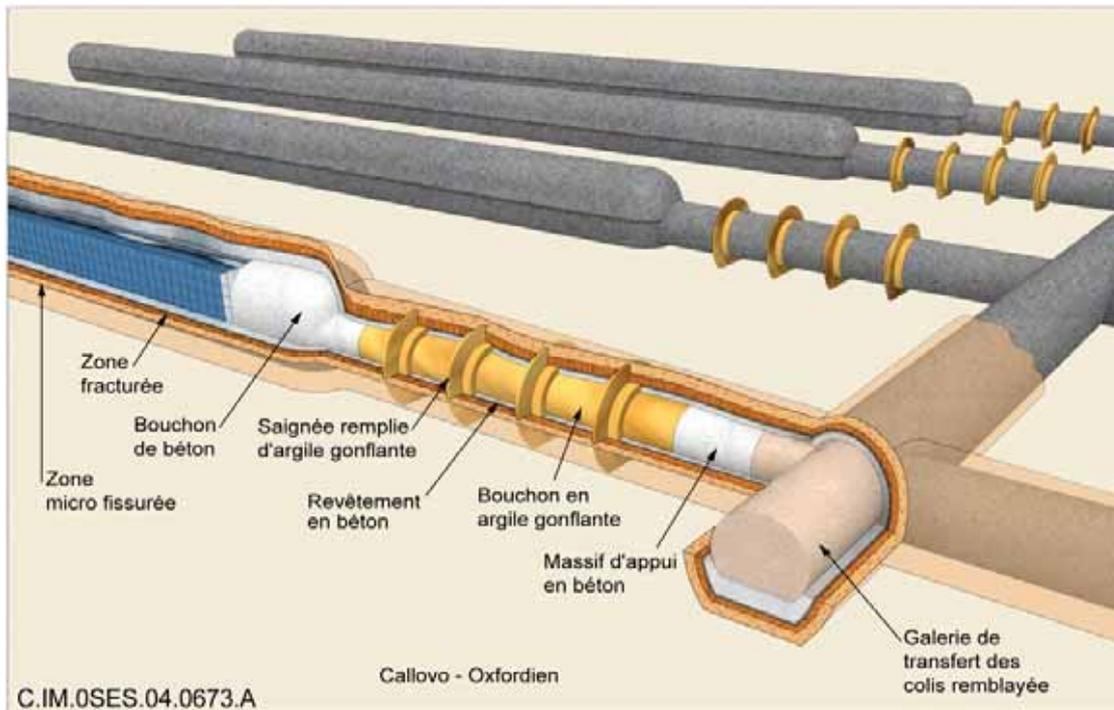


Figure 3.7-8 Schéma d'alvéole de déchets B avec bouchon ancré dans la zone micro-fissurée

L'ensemble des dispositions prises à ce stade du projet pour remplir la sous-fonction « filtrer les colloïdes » se résume aux éléments suivants :

- choix d'une formation géologique peu poreuse ;
- fermeture des alvéoles par un bouchon ancré dans la zone fracturée.

3.7.4.2 Dans les alvéoles de déchets B2 (enrobés bitumineux)

Les alvéoles de déchets B2 répondent aux mêmes types de fonctions que les autres alvéoles B. Leur particularité réside dans le fait que des dispositions de conception complémentaires sont prises pour favoriser la capacité de confinement potentiellement apportée par la matrice bitumineuse. Elles s'appuient sur les études du CEA [20] qui ont mis en valeur un certain nombre de facteurs permettant de mobiliser cette capacité.

Afin de créer des conditions favorables à la maîtrise du relâchement, il est important en premier lieu de maîtriser autant que possible la surface que la matrice bitumineuse offre à la pénétration de l'eau. En effet, le bitume présente une tendance à fluer, et les modèles de relâchement ne sont valables que dans un domaine de géométrie maîtrisé. On retient donc une première sous-fonction qui est de préserver la stabilité dimensionnelle du bitume. Elle n'est pas assurée par le seul colis de stockage B, qu'on ne cherche pas à dimensionner spécifiquement pour qu'il maintienne la géométrie du bitume sur l'ensemble de la durée de vie de celui-ci. C'est l'ensemble de l'alvéole, sa compacité, et la minimisation des vides, qui permet d'assurer un maintien de la géométrie de l'enrobé. On ne fixe pas d'objectif quantifié à cette fonction, le maintien complet de la géométrie du bitume étant difficile à garantir. Les dispositions prises tendent cependant à le favoriser.

L'évacuation des gaz de radiolyse au fur et à mesure de la production, par le colisage non étanche, contribue également à préserver la matrice des déformations. Le gonflement du bitume en lui-même, en revanche, ne peut être empêché et il est pris en compte par les modèles.

Parallèlement, il faut également limiter la solubilisation du bitume. Des études expérimentales ont montré que les paramètres favorables sont :

- le respect de critères de température (20 à 30 °C) qui permettent d'éviter tant un durcissement du bitume et possiblement une fissuration, qu'une excessive solubilité. Il convient de noter que la tolérance sur cette fonction est importante, un dépassement modéré du critère de température, par exemple pendant la phase d'entreposage, n'ayant pas d'effet significatif ;
- le respect d'une gamme de pH similaire à celle envisagée pour les autres déchets B (10 à 12,5).

L'éloignement des alvéoles de bitumes des déchets exothermiques, et la présence de quantités importantes de béton dans les alvéoles, sont autant de facteurs favorables. Le béton, en particulier, permet de tamponner l'effet d'éventuels acides organiques relâchés par les bitumes.

Enfin, les fonctions déjà identifiées pour les autres déchets B, consistant à limiter la solubilité en champ proche et à filtrer les colloïdes, interviennent également et ne présentent pas de spécificité. On notera cependant que les déchets bitumineux proviennent, chez leur producteur primaire, de boues de traitement d'effluents par insolubilisation. On s'attend donc à ce que les radionucléides contenus soient peu solubles. Cependant, compte tenu des difficultés à démontrer la pérennité de la spéciation des radionucléides au sein de la matrice, puis dans le stockage, cet élément n'est pas pris en compte pour contribuer à la fonction d'immobilisation. Il constitue une marge de sûreté.

La dégradation du bitume ne produit que peu d'espèces organiques ayant capacité à imposer leur pouvoir complexant en milieu cimentaire [44]. En tout état de cause, il convient de gérer également les complexants incorporés dans la matrice (les bitumes anciens de Marcoule contenant une certaine teneur en tributyl-phosphate, par exemple).

L'ensemble des dispositions prises à ce stade du projet pour remplir la sous-fonction « limiter les relâchements par les déchets B2 » se résume aux éléments suivants :

- compacité des alvéoles de déchets B2 pour favoriser la stabilité dimensionnelle ;
- évacuation des gaz de radiolyse ;
- utilisation du béton pour les colisages et le soutènement des alvéoles ;
- éloignement des alvéoles de déchets exothermiques.

3.7.4.3 Dans les alvéoles de déchets C

Pour les colis de déchets C vitrifiés, une première fonction est d'interdire l'arrivée d'eau au contact du verre pendant la période caractérisée par une température relativement élevée, dont la durée est au plus de l'ordre du millénaire. Il convient en effet d'éviter un relâchement de radionucléides aussi longtemps que la température ne permet pas de rendre compte, de manière fiable, du comportement de ces radionucléides, compte tenu des limites actuelles de connaissances. Il s'agit d'autre part de protéger le verre d'un risque d'accroissement, pour une température supérieure à une soixantaine de degrés, de son altérabilité au contact de l'eau, en lien avec les modèles de comportement aujourd'hui considérés [20]. Cette fonction est remplie par un surconteneur (voir Figure 3.7-9) qui isole le colis de verre de l'eau, et dont la durée de vie est dimensionnée de manière à couvrir la phase pendant laquelle la température au cœur du verre est supérieure à 50-60 °C. Le dimensionnement du surconteneur est fait dans des conditions conservatives (en supposant une resaturation immédiate, et en prenant en compte une phase de conditions de corrosion oxydante avant le passage en conditions réductrices), et il permet une étanchéité de 4 000 ans, très largement suffisante au regard de l'objectif.

On notera que le surconteneur tel qu'il est aujourd'hui défini pourrait en fait durer plus longtemps, aux alentours de 15 000 ans, en considérant des hypothèses moins pessimistes et en prenant en compte la cinétique de resaturation aujourd'hui estimée ainsi que la présence d'éléments protégeant le conteneur, par exemple le chemisage métallique installé en paroi de l'alvéole, qui est le premier à se corroder. Cependant, le chemisage est mis en place avant tout pour des questions de facilité d'exploitation et afin de favoriser le retrait aisé des colis dans un contexte de réversibilité. On ne lui affecte pas de fonction de protection du surconteneur, celle-ci restant une marge de sûreté.

La durée de vie du surconteneur est pilotée par sa corrosion ; pour cette raison, le surconteneur est en acier non ou faiblement allié, matériau dont le comportement sous corrosion est le plus simple et le plus prévisible. On notera que, pour cette même raison, on n'attribue pas de fonction au conteneur primaire en acier inoxydable, qui constitue de fait une ligne de défense supplémentaire, dont l'efficacité est cependant difficilement quantifiable. En effet, celui-ci risque de ne pas résister à la corrosion radiolytique dans les premiers siècles, ni aux pressions hydrostatiques et géostatiques appliquées. Il constitue donc une protection plutôt d'ordre qualitatif.



Figure 3.7-9 Schéma de principe du colis de stockage des colis-type de déchets C vitrifiés (verre, conteneur et surconteneur)

Le comportement du surconteneur est caractérisé par plusieurs phases :

- pendant la phase où il peut être soumis à des conditions oxydantes (en exploitation, et en début de phase de post-fermeture jusqu'à la consommation de l'oxygène par le milieu environnant), son régime de corrosion est potentiellement rapide. L'alvéole est donc obturée dès que possible par un bouchon d'exploitation et un capot de protection, qui limitent fortement le renouvellement d'air à l'intérieur de l'alvéole. Cela ne constitue pas un obstacle à la réversibilité, dans la mesure où ces éléments peuvent être aisément enlevés, ce qui est d'ailleurs nécessaire pour mettre en place le bouchon d'alvéole définitif (voir plus loin). Pendant cette phase, on cherche également à placer le surconteneur dans les meilleures conditions physico-chimiques ; en particulier, il est isolé autant que possible des autres composants métalliques (par la mise en place d'un patin de céramique qui le sépare du chemisage) ;

- de manière concomitante, pendant les premiers siècles de durée de vie du surconteneur, celui-ci pourrait être soumis à une corrosion radiolytique du fait du rayonnement interne du colis. L'épaisseur de métal disponible lors de cette période est dimensionnée pour l'en protéger ;
- après consommation de l'oxygène, les conditions autour du surconteneur sont anoxiques et réductrices, même si l'alvéole n'est éventuellement pas totalement resaturée. Dans un tel cas, la corrosion est une corrosion uniforme à vitesse plus lente.

La résistance mécanique du conteneur sur la durée nécessaire conduit à prévoir une épaisseur supplémentaire. Il est prévu pour résister à 12 MPa, correspondant à l'évaluation du poids des terres et de la pression d'eau interstitielle.

Le dimensionnement de l'épaisseur du surconteneur à ce stade du projet est au total de 55 mm.

Au-delà de la phase thermique, d'autres sous-fonctions contribuent à créer autour du verre des conditions qui permettent d'en maîtriser le comportement.

Tout d'abord, il s'agit de maintenir la cohésion mécanique du verre autant que possible, à la fois pour éviter un endommagement qui augmenterait sa fracturation interne, mais également pour favoriser les éventuels phénomènes d'autocolmatage de la fissuration interne par précipitation de silice une fois que le verre est en présence d'eau. Cette fonction renvoie aux conditions de manutention des colis de déchets vitrifiés, qu'on doit préserver de l'endommagement. Une fois qu'ils sont dans l'alvéole, celle-ci doit offrir aux colis de verre un environnement présentant la meilleure stabilité mécanique possible.

De plus, la limitation du dégagement thermique des colis de verre en entrée du stockage, ainsi que de la température au sein du stockage, motivée par le souci de protéger le milieu géologique (voir paragraphe 3.7.6.1), contribue également à favoriser la tenue des colis en limitant les déformations thermomécaniques dans l'alvéole. Le nombre de colis par alvéole et leur séparation par des intercalaires inertes participent à la dissipation de la chaleur.

Par ailleurs, l'altération du verre est contrôlée par la vitesse de dissolution de la silice, qui décroît avec la concentration en silice dans l'eau environnante. Il convient de prendre des dispositions pour favoriser le maintien d'un équilibre chimique, en termes de teneur en silice, entre l'eau et le verre. Cet objectif est atteint en limitant le transport des espèces dissoutes dans l'alvéole, donc en particulier de la silice, de manière à favoriser son immobilisation au plus près de la surface atteinte par l'eau. Les dispositions retenues pour satisfaire cette fonction portent sur les matériaux situés à proximité des déchets. On note en particulier l'existence d'un milieu continu de faible perméabilité autour des colis, avec les argilites du Callovo-Oxfordien et le bouchon en bentonite mis en tête d'alvéole. Les vides sont limités autant que possible. L'ensemble contribue à maintenir un régime diffusif dans l'alvéole.

Les évaluations montrent que, compte tenu du faible diamètre, la zone fracturée se développant autour de l'alvéole devrait être absente ou très limitée, suffisamment pour que la pression exercée par le gonflement du bouchon suffise à la court-circuiter (sans qu'une coupure hydraulique soit nécessaire). Pour parvenir à maintenir un milieu très faiblement fracturé, les alvéoles sont orientées dans le sens de la contrainte géostatique majeure, et les techniques de creusement sont adaptées.

Le bouchon est en bentonite. Il est disposé à l'entrée de l'alvéole, et c'est son gonflement lors de la phase de resaturation qui assure le contact intime avec la roche (voir Figure 3.7-10). Un massif d'appui en béton (dénommé également « bouchon en béton ») est disposé en amont pour confiner la bentonite et favoriser son gonflement.

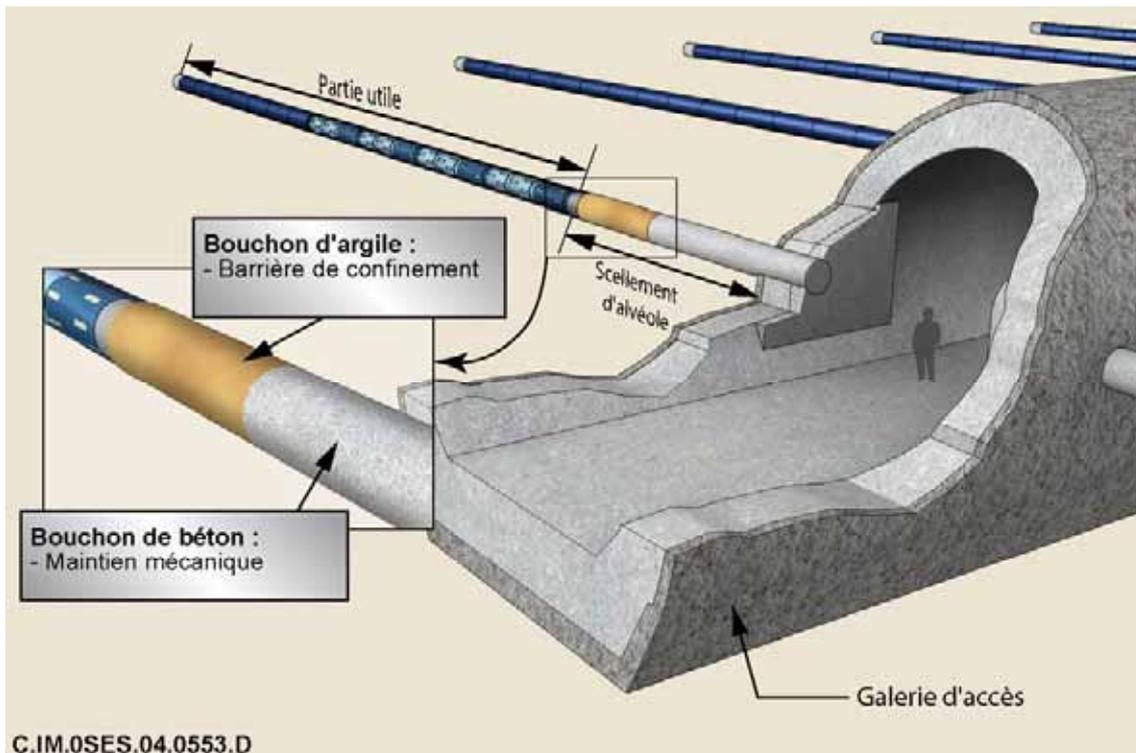


Figure 3.7-10 Schéma de principe d'une alvéole de déchets C fermée

En complément des dispositions évoquées ci-dessus, il faut également limiter les composants à l'interface des colis pouvant sorber la silice. On notera cependant que les produits de corrosion du surconteneur peuvent présenter de telles capacités de sorption. Leur présence est prise en compte dans les modèles de comportement [20].

De plus, on cherche également à contrôler le pH (de préférence entre 7 et 9), la dissolution du verre étant potentiellement sensible à ce paramètre. C'est la raison pour laquelle on éloigne du verre toute source alcaline. Le béton du massif d'appui en tête du bouchon d'alvéole ne doit pas avoir d'influence sur le pH dans l'alvéole. Cela nécessite une performance du bouchon en terme d'isolation chimique. La capacité tampon de la bentonite, et ses propriétés de faible diffusion, sont mobilisées, et dimensionnées au regard des extensions maximales de perturbation alcaline. Celles-ci sont d'ordre métrique au plus.

Enfin, comme dans les alvéoles de déchets B, deux fonctions génériques permettent de maîtriser les relâchements hors de l'alvéole une fois que les éléments toxiques ont quitté le colis :

- maintenir des conditions réductrices, de manière à immobiliser autant que possible les radionucléides. Les conditions réductrices sont imposées à terme, une fois le stockage refermé, par les eaux du Callovo-Oxfordien ;
- filtrer les colloïdes éventuellement produits. Cette sous-fonction est assurée par le biais des argilites, du fait de l'absence de zone fracturée, ainsi par le bouchon d'alvéole. Leur faible porosité permet d'empêcher les complexants produits de progresser vers les galeries.

Le cas échéant, s'il s'avérait qu'une zone fracturée est susceptible de se développer, un corps de barrière ouvragée pourrait être mis en place dans les alvéoles de déchets C. Il n'apparaît cependant pas nécessaire au stade actuel de la conception.

L'ensemble des dispositions prises à ce stade du projet pour limiter le relâchement par les déchets vitrifiés, et immobiliser les radionucléides qu'ils peuvent relâcher, se résume aux éléments suivants :

- choix d'un surconteneur en acier non ou faiblement allié ;
- limitation de la période oxydante par l'obturation des alvéoles au moyen d'un capot amovible, protection du surconteneur vis-à-vis des risques de corrosion localisée (notamment en plaçant un patin et l'isoler du chemisage pour éviter de créer une zone de corrosion localisée) et dimensionnement du surconteneur prenant en compte une période oxydante, la corrosion radiolytique, plus une vitesse de corrosion uniforme ;
- limitation des vides dans l'alvéole ;
- orientation des alvéoles dans le sens de la contrainte majeure ;
- maîtrise des techniques de creusement ;
- mise en place d'un bouchon en bentonite en entrée d'alvéole ;
- limitation de l'utilisation de composant à l'interface des colis pouvant sorber la silice ;
- absence d'emploi du béton au sein des alvéoles.

On notera que les combustibles usés CU3 (combustibles de la Recherche ou de la Défense), s'ils étaient stockés, le seraient dans des alvéoles similaires à celles des déchets vitrifiés.

3.7.4.4 Dans les alvéoles de combustibles usés

Les alvéoles de combustibles usés sont conçues sur le même principe que les alvéoles de déchets C (voir Figure 3.7-11). En effet, il s'agit dans un cas comme dans l'autre de déchets thermiques.

Les fonctions sont donc de même nature, et s'appuient sur des dispositions de conception similaires :

- interdire l'arrivée d'eau sur les combustibles usés de manière à éviter tout relâchement dans le milieu durant la phase thermique. En effet, d'une part le comportement dans l'eau des radionucléides est moins connu en température, d'autre part la température peut accélérer sensiblement les mécanismes de corrosion aqueuse des gaines et des pastilles. La disposition retenue est un conteneur en acier non ou faiblement allié dimensionné pour garantir une étanchéité pendant 10 000 ans. Le dimensionnement est effectué dans des conditions pénalisantes, des évaluations plus réalistes conduites dans des conditions plus proches de la phénoménologie (prenant en compte les phases non saturées, des vitesses de corrosion moins conservatives) montrent que l'on peut s'attendre en fait à des durées de l'ordre de 30 000 ans ;
- contrôler le pH, le comportement du combustible usé étant peu connu à des pH supérieurs à 10, en évitant la présence de matériaux cimentaires dans l'alvéole et en affectant au bouchon une fonction de limitation de la progression de la perturbation alcaline ;
- maintenir un régime diffusif dans l'alvéole, pour éviter le transport des espèces dissoutes. Il ne s'agit bien sûr plus ici d'immobiliser la silice, mais de manière plus générale de limiter la dissolution du combustible, en contrôlant la concentration de l'uranium dissous dans l'eau. À titre complémentaire, on peut noter également que le régime diffusif permet également de rendre extrêmement improbable une concentration de matière fissile après dégradation des conteneurs, et donc un éventuel accident de criticité associé. En effet, la diffusion favorise la migration isotrope des radionucléides ;
- maintenir des conditions réductrices dans l'alvéole, pour favoriser la formation d'espèces peu solubles. L'homogénéité des conditions réductrices permet également d'éviter la formation de « fronts » géochimiques qui pourraient provoquer des concentrations locales de matière fissile par précipitation ;
- filtrer les colloïdes au niveau de l'alvéole.

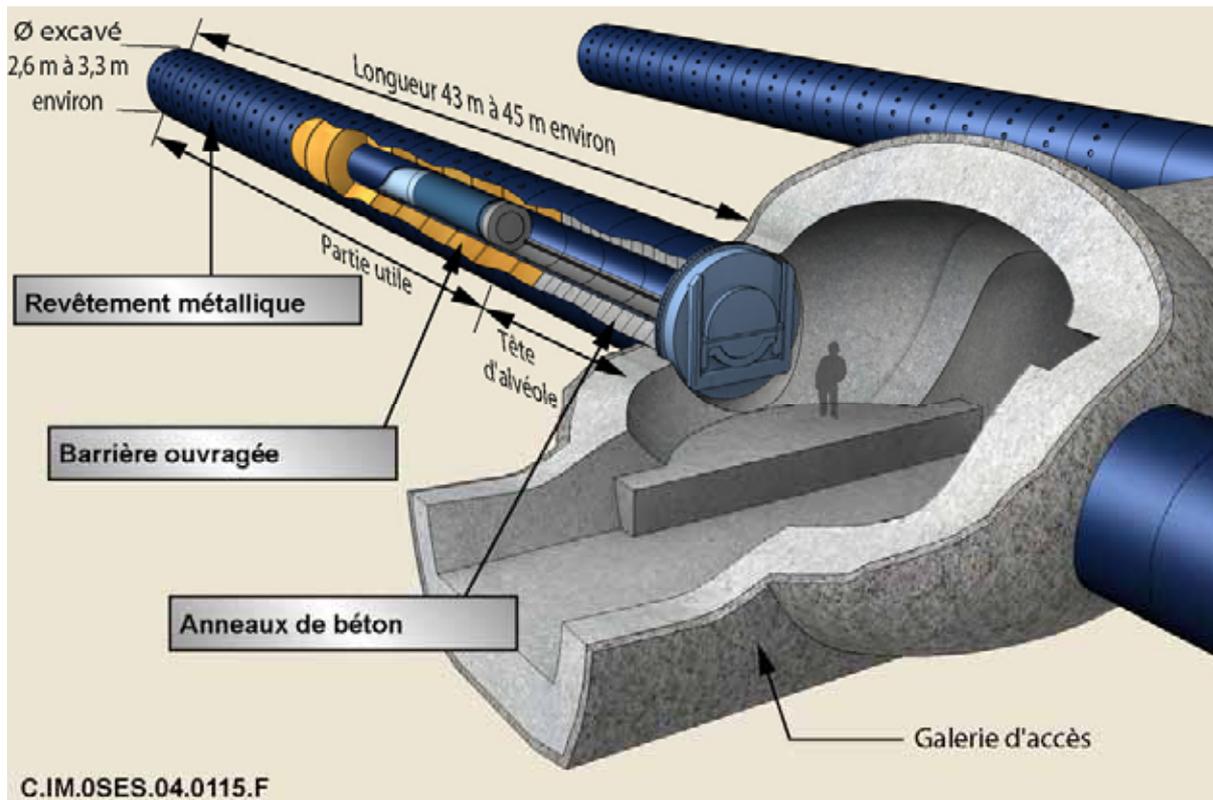
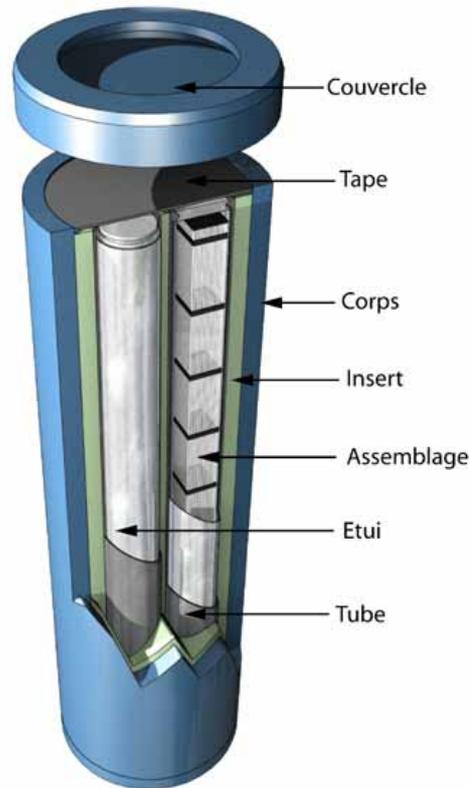


Figure 3.7-11 Schéma de principe des alvéoles de combustibles usés

Par ailleurs, la présence d'une barrière ouvragée est retenue pour les combustibles usés. En effet, la durée du transitoire thermique est longue pour ce type de colis. Les effets plurimillénaires sur les argilites d'une température significativement supérieure à la température géothermale sont mal maîtrisés à ce jour. À ce stade des connaissances, il est apparu important de retenir une protection complémentaire de la roche, au moyen d'un ouvrage en bentonite assurant un tampon thermique. Elle contribue également à maintenir un régime diffusif dans l'alvéole.

Les conteneurs de combustibles usés intègrent par ailleurs la gestion du risque de criticité, même à long terme. Dans le concept à quatre assemblages UOx, l'insert en fonte intégré au conteneur maintient la sous-criticité du colis (voir Figure 3.7-12). Le comportement mécanique de cet élément, y compris sous l'effet de la corrosion, rend improbable un rapprochement des assemblages, qui pourrait entraîner un tel accident. La sous-criticité des conteneurs mono-assemblage est aussi acquise.



C.IM.0SES.04.0178.B

Figure 3.7-12 Schéma de principe d'un conteneur de combustible usé (UOx)

3.7.5 Retarder et atténuer la migration des radionucléides

La troisième fonction de sûreté consiste à retarder et atténuer dans l'espace et le temps le flux des radionucléides finalement relâchés par les déchets vers les formations encaissantes. Elle est donc latente pendant une première phase de temps durant laquelle les radionucléides restent confinés dans le déchet ; une fois active, elle mobilise essentiellement les caractéristiques des argilites du Callovo-Oxfordien pour leurs propriétés de transport, ainsi que les performances des barrières artificielles notamment celles des scelllements.

Trois sous-fonctions visent à « retarder et atténuer la migration des radionucléides » (voir Figure 3.4-3). Elles ont pour but de :

- retarder la migration des éléments radioactifs par la diffusion/rétention dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien ;
- atténuer le flux d'éléments toxiques dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien ;
- préserver la capacité de dispersion naturelle dans l'environnement du stockage.

La première sous-fonction permet d'augmenter les temps de transfert et d'atténuer le débit d'activité des radionucléides depuis leur relâchement par les colis jusqu'au toit ou au mur du Callovo-Oxfordien.

Les caractéristiques du Callovo-Oxfordien qui contribuent à satisfaire cette fonction sont :

- une forte capacité à limiter les flux de radionucléides du fait d'un mode de transfert diffusif ;
- une forte capacité à retenir la plupart des éléments chimiques par les phénomènes de sorption (la précipitation étant déjà prise en compte dans le cadre de la fonction de sûreté précédente) ;
- une épaisseur importante de garde d'argilites saines entre le stockage et les encaissants. Sur l'étendue de la zone de transposition, l'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien est de

130 mètres au moins, ce qui permet de garantir une épaisseur de garde de plus de 60 mètres de part et d'autre des ouvrages. L'Andra a considéré des installations souterraines de faible extension verticale, organisées sur un seul niveau, pour maximiser cette épaisseur.

Ces trois caractéristiques contribuent à garantir un temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien important, retardant et étalant le débit d'activité des éléments. La RFS III.2.f. identifie d'ailleurs les caractéristiques géochimiques de la formation hôte comme un « critère important », car « *elles gouvernent les phénomènes de rétention des radionucléides éventuellement relâchés* ». Le choix d'un site favorable est donc la première manière de répondre à cette fonction de sûreté.

Il est à noter que la diffusion s'accélère quand la température croît (voir Figure 3.7-13) et qu'en champ de température élevé il est difficile de rendre compte de manière fiable du comportement chimique des éléments en solution. Ainsi pour les zones de déchets exothermiques, le conteneur ou surconteneur étanche, déjà mentionné, intervient indirectement pour assurer la fonction de retard et d'atténuation dans de bonnes conditions.

Cependant, bien que moins efficace, la capacité de la roche à retarder et atténuer dans le temps les radionucléides subsiste en température, lors de la phase thermique, et constitue une fonction latente, mobilisable notamment en cas de défaut de conteneur de déchets exothermiques.

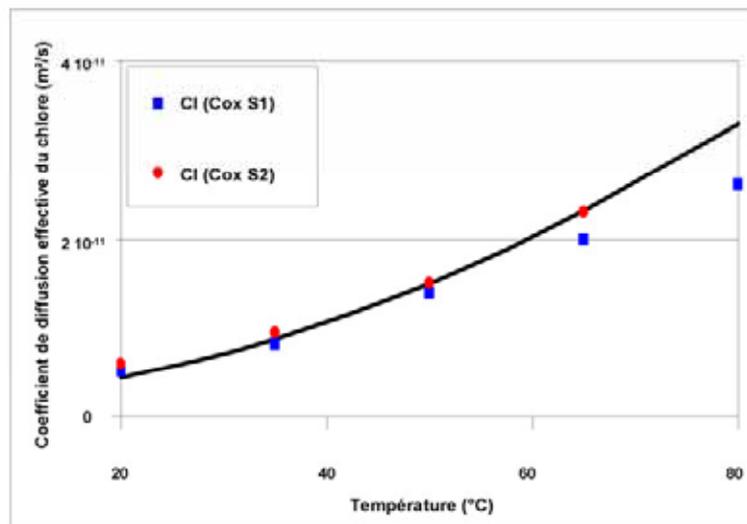


Figure 3.7-13 Résultats expérimentaux d'évolution du coefficient de diffusion effective pour le chlorure en fonction de la température pour deux échantillons d'argilite (COx S1, COx S2)

On notera par ailleurs que la migration des radionucléides pourra être retardée à l'intérieur de certains composants du stockage (barrière ouvragée pour les alvéoles de combustibles usés, bouchons, corps de scellements). Il s'agit d'un supplément de performance apporté à celle du Callovo-Oxfordien, celle-ci demeurant quantitativement la plus importante en situation normale¹⁴.

Une deuxième sous-fonction concerne l'étalement dans l'espace, et consiste à empêcher que les radionucléides ne diffusent selon des directions privilégiées. Elle s'appuie sur l'homogénéité du Callovo-Oxfordien, et l'absence d'hétérogénéités significatives au sein de la formation au regard de la

¹⁴ De ce fait, une autre manière de présenter le découpage de la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides » est de distinguer le rôle de la formation hôte d'une part et des composants ouvragés d'autre part. C'est l'approche adoptée pour la Figure 1.7-1 et pour la spécification technique de besoin [26].

diffusion. La fonction est latente dans un premier temps, tant que les éléments radioactifs et les toxiques chimiques n'ont pas atteint la formation, puis pérenne dans un second temps.

Une dernière sous-fonction consiste à préserver la capacité naturelle de dilution des formations encaissantes. La dilution elle-même n'est pas une fonction exercée par un composant du stockage, et elle n'est pas recherchée en tant que telle, puisque le principe même du stockage est de privilégier le confinement. Cependant, dans la mesure où certains radionucléides pourraient atteindre les formations encaissantes et s'y diluer de fait, il peut être utile, à titre complémentaire et afin de limiter encore plus les impacts potentiels, de ne pas empêcher cette dilution. On ne cherche en revanche pas à favoriser ce phénomène.

On se limite donc à prendre toute disposition visant à ne pas perturber à long terme les encaissants, ceux-ci étant déjà inévitablement soumis aux actions naturelles (érosion). Cela consiste en particulier :

- à s'assurer que les tassements provoqués par le comblement des vides au sein du stockage ne puissent perturber les encaissants supérieurs. Il convient de noter que la limitation des vides est guidée avant tout par le souci de protéger la formation hôte. La protection des encaissants supérieurs est une conséquence induite ;
- en isolant les formations géologiques les unes des autres, par exemple en évitant de laisser en place des forages non rebouchés. Une telle disposition permet d'éviter que des chemins privilégiés constituent des courts-circuits ;
- à s'assurer de l'absence d'effets thermomécaniques significatifs sur les encaissants provoqués par la mise en stockage des déchets exothermiques. À nouveau, la protection de la formation hôte contre les échauffements excessifs couvre ce risque ;
- à mettre en place des scellements de séparation des formations aquifères dans les ouvrages de liaison traversant les encaissants, jusqu'à la surface, en complément du remblai.

L'ensemble des dispositions de conception pour la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » se résume à :

- choisir une formation présentant de bonnes propriétés vis-à-vis de la diffusion et du retard ;
- préserver une épaisseur de garde de formation argileuse entre le stockage et les encaissants ;
- choisir des architectures de stockage sur un seul niveau et de faible hauteur ;
- mettre en place un remblai dans les puits et des scellements pour isoler les aquifères ;
- limiter les perturbations induites sur les encaissants.

3.7.6 Dispositions génériques visant à protéger la roche hôte

La réalisation des fonctions liées aux transferts par l'eau a montré l'importance de la formation hôte, qui est sollicitée pour l'accomplissement de l'ensemble des fonctions.

Il est donc important de protéger les propriétés de la formation (perméabilité, porosité, minéralogie, géochimie, etc.). Il ne s'agit pas à proprement parler d'un objectif de sûreté en soi, mais il se déduit de la nécessité de remplir les fonctions de sûreté évoquées dans les autres sections du paragraphe 3.7¹⁵. On rappelle dans le présent paragraphe les principales dispositions, prises dès le stade de la construction du stockage et de son exploitation.

3.7.6.1 Protection thermique

Une première disposition consiste à dissiper la chaleur engendrée par la radioactivité des déchets, par conduction dans le milieu : l'objectif est, à ce stade des connaissances, de maintenir la température dans les installations et dans les argilites inférieure à 90 °C à tout instant et de revenir à une température maximale de 70 °C avant 1000 ans, de manière à éviter des transformations minéralogiques significatives et à rester dans des domaines de température couverts par l'état des

¹⁵ En ce sens, les fonctions présentées ci-dessous sont des sous-fonctions des trois fonctions de sûreté présentées précédemment.

connaissances. Cette fonction concerne particulièrement les déchets C vitrifiés et les combustibles usés. On notera qu'elle est aussi à considérer pour certains déchets B, sachant que leur dégagement thermique reste très inférieur à celui des colis de haute activité, et décroît plus rapidement dans le temps (la température maximale de stockage des colis B les plus actifs reste inférieure à 70 °C et revient rapidement en dessous de 40 °C). Pour ces alvéoles, les bétons sont à protéger d'échauffements excessifs, au même titre que la roche.

Cet objectif induit des temps d'entreposage préalables pour les colis les plus chauds (verres C1 à C4, combustibles usés du parc REP). De plus, la conception prévoit aussi d'espacer les colis les plus exothermiques (les déchets vitrifiés, hors déchets C0, et les combustibles usés d'EDF). De manière à favoriser la dissipation thermique, des intercalaires sont mis en place, dont la conception doit être telle qu'ils n'induisent pas d'interactions nouvelles dans l'environnement de l'alvéole (avec les colis, avec les éléments ouvragés, avec le milieu géologique). Il est donc prévu de les réaliser dans des matériaux similaires à ceux employés pour le conditionnement et le colisage des déchets eux-mêmes.

Par ailleurs, on doit veiller à la capacité de dissipation de la chaleur pour les matériaux entourant les déchets thermiques ; cela concerne en particulier les barrières ouvragées en bentonite.

3.7.6.2 Protection mécanique

La maîtrise des déformations mécaniques dans la formation d'accueil est également importante : l'ouverture de cavités souterraines, dans un milieu soumis à des contraintes mécaniques naturelles liées au poids des terrains, crée des déformations dans les argilites ; pour les colis de haute activité, une cause de déformation supplémentaire est la dilatation thermique des matériaux, sous l'effet de la chaleur dégagée par les déchets. Cela renvoie aux dispositions de protection contre le flux thermique. Il s'agit de limiter les dommages que les déformations mécaniques peuvent provoquer, et leur extension. Ces dommages peuvent en effet se traduire localement par une augmentation de perméabilité, plus ou moins élevée selon l'importance du dommage (microfissuration, fracturation).

On a déjà évoqué au paragraphe 3.7.3.1 les dispositions visant à limiter l'endommagement mécanique de la roche pendant le creusement et à plus long terme : orientation des ouvrages principaux dans le sens de la contrainte majeure, choix de techniques de creusement adaptées, mise en place de soutènement, de revêtements et de remblais spécifiés en fonction des performances mécaniques.

On a également mentionné la limitation des vides dans les alvéoles, qui est recherchée autant que possible. Les alvéoles de déchets C et de combustibles usés sont rendues aussi compactes que possible. Les vides dans les alvéoles de déchets B sont comblés, hormis entre les colis où cela s'avérerait très difficile à réaliser. Le gerbage des colis en réseau serré permet cependant de limiter le taux de vide à une valeur inférieure à 5 %.

3.7.6.3 Autres perturbations à prendre en compte

Les perturbations d'origine hydrique (désaturation / resaturation) ou chimique (actions des produits cimentaires, ferreux, oxydants) sur la roche sont également à prendre en compte.

On ne retient cependant pas de dispositions de conception spécifiques liées à ces perturbations. La propagation de la désaturation et de la perturbation oxydante est suffisamment peu importante pour qu'il ne soit pas nécessaire de contraindre, par exemple, la durée d'exploitation en fonction de l'extension possible de ces phénomènes. Par ailleurs, la fonction « s'opposer à la convection d'eau », qui impose un régime diffusif pour les radionucléides et les toxiques chimiques, impose également le même régime de transfert pour les espèces pouvant perturber les argilites. La perturbation alcaline ou fer-argile est ainsi gérée par le biais des mêmes dispositions de conception.

On abordera plus complètement ces questions de perturbations chimiques et hydrauliques dans le cadre du chapitre 6, paragraphe 6.2.8.

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

des matériaux à long terme. Cela permet de s'affranchir en situation nominale d'une évaluation des perturbations qu'engendreraient les effets d'une réaction nucléaire en chaîne, sur l'évolution et les performances du stockage : réponse du milieu à l'énergie thermique et mécanique délivrée, effets radiolytiques, formation de produits de fission supplémentaires.

3.7.7 Synthèse

Le schéma de la Figure 3.7-14 présente les principales fonctions de sûreté à long terme évoquées précédemment, avec les échelles de temps impliquées.

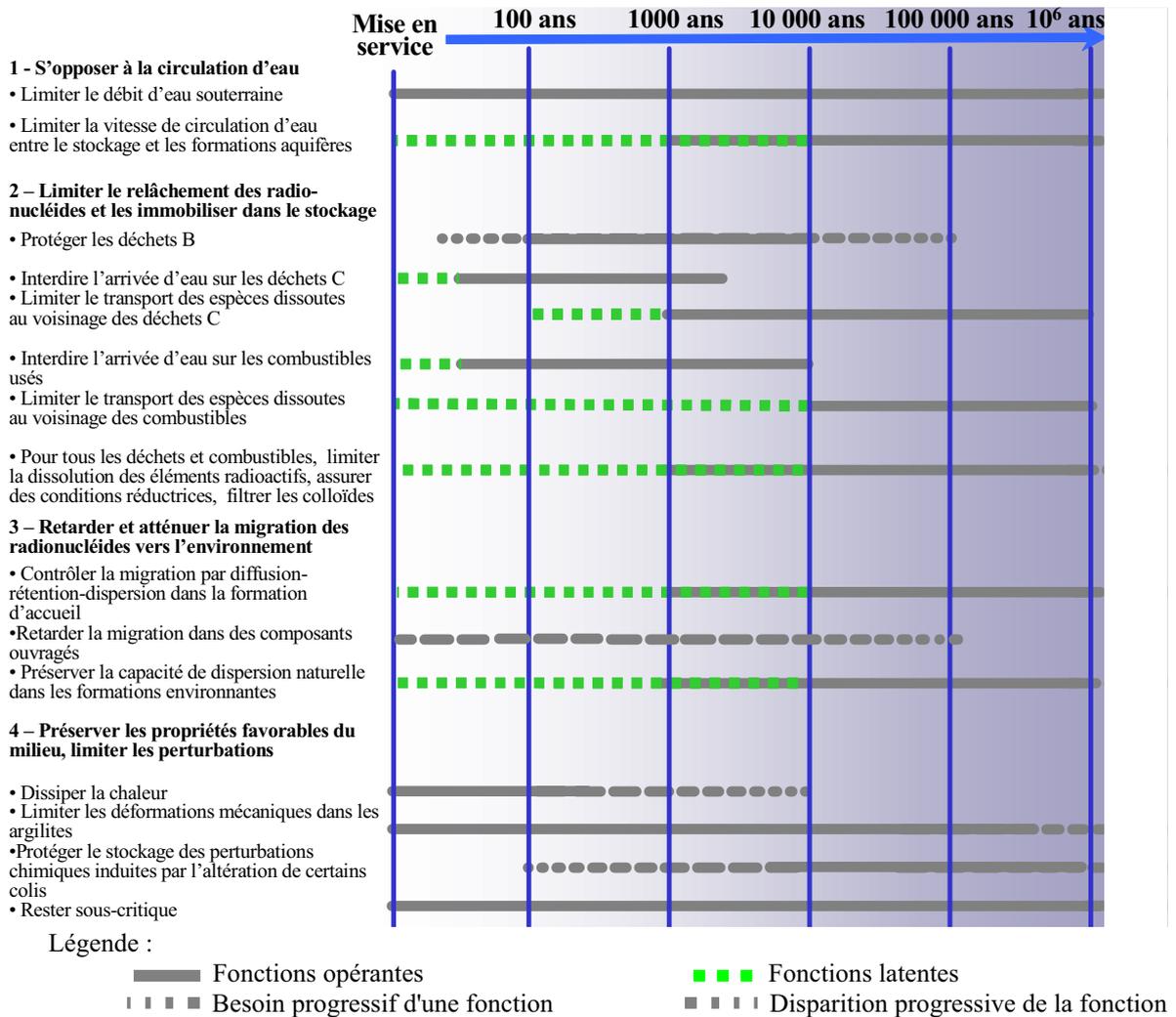


Figure 3.7-14

Fonctions de sûreté au cours du temps

La description des fonctions de sûreté fait apparaître l'existence de trois lignes de défense complémentaires qui perdurent sur toute la durée de l'analyse : une s'appuyant sur la maîtrise de la convection au sein du stockage, une autre permettant de limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage en champ proche, une dernière permettant le retard et l'atténuation des flux.

Ces fonctions permettent de mieux caractériser le rôle des composants que n'aurait permis de le faire la seule notion de « barrière ».

C'est un des buts de l'analyse de risques en exploitation (chapitre 4) et de l'analyse qualitative de sûreté en post-fermeture (chapitre 6) que de vérifier s'il existe des causes de défaillances pouvant compromettre les fonctions de sûreté attendues. On peut cependant constater, dès ce stade, la robustesse du dispositif qui repose :

- sur des composants différents : formation hôte, scellements de puits, scellements de galeries, bouchons d'alvéoles, surconteneur et conteneurs de stockage, matrices des déchets ;
- sur des dispositions de nature différente : maîtrise de la construction des ouvrages, dispositions d'organisation générale du stockage, dispositions constructives, propriétés naturelles du site ;
- sur les redondances de certains composants, essentiellement les scellements placés en série ;
- sur la disponibilité de marges, par exemple les capacités de confinement apportées par les conteneurs métalliques, a priori plus importantes que ce qui est pris en référence.

Les dispositions mises en œuvre pour remplir les fonctions de sûreté constituent un ensemble cohérent faisant appel à un nombre limité de matériaux : argile, béton, acier. Seuls les éléments de dimensionnement principaux, directement dictés par la sûreté, ont été évoqués dans le présent chapitre. Le lecteur trouvera une description plus détaillée, et des explications sur les méthodes de construction, dans le tome dédié à cet objectif [22].

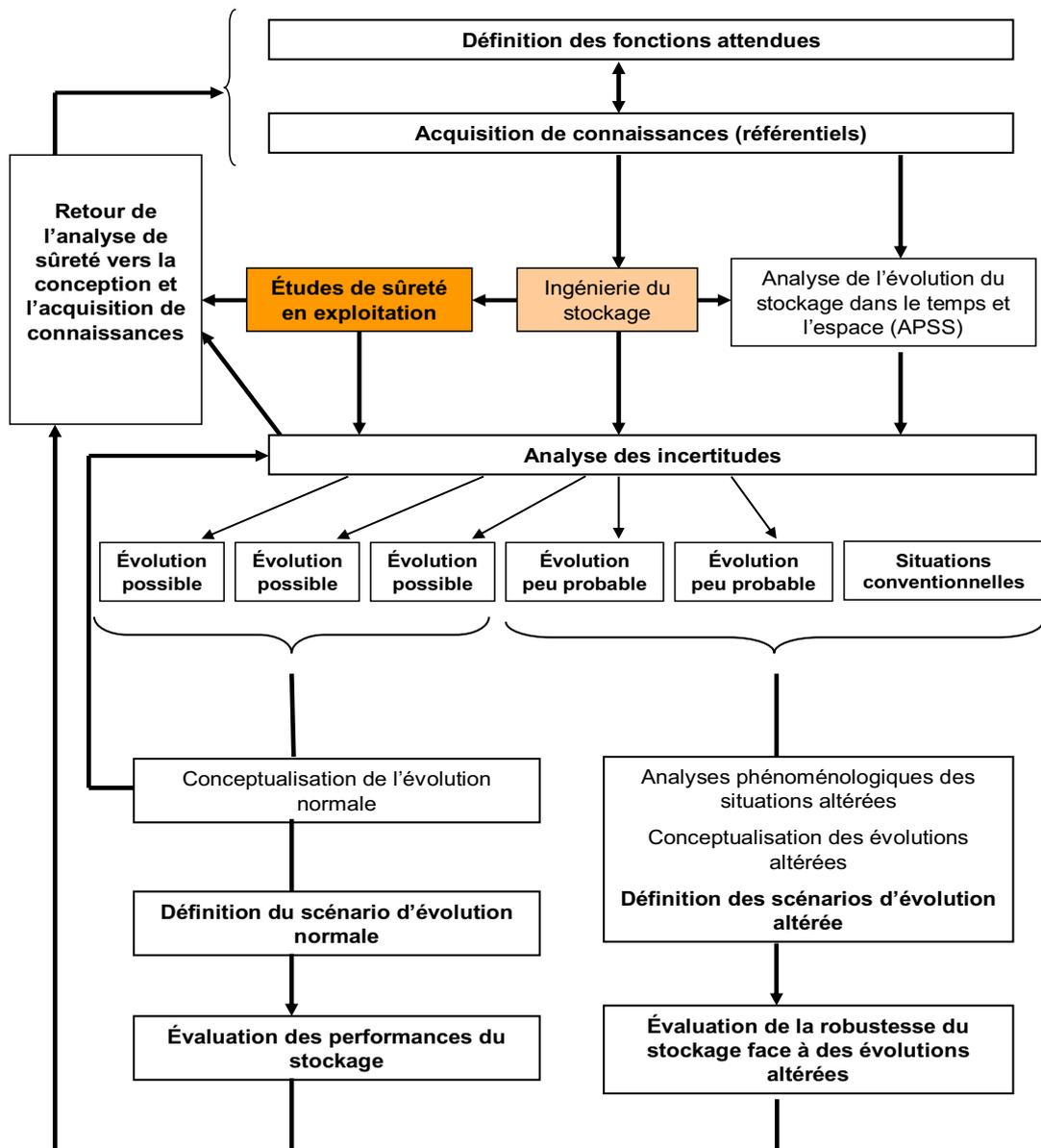
Il reste à ce stade à vérifier que :

- les dispositions de conception retenues permettent bien de répondre aux objectifs de sûreté que s'est fixée l'Andra. Ce sera l'objectif des chapitres 4 (pour la sûreté en exploitation) et 5 (pour la post-fermeture) ;
- de manière plus fine, en consolidant l'ensemble des composants qui constituent l'installation de stockage, que les interactions de toutes natures (thermique, hydraulique, mécanique, chimique et radiologique) ne peuvent remettre en cause les fonctions. Ce sera abordé au chapitre 6 ;
- au-delà de l'évolution attendue, que les fonctions de sûreté permettent également de faire face à des situations de nature incidentelle, que ce soit en exploitation (chapitre 4) ou à long terme (chapitre 7).

4

La sûreté opérationnelle

4.1	Evaluation dosimétrique en exploitation des installations	155
4.2	Analyse de risque	162
4.3	Etude du risque lié à l'émission de gaz explosifs par des colis de déchets B	175
4.4	Etude du risque d'incendie dans les installations souterraines du stockage	178
4.5	Etude des conséquences d'un incendie de l'engin de transfert des hottes (B, C et CU)	187
4.6	Etude des conséquences d'un incendie de l'engin de manutention des colis B	192
4.7	Etude des conséquences d'une chute de cage lors du transfert des colis de stockage en puits	195
4.8	Etude des conséquences d'une chute de colis de stockage B lors de sa mise en place en alvéoles de stockage.....	201
4.9	Synthèse de l'analyse	206



THEME ABORDE EN TANT QUE DE BESOIN DANS LE PRESENT CHAPITRE



THEME TRAITÉ SPECIFIQUEMENT DANS LE PRESENT CHAPITRE

Synoptique 4-1

Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : études de sûreté en exploitation liées à l'ingénierie du stockage

Comme pour toute autre installation industrielle, les différentes activités du stockage (construction, exploitation et fermeture) peuvent induire des risques pour les personnes, le public ou l'environnement.

Ce chapitre présente une première analyse de sûreté opérationnelle qui correspond au niveau actuel de connaissance des installations du stockage et qui prend en compte le retour d'expérience d'installations comparables (voir Synoptique 4-1). Cette analyse permet de s'assurer que les risques sont maîtrisés par des dispositions de conception et d'exploitation en conformité avec les fonctions de sûreté¹⁶ en exploitation définies par l'Andra.

Dans le cadre de cette analyse, une évaluation dosimétrique préliminaire en exploitation des installations est présentée.

Un bilan de l'analyse de risque est également exposé. Il permet de mettre en exergue certains risques particuliers qui ont fait l'objet d'études complémentaires compte tenu de leur spécificité ou de leur influence sur la conception du stockage et de ses équipements.

Ce chapitre présente ensuite une analyse des risques particuliers précédemment identifiés : le risque d'explosion lié à l'émission de gaz par certains colis de déchets, les risques d'incendie dans les installations souterraines en configuration de construction et d'exploitation, le risque de chute de la cage dans le puits de descente des colis lors d'un transfert et le risque de chute d'un colis B lors de sa mise en alvéole. Enfin une synthèse de l'analyse est donnée en conclusion.

4.1 Évaluation dosimétrique en exploitation des installations

L'exploitation d'installations dans lesquelles sont réalisées des opérations de réception, de conditionnement, de manutention et de stockage des déchets nucléaires présente, en raison de la nature des colis de déchets, des risques radiologiques pour les personnes. Ces risques sont de plusieurs natures : risques d'exposition externe (par irradiation) et risques d'exposition interne (par inhalation ou par ingestion).

Cette section présente une première évaluation dosimétrique qui tient compte des dispositions de prévention envisagées vis-à-vis des risques radiologiques. Ces dispositions doivent permettre de limiter l'exposition des personnes en deçà des contraintes de dose annuelle que s'est fixée l'Andra comme objectifs de radioprotection, soit 5 mSv pour le personnel travaillant en zone nucléaire et 0,25 mSv pour le public hors site [26].

Cette évaluation dosimétrique accompagne la démarche de conception des installations vis-à-vis des risques radiologiques, mais ne s'inscrit pas, à ce stade, dans une démarche d'optimisation des doses reçues.

4.1.1 Nature des risques radiologiques et des dispositions envisagées

Les différents risques radiologiques qui concernent les installations du stockage sont exposés dans les paragraphes qui suivent.

4.1.1.1 Risque d'exposition externe

Les colis de déchets nucléaires sont sources d'exposition externe (liée aux rayonnements β , γ et aux neutrons) depuis leur réception dans les installations de surface jusqu'à leur mise en stockage dans les installations souterraines.

¹⁶ Les fonctions de sûreté définies (voir paragraphe 3.6) sont les suivantes :

- protéger les personnes contre l'irradiation,
- confiner la radioactivité,
- maîtriser le risque de criticité,
- évacuer la puissance thermique résiduelle des colis de stockage,
- évacuer les gaz de radiolyse émis par certains colis.

Les emballages de transport contenant les colis primaires livrés sur le site de stockage, ont une fonction de protection radiologique et leur structure est conçue en fonction des caractéristiques radiologiques propres aux déchets transportés. Une fois extraits de leurs emballages, les colis primaires sont manutentionnés et placés en conteneurs de stockage. Ces opérations sont réalisées à l'intérieur de cellules inaccessibles aux opérateurs qui interviendront à distance derrière des écrans de protection radiologique (murs, hublots).

Lors des opérations de transfert jusqu'à la mise en place en alvéoles de stockage, la maîtrise du risque d'exposition externe passe par l'interposition d'écrans de protection radiologique¹⁷ entre les sources radioactives et les personnes pour atténuer les flux de rayonnement. Les hottes de transfert des colis de stockage, les operculaires des alvéoles C et CU ainsi que les portes des alvéoles B jouent ce rôle. La protection ou l'éloignement du poste de commande des engins utilisés pour le transfert ou pour l'introduction des colis en alvéole contribuerait aussi à diminuer les doses reçues par le personnel.

Pendant les opérations de fermeture, des écrans de protection définitifs sont mis en place tels que des blocs de béton pour remplacer les portes métalliques des alvéoles de stockage B et des bouchons métalliques pour les alvéoles C et CU (voir chapitre 5 du tome « architecture et gestion du stockage géologique » [22]). Ces dispositifs faciliteraient les opérations de retour en arrière éventuelles (retrait des colis).

4.1.1.2 Risque d'exposition interne par inhalation de gaz radioactifs émis par les colis de stockage

Certains colis de stockage B (B2 et B5) émettent de faibles quantités de gaz radioactifs (tritium, carbone 14...).

Dans les installations de surface, le nombre limité de colis de déchets présents est tel que la quantité de gaz émis est négligeable. De plus, la plupart des opérations sont réalisées dans des cellules dont l'accès est interdit au personnel.

Au cours du transfert des colis de stockage dans les installations souterraines jusqu'aux alvéoles de stockage, les traces de gaz radioactifs émis par ces colis sont libérées dans les galeries de transfert et relâchées via le circuit de ventilation générale.

Dans les alvéoles de stockage où un grand nombre de colis est stocké, la ventilation avec une extraction de l'air par gaines jusqu'au puits de retour d'air du stockage (voir paragraphe 6.4 du tome « architecture et gestion du stockage géologique » [22]) permet d'évacuer ces gaz sans affecter le personnel présent dans les installations souterraines.

4.1.1.3 Risque d'exposition interne par inhalation de gaz radon émis par les terrains dans les installations souterraines du stockage

Ce risque, présent dès le début de l'activité de construction, est lié au taux d'exhalation naturelle du radon par la roche dans lesquelles seraient positionnées les installations souterraines. Compte tenu de la nature argileuse de la formation du Callovo-Oxfordien, ce risque est limité. Sa maîtrise passe par une ventilation permanente des galeries souterraines qui permet l'évacuation du radon et de ses descendants dans l'atmosphère extérieure.

4.1.1.4 Risque d'exposition interne par ingestion de matières radioactives

Dans les installations de surface, ce risque pourrait être lié à la dispersion de particules radioactives provenant des emballages de transport, des colis (colis primaires, colis de stockage) ou des hottes de transfert.

¹⁷ La nature du matériau de ces écrans dépend du type de rayonnement émis par la source radioactive :

- pour les rayonnements gamma, les matériaux employés sont des matériaux lourds tels que l'acier, le béton, le verre au plomb.
- pour les rayonnements neutroniques, ce sont des matériaux spécifiques (avec bore ou cadmium,...) ou des matériaux hydrogénés.
- les rayonnements alpha et bêta ne nécessitent pas d'écran de nature particulière car ils sont arrêtés par l'enveloppe de colis.

Dans les installations de surface, la gestion de ce risque reposerait sur l'organisation des installations de réception et de préparation en systèmes de confinement¹⁸ afin d'éviter une dispersion de radionucléides vers les zones de circulation du personnel ou dans l'environnement. De plus, ces installations seraient équipées de dispositifs de filtration sur leur circuit de ventilation, à l'instar de ce qui est pratiqué dans des installations nucléaires existantes de même type¹⁹. Enfin il est important de mentionner que des contrôles de non contamination²⁰ des emballages de transport, des colis et des hottes seront réalisés systématiquement.

4.1.1.5 Risque de criticité

Le risque de criticité correspond à une réaction nucléaire en chaîne non contrôlée. Celle-ci est initiée par une augmentation d'activité neutronique sur des matières fissiles (uranium 235, plutonium 239 et 241).

Les colis B et C ne contiennent pas une quantité suffisante de matières fissiles (masse critique) nécessaire à ce type de réaction. Les colis de combustibles usés sont les seuls concernés par ce risque [45].

Au niveau des installations nucléaires de surface, pour les combustibles usés, il faut s'assurer de l'absence d'arrivée d'eau²¹ dans les cellules de conditionnement pour s'affranchir du risque de criticité, à l'instar de ce qui se pratique dans des installations d'entreposage similaires existantes sur les sites de production des déchets.

Dans les installations souterraines, le transfert des colis et leur mise en stockage se fait à sec. Il n'y a pas de risque de criticité associé.

4.1.2 Évaluation dosimétrique sur le site et en limite de site

Cette première évaluation, basée sur les caractéristiques radiologiques des colis, rappelées ci-après, tient compte des dispositions envisagées (écrans de protection radiologique, contrôles de non contamination et mesures de surveillance...).

4.1.2.1 Données prises en compte

● Exposition externe

Les valeurs de débits d'équivalent de dose (DED) relatives aux colis primaires sont données pour les différents types de colis (voir Tableau 4.1-1).

¹⁸ Le principe d'un système de confinement est de créer une différence de pression d'air entre locaux adjacents.

¹⁹ Ces dispositifs de filtration sont d'autre part justifiés par la prise en compte de situations accidentelles, en particulier pour la réception et le conditionnement des combustibles usés nus dont la surface serait contaminée par les produits de corrosion déposés et activés lors du passage de l'assemblage combustible en réacteur (voir paragraphe 4.2.2.2).

²⁰ Les seuils d'acceptation pourraient être ceux de la Réglementation des Transports, à savoir une contamination surfacique labile (non fixée) limitée à 4 Bq/cm² en émetteurs β, γ et 0,4 Bq/cm² en émetteurs α [49].

²¹ La présence d'eau, qui atténue l'énergie des neutrons et ralentit leur vitesse, les rend plus réactifs vis-à-vis des matières fissiles et a pour effet d'augmenter la réactivité du système. Aussi, les procédés retenus pour le conditionnement des colis sont des procédés à sec, sans apport d'eau.

Type de colis	Nature du contenu	DED ²² maximum au contact du colis primaire (Sv.h ⁻¹)	
B	B1, B7.2	Déchets activés compactés	25
	B2	Déchets bitumés	2
	B3, B7.1, B7.3, B8	Déchets technologiques compactés ou cimentés	0,5
	B4	Déchets de structures cimentés	0,5
	B5	Déchets de structures compactés avec ou sans déchets technologiques	15
	B6	Déchets de structures et technologiques mis en fût	2
C	C0	Déchets vitrifiés	150
	Autres C	Déchets vitrifiés	250
CU	CU1 (UOx)	Assemblage de combustibles usés	25
	CU2 (MOx)	Assemblage de combustibles usés	15
	CU3	Combustibles usés	150

Tableau 4.1-1 Débit d'équivalent de dose au contact des colis primaires [18]

● Exposition interne

L'exposition par inhalation est liée d'une part aux gaz et aérosols radioactifs émis par certains colis B depuis leur réception dans les installations de surface jusqu'à leur mise en alvéole de stockage, et d'autre part au radon qui est un gaz émis naturellement par le milieu géologique dans les galeries des installations souterraines ainsi que par certains colis B.

Gaz radioactifs émis par les colis

Certains colis contiennent des traces de gaz radioactifs. Des dispositions ont été présentées (voir chapitre 4 du tome « architecture et gestion du stockage géologique » [22]) pour réduire le relâchement de ces gaz. Cependant, les mesures ne s'appliquent pas aux colis générant également de l'hydrogène par radiolyse (cela concerne essentiellement les colis B2 et B5.1). Pour le colis type B5.1, le plus pénalisant en la matière, les taux de relâchement retenus (en becquerels par heure et par colis primaire) sont respectivement de 420 pour le tritium, 420 pour le carbone 14 et 7 080 pour le krypton 85 [18].

Gaz radon émis par les terrains dans les installations souterraines

Le taux d'exhalation du radon par les terrains est variable en fonction de divers éléments tels que la ventilation et la nature du revêtement des galeries. À ce stade, la valeur retenue correspond à la valeur moyenne observée en France.

4.1.2.2 Évaluation dosimétrique

L'évaluation dosimétrique [46] est faite pour chaque type de poste de travail identifié sur le site de stockage, ainsi que pour le public en limite de site.

● Évaluation dosimétrique pour le personnel affecté aux installations nucléaires du stockage

Les résultats sont présentés en distinguant les différents postes de travail dans les installations de surface et dans les installations souterraines (voir Tableau 4.1-2).

²² Pour les colis faiblement ou fortement exothermiques, les valeurs indiquées ici correspondent à un âge des colis de 5 ans pour les B1, 10 ans pour les B5 et les CU3, 20 ans pour les C0, 60 à 70 ans pour les C, 60 ans pour les CU1 (UOx) et 90 ans pour les CU2 (MOx).

● **Exposition externe**

L'exposition aux rayonnements ionisants des personnes est fonction de la nature et du flux annuel des colis de déchets reçus ainsi que du processus d'exploitation. Ce dernier est défini par le mode de conduite des installations et des équipements (conduite en local, à distance, ou depuis une salle de conduite) ainsi que par la durée nécessaire pour réaliser les différentes opérations liées à l'exploitation du stockage (voir chapitre 9 du tome « architecture et gestion du stockage géologique » [22]).

À partir de ces données, l'évaluation dosimétrique est réalisée de la manière suivante :

- pour chaque activité liée à la production, une évaluation de la dose annuelle est faite, en tenant compte du nombre de fois où cette opération est répétée pendant l'année. La dose moyenne reçue par un opérateur est calculée à partir de l'estimation du nombre total d'opérateurs prévus pour chacune de ces opérations ;
- pour les activités non liées directement à la production (salle de conduite, surveillance des installations,...), l'évaluation dosimétrique est faite directement pour le poste considéré.

● **Exposition interne**

L'exposition par ingestion de matières radioactives a été considérée comme négligeable en raison des mesures de prévention prises.

L'exposition par inhalation de gaz radioactifs a deux composantes :

- pour les colis B émetteurs des gaz radioactifs, l'hypothèse retenue est celle du transfert en hotte d'un colis de stockage B5.1 dans une galerie faiblement ventilée. Les expositions du personnel estimées à partir des activités volumiques et des coefficients de dose relatifs à l'inhalation pour le tritium et le carbone 14 sont négligeables (de l'ordre de 10^{-3} mSv par an) ;
- en ce qui concerne les doses liées au radon issu du milieu géologique, la valeur annuelle retenue est de 0,5 mSv pour l'ensemble des opérateurs travaillant dans les installations souterraines, en zone nucléaire comme en zone de travaux.

Résultats

Activité	Type de colis	Dose annuelle par opérateur (mSv/an/opérateur)
Installations nucléaires de surface		
Réception des colis primaires	B / C	2,1
	CU (UOx)	4
Contrôle des colis primaires	B / C	1
	CU (UOx)	1
Introduction des conteneurs vides	B / C	1,3
	CU (UOx)	1
Préparation des colis de stockage	B	1,5
	C	1,5
	CU (UOx)	1,4
Contrôle des colis de stockage	B	1
	C	0,9
	CU (UOx)	0,8
Mise en hotte des colis de stockage et contrôle des hottes de transfert au jour	B	1,6
	C	0,9
	CU (UOx)	1
Salle de conduite surface	/	0,5
Surveillance surface	/	2,3
Maintenance surface	/	3,7
Installations nucléaires souterraines		
Transfert et mise en alvéole des colis de stockage	B	1,2
	C	1,3
	CU (UOx)	4
Pose des bouchons des alvéoles	C	0,6
	CU (UOx)	0,9
Contrôle des hottes de transfert au fond	B	0,9
	C	1,1
	CU (UOx)	0,8
Salle de conduite fond	/	0,5
Surveillance / Maintenance fond	/	2,2

Tableau 4.1-2 Estimation de la dose annuelle reçue par les opérateurs (mSv/an/personne) affectés aux installations nucléaires du stockage

Ces résultats permettent de constater que les valeurs les plus élevées, comprises entre 2 et 4 mSv/an, seraient associées à la réception des colis primaires, au transfert et à la mise en alvéole des colis de stockage et à la surveillance et à la maintenance des installations. Les valeurs associées aux autres activités seraient inférieures à 2 mSv/an.

Les doses reçues par les personnes présentes sur le site seraient donc inférieures à la contrainte que s'est fixée l'Andra (5 mSv/an), nettement en dessous de la limite réglementaire (20 mSv/an).

● Évaluation dosimétrique pour le public en limite de site

L'exposition externe n'est pas prise en considération pour le public dans cette estimation compte tenu de la distance qui le sépare des installations nucléaires.

L'exposition interne liée aux gaz radioactifs émis par certains colis B et rejetés dans l'environnement a été estimée en supposant le stockage en fin d'exploitation, c'est-à-dire avec l'ensemble de l'inventaire de déchets B considérés (voir chapitre 3 du tome « architecture et gestion du stockage géologique » [22]). Cette estimation préliminaire a été faite en limite du site de stockage, considérée à 500 mètres de

la cheminée d'extraction d'air des installations souterraines. Le calcul, qui tient compte des activités radiologiques libérées par les colis et d'un facteur de transfert à l'homme intégrant les trois voies d'atteintes à l'organisme, montre que la dose annuelle pour une personne du public, de l'ordre de 1 μ Sv, serait négligeable.

L'exposition interne liée au gaz radon diffusé par les déblais d'argilites stockés sur la verse en surface ou lié au rejet de la ventilation des installations souterraines du stockage dépendra de multiples facteurs : taux d'exhalation du radon par les argilites, débit de ventilation dans les installations souterraines et hauteur de la cheminée de rejet, longueur et type de galeries ouvertes (galeries en travaux ou en exploitation), conditions locales atmosphériques. Comme dans le cas précédent, elle peut être considérée comme négligeable, compte tenu de la nature du milieu géologique et du retour d'expérience.

4.1.3 Conclusion

Compte tenu des mesures prises vis-à-vis du risque radiologique au niveau de la conception des installations et de leur mode d'exploitation, les doses reçues par les personnes présentes sur le site ou par une personne du public en limite de site devraient être inférieures aux contraintes annuelles que s'est fixée l'Andra en matière de radioprotection, et nettement en deçà des limites réglementaires. Il convient aussi de rappeler que ces estimations sont préliminaires et ne tiennent pas compte d'une démarche d'optimisation ultérieure.

4.2 Analyse de risque

Cette section dresse un bilan des risques identifiés dans les installations pour l'ensemble des activités du stockage (construction, exploitation, fermeture) et propose des mesures de réduction associées. Elle différencie les risques « internes » liés aux activités conduites sur le stockage et les risques « externes » liés à l'environnement du stockage (qui sont traités de manière plus générique).

Les risques examinés dans le cadre de l'étude sont ceux qui sont susceptibles d'avoir des effets sur les personnes ou l'environnement. En revanche, les conséquences opérationnelles (détérioration de l'outil de travail, baisse de production) ne sont pas abordées à ce stade.

Ce bilan [46] permet de mettre en exergue certains risques particuliers qui ont fait l'objet d'études complémentaires (voir paragraphes 4.3 à 4.8) compte tenu de leur spécificité ou de leur influence sur la conception du stockage et de ses équipements.

4.2.1 Méthodologie

L'analyse commence par l'identification des sources de danger associées aux activités du stockage. Elle a été réalisée avec l'appui d'experts dans les différents domaines techniques concernés (installations nucléaires, équipements de transport en puits, tunnels souterrains...) qui ont utilisé des listes types de dangers²³ et qui ont apporté leur expérience relative à des installations comparables.

Cette analyse qui a été structurée par composantes physiques (installations de surface, puits d'accès, installations souterraines) et par activités (construction, exploitation, fermeture) tient compte de manière systématique du respect des fonctions de sûreté en exploitation du stockage. Elle a permis d'avoir la vision la plus exhaustive possible, à ce stade des études, des risques susceptibles d'être encourus par le personnel et l'environnement.

Les risques sont caractérisés par une source de danger et des mesures de réduction de risques. Celles-ci comprennent des mesures de prévention pour empêcher ou minimiser l'apparition du risque ainsi que des mesures de protection, qui interviennent pour en annuler ou limiter les effets (voir Figure 4.2-1). Des mesures de surveillance complètent les mesures de réduction de risques.

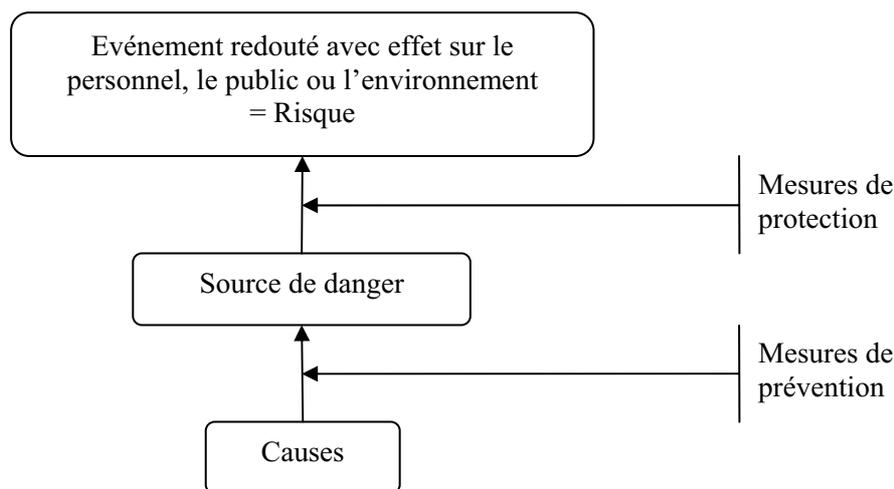


Figure 4.2-1 Caractérisation d'un risque

²³ Parmi les listes-type de dangers, la liste MADS (Méthode d'Analyse des Défaillances des Systèmes) et la liste MOSAR (Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques) sont le plus couramment utilisées pour une analyse de risque d'une installation industrielle.

Cette caractérisation conduit à porter un jugement qualitatif sur le niveau de risque résiduel qui subsiste malgré les mesures de réduction de risque proposées. Cette appréciation d'experts est faite en fonction de la vraisemblance d'apparition du risque et de l'importance de ses conséquences potentielles sur le personnel, le public ou l'environnement.

4.2.2 Risques internes relatifs au processus de stockage

L'ensemble des risques internes au stockage identifiés est présenté par type de risques en distinguant successivement les risques « conventionnels » qui sont rencontrés classiquement dans toute installation industrielle et les risques de nature radiologique liés à la présence des colis de déchets nucléaires.

4.2.2.1 Risques conventionnels

● Risques recensés

Les principaux risques conventionnels à prendre en considération au cours du processus de stockage [46] sont le risque d'écrasement de personnes consécutif à une chute de charges, une chute de blocs en galeries, une chute d'objets en puits, le risque d'écrasement par un équipement (coincement par un mobile au cours d'une opération de maintenance en puits ...), le risque de heurt par un engin, le risque de collision entre engins, le risque de chute lié à des travaux en élévation (notamment en puits), le risque d'électrisation et le risque d'incendie.

Les risques inhérents à l'ambiance de travail (bruit, poussières, gaz carbonique et monoxyde de carbone émis par les engins...) qui se distinguent des risques précédents par leur effet à plus ou moins long terme doivent aussi être contrôlés et maîtrisés, notamment dans les installations souterraines.

Les autres risques recensés ne revêtent pas la même importance. Parmi ceux-ci, deux risques associés à une perte temporaire de la ventilation dans les installations sont à noter. Il s'agit du risque d'explosion liée à l'émission de gaz explosifs en faible quantité par certains colis de déchets B (B2, B5) qui apparaît peu vraisemblable compte tenu des débits de ventilation prévus dans les installations qui assureront la dilution de ces gaz. Toutefois, ce risque a fait l'objet d'une étude particulière pour conforter cette analyse. Le risque associé à la présence de colis exothermiques (colis C et CU) est également à mentionner même si les températures au niveau de l'enveloppe métallique des hottes qui les transportent ne dépasseraient pas une trentaine de degrés et ne pourraient pas entraîner de brûlures pour le personnel.

● Mesures de réduction de risques

La réduction des risques repose d'abord sur la prévention avec un choix d'équipements et d'engins adaptés, fiables, munis de toutes les sécurités nécessaires et bien entretenus ainsi que sur la formation du personnel, la sensibilisation aux différents types de risques encourus, le respect des procédures et des règles de circulation, le port d'équipements de protection individuelle²⁴.

Dans les installations souterraines, la mise en place de protections physiques (notamment pour les travaux en puits), l'utilisation d'engins dont les postes de commande sont en retrait de la zone du front du chantier, l'équipement des réseaux de sécurité des chantiers (réseau d'eau incendie, réseau de communication...) au fur et à mesure de leur progression contribuent aussi à réduire les risques encourus par le personnel.

Parmi tous les risques évoqués, le risque d'incendie se distingue des autres par le fait qu'il peut avoir des conséquences collectives et nécessite des dispositions spécifiques d'évacuation pour les personnes.

Dans les installations de surface, les risques d'incendie apparaissent limités : les armoires électriques (ou électroniques) apparaissent comme la principale source d'ignition possible. Les mesures de

²⁴ Parmi ces équipements individuels, on peut citer les chaussures de sécurité, les casques anti-bruit, les masques anti-poussières, les équipements de respiration autonomes (auto-sauveteurs) à utiliser en présence de fumées...

prévention, de détection et de limitation des conséquences d'un incendie qui seraient retenues répondraient au Code du travail et suivraient les Règles fondamentales de sûreté RFS I.4.a [47] et RFS II.2 [48]. Il serait aussi tenu compte du retour d'expérience d'installations nucléaires présentant des fonctions analogues à celles mises en œuvre dans les installations du stockage. Les principales dispositions concernent le choix de matériaux non propagateurs d'incendie, la limitation de la charge calorifique des locaux (liée au choix de la manutention par pont roulant ou engin électrique), la sectorisation des locaux à risques d'incendie, la stabilité au feu des éléments porteurs. L'installation de systèmes de détection incendie, la maîtrise de la ventilation avec un système d'extraction des fumées et l'existence de circuits d'évacuation (avec des dégagements protégés en surpression, des sas de non enfumage...) participent également à la sécurité des personnes.

Dans les installations souterraines, les principes adoptés sont un système de ventilation permettant l'extraction des fumées et l'existence de liaisons entre galeries adjacentes favorisant l'évacuation des personnes. Il est plus difficile de faire référence à d'autres installations existantes (tunnels de circulation, mines souterraines) car les solutions apportées sont liées à la configuration de chaque installation.

● Synthèse

Un bilan de l'analyse (voir Tableau 4.2-1) est présenté par type d'activité (construction, exploitation, fermeture). La conduite de travaux associés à un retrait éventuel des colis de stockage a également été envisagée.

Ce tableau permet de tirer les enseignements suivants :

- l'analyse ne montre pas de différences notables quant à la nature des risques entre les différentes activités de construction, d'exploitation et de fermeture, voire de retrait des colis²⁵ ;
- les principaux risques recensés qui correspondent à des risques classiques pour lesquels les mesures de prévention sont connues ne nécessitent pas d'études particulières à ce stade des études ;
- un complément d'études est en revanche justifié s'il s'agit d'un risque spécifique à l'activité du stockage, comme c'est le cas pour le risque d'explosion associé à certains colis de déchets B (voir paragraphe 4.3) ou s'il a une influence importante sur la conception des installations du stockage et de ses équipements, comme c'est le cas pour le risque d'incendie dans les installations souterraines (voir paragraphe 4.4).

²⁵ Les risques qui seraient liés à un éventuel retrait des colis ne se distingueraient pas non plus des risques identifiés car les techniques et équipements propres à ces travaux seraient très similaires à ceux utilisés durant les activités d'exploitation. .

Activités Risques	Construction	Exploitation			Fermeture	Retrait éventuel de colis
		Installations de surface	Transfert jour / fond	Installations souterraines		
Écrasement de personnes lié à une chute d'objet	X	X	X	X	X	X
Écrasement de personnes lié à un équipement ou un engin	X	X	X	X	X	X
Chute de personnes liée à travaux en élévation	X		X	X	X	X
Électrification	X	X	X	X	X	X
Incendie (surface)	X	X			X	X
Incendie (souterrain)	X		X	X	X	X
Pollution et nuisances dans l'ambiance de travail	X				X	
Explosion liée aux relâchements de gaz explosifs		X		X	X	X
Échauffement lié aux dégagements thermiques des colis						

X	Risque à prendre en compte		Risque négligeable		Sans objet		Risque faisant l'objet d'une étude complémentaire
---	----------------------------	--	--------------------	--	------------	--	---

Tableau 4.2-1 *Bilan relatif aux principaux risques conventionnels associés au processus de stockage*

4.2.2.2 Risques radiologiques

Les risques de nature radiologique (risques d'exposition externe, risque d'exposition interne, voire risque de criticité) susceptibles d'être rencontrés au cours du processus de stockage pourraient être associés à des défauts de protection radiologique, à des interventions à proximité d'une source radioactive ainsi qu'à un incendie ou une chute affectant les colis de déchets.

Compte tenu de leur spécificité, ces risques sont analysés individuellement en mettant l'accent sur les mesures de réduction de risques envisagées.

- **Défaut de la protection radiologique assurée par les portes, trappes et hublots des cellules, les hottes de transfert, les operculaires des alvéoles C et CU, les fermetures des alvéoles B**

Ces événements pourraient résulter, par exemple, d'un jeu entre parties mobiles non conforme au dimensionnement initial. Les mesures à prendre vis-à-vis de ce risque seraient un programme de maintenance spécifique de ces parties mobiles associé à une surveillance par des détecteurs d'irradiation au niveau des cellules, des hottes de transfert et des alvéoles de stockage.

- **Défaut de protection radiologique au cours d'une intervention**

Le dysfonctionnement d'un équipement peut conduire à son immobilisation alors qu'il est utilisé pour porter ou manipuler un colis (colis primaire ou colis de stockage) et nécessiter l'intervention du personnel de maintenance pour dépanner l'équipement concerné. Cette situation entraînerait l'exposition externe du personnel si celui-ci était amené à opérer à proximité de la source irradiante.

Les mesures préventives seraient les mesures classiquement retenues dans les Installations nucléaires de base (INB) en exploitation, à savoir une maintenance adéquate des équipements utilisés et la redondance de certains constituants (motorisation...).

Pour les interventions sur des équipements en cellule, l'existence de moyens de secours permettant de déposer le colis et de ramener l'équipement à vide dans son local de maintenance empêcherait tout risque d'exposition pour les personnes. Dans ce dernier cas, il faut cependant s'assurer qu'il n'y a pas de dysfonctionnement du système de fermeture de la zone irradiante de la cellule²⁶ en procédant à un contrôle préalable du niveau d'irradiation dans le local de maintenance avant toute intervention.

- **Incendie dans une cellule des installations de surface**

Un incendie en cellule de fabrication des colis de stockage aurait une puissance thermique peu importante, compte tenu de la faible charge calorifique des équipements installés.

La conception des installations en tenant compte de l'expérience des INB avec une limitation des charges calorifiques présentes et la mise en place éventuelle d'écrans thermiques autour de certains équipements devraient permettre de limiter la puissance et l'extension d'un incendie afin qu'il ne puisse affecter les colis et avoir des conséquences radiologiques.

- **Incendie d'un engin de transport ou de manutention des colis de déchets**

L'incendie du véhicule porteur des emballages (contenant les colis primaires provenant des producteurs de déchets), de l'engin porteur de la hotte (contenant des colis de stockage) ou de l'engin de manutention des colis B en alvéole de stockage pourrait avoir des conséquences radiologiques qui s'ajouteraient aux conséquences directes de l'incendie (voir paragraphe 4.4).

En surface, dans le cas du véhicule porteur des emballages, celui-ci ressort du local de réception des colis dès que l'emballage a été déposé, ce qui limite la présence du principal initiateur du risque. De plus, l'emballage de transport est conçu pour résister à un incendie de 800 °C pendant 30 minutes suivant les normes de transport [49].

Dans les installations souterraines, l'engin porteur de hotte, comme l'engin de mise en place des colis B en alvéole de stockage, ne sont connus que de manière simplifiée à ce stade de l'étude et il n'y a pas de référence correspondante. Il a donc été nécessaire de faire des simulations en faisant des hypothèses sur les puissances thermiques en jeu et la nature des échanges au cours de l'incendie. Ces études sont développées dans les paragraphes 4.5 (engin porteur de hotte) et 4.6 (engin de manutention des colis B).

²⁶ Le système usuellement retenu consiste à asservir l'ouverture du local de maintenance avec la fermeture de la cellule irradiante et, si possible, de localiser la zone de maintenance à l'écart du champ de rayonnement potentiel des sources radioactives présentes dans la cellule.

● **Chute d'un colis primaire dans les installations nucléaires de surface**

La manutention des colis primaires pourrait être la cause de leur chute et de leur endommagement. Les conséquences envisageables seraient une ouverture d'un (des) colis primaire(s) et une dispersion de matières radioactives dans les installations, puis dans l'environnement, via les circuits d'extraction d'air. Une chute pourrait aussi entraîner la mise en suspension d'une contamination surfacique du colis qui aurait échappé aux différents contrôles (voir paragraphe 4.1.1.4).

Les mesures de prévention sont spécifiques à chaque équipement. Il s'agit de dimensionner les organes des équipements par rapport à des sollicitations supérieures à celles attendues, d'assurer une redondance de certains composants et de concevoir des dispositifs intrinsèquement sûrs en cas de dysfonctionnement (par exemple, le maintien en position fermée du grappin en cas de défaut d'alimentation électrique). La formation du personnel et la maintenance ont également une grande importance vis-à-vis de ce risque. De plus, le procédé mécanique mis en œuvre doit privilégier la manutention des colis à une faible hauteur inférieure à leur hauteur de résistance à la chute.

La mesure de protection pour s'affranchir d'un éventuel relâchement de matières radioactives serait l'installation d'une filtration sur le circuit d'extraction d'air des cellules de réception des colis primaires et de préparation des colis de stockage.

Cette mesure se justifierait en particulier pour certains colis primaires B, comme le colis de boues bitumées, qui n'est pas totalement à l'abri d'une défaillance du sertissage de son couvercle et de son ouverture en cas de choc.

Il en serait de même pour les locaux de réception d'assemblages de combustibles usés nus dont la chute lors des opérations de manutention nécessaires jusqu'à leur conditionnement pourrait entraîner une rupture de la gaine des crayons combustibles. Les principales dispositions de gestion de ce risque pourraient être similaires à celles retenues pour le déchargement à sec de ce type de combustibles en usine de retraitement (atelier T0 de Cogema à La Hague).

● **Chute d'un colis B au moment de sa mise en stockage²⁷**

L'utilisation de l'engin avec transport du colis en position basse tout au long de l'alvéole limite le risque de chute à la phase de levage et de mise en place du colis à son emplacement de stockage. Au cours de cette opération, une erreur de repérage de la position attendue du colis à stocker, ou un dysfonctionnement du système de levage de l'engin utilisé pourrait être la cause d'une chute d'une hauteur de 4 à 6 mètres, pour les colis placés sur le plus haut niveau des empilements.

Plusieurs dispositions sont envisagées pour limiter l'occurrence de ce risque et ses conséquences :

- la procédure de stockage, avec une mise en place d'une rangée de colis posés sur le sol, puis celle des colis de la deuxième couche et ainsi de suite, limite le risque au seul basculement latéral du colis ;
- le contrôle du cycle de mise en stockage des colis (cycle validé pas à pas par l'opérateur, contrôle visuel au moyen de caméras) et une vérification préalable de la position de stockage en adéquation avec la cartographie de l'alvéole devraient éviter toute erreur de positionnement au moment de la pose du colis ;
- le choix d'un engin conçu pour avoir une bonne stabilité (voir paragraphe 9.3 du tome « architecture et gestion du stockage géologique » [22]) dans toutes les positions de la charge et, sur le système de levage, des dispositions telles que des freins et capteurs de sécurité, la redondance de différents constituants du système de levage, une alimentation électrique doublée, un dispositif pour affaler la charge en cas de détection d'anomalie devraient permettre de prévenir le risque de chute. Ces différents dispositifs devraient être contrôlés régulièrement ;
- les colis de stockage assurent en cas de chute une protection des colis primaires contenus.

²⁷ Les procédés envisagés pour la mise en alvéole des colis C et CU (voir paragraphe 9.3 du tome architecture [22]) nécessitent une hauteur de manutention inférieure à 2 mètres. De ce fait, ces cas de chute ne sont pas traités.

Afin de quantifier les déformations subies par les colis de stockage en cas de chute et examiner quelles en seraient les conséquences, une première approche a été de faire une étude de simulation pour vérifier la tenue des colis à la chute (voir paragraphe 4.8). Il a été prévu de valider ces résultats par des essais de chute de colis de stockage B2 et B5 à échelle réelle au cours de l'année 2005.

● **Dérive incontrôlée ou chute de la cage chargée de la hotte de transfert du colis de stockage B, C ou CU dans le puits²⁸**

L'expérience acquise dans les mines sur ce type de transport et l'ensemble des mesures de prévention et de contrôles sont tels qu'une chute de la cage est un événement dont la vraisemblance est extrêmement faible²⁹ [50].

Les mesures de prévention de ce risque concernent aussi bien la conception de l'équipement (dispositifs indépendants de freinage sur la poulie motrice, faisceau de câbles de suspension de la cage indépendants³⁰,...) que les procédures de maintenance, de contrôle et de fonctionnement. Il pourrait être envisagé d'ajouter à ces mesures un système anti-chute de la cage pour avoir un système de sécurité supplémentaire indépendant du système de contrôle-commande de la cage. Le principe de ce système serait d'utiliser des câbles suspendus dans le puits comme câbles de freinage sur lesquels la cage pourrait se bloquer en cas de survitesse. Pour limiter les contraintes subies par ces câbles au moment de leur sollicitation, ceux-ci seraient reliés à des amortisseurs d'énergie qui pourraient dissiper une grande partie de l'énergie cinétique liée au mouvement de la cage.

Les mesures qui limiteraient les conséquences mécaniques d'une dérive ou d'une chute de la cage en puits seraient de deux types :

- un système de freinage de fin de course, d'un type similaire à ce qui est installé réglementairement en mine quelques mètres en dessous de la recette fond, permettrait d'arrêter une cage dépassant son niveau d'arrêt, si sa vitesse ne dépassait pas 10 m/s environ. Il répond au cas d'une dérive de la cage liée à un dysfonctionnement du freinage au moment de son arrivée à la recette ;
- pour des vitesses supérieures à 10 m/s, un amortisseur de chute constitué par un matériau de type « nid d'abeille » et placé en partie inférieure du puits aurait l'avantage d'être un système passif capable d'absorber des niveaux d'énergie importants. Des tests en laboratoire ont permis de caractériser le comportement de ce matériau pour des impacts à vitesse élevée (voir Figure 4.2-2).

²⁸ D'autres cas de chute ont été envisagés avec la chute directe de l'engin porteur de hotte dans le puits (la cage n'étant pas en position) ou la chute de la hotte à travers le plancher de la cage (suite à un choc ou à une faiblesse de sa structure). L'identification de ces deux cas, qui apparaissent encore moins vraisemblables que le précédent [50] servent surtout à justifier le renforcement de mesures de prévention, sur les accès à la cage, et sur le contrôle régulier de l'état du puits et de la cage.

²⁹ En Allemagne, une étude faite pour le projet de stockage de déchets radioactifs de Gorleben [50] estime, pour une installation comparable, que la probabilité d'une chute de cage en puits est de 5.10^{-7} /an (pour 5 000 heures de fonctionnement annuel).

³⁰ L'étude actuelle prévoit un système avec 10 câbles de suspension indépendants permettant le transport de charges d'une centaine de tonnes. Il y a arrêt en cas de rupture d'un seul câble, ce qui rend la rupture en cascade de l'ensemble multi-câbles improbable.

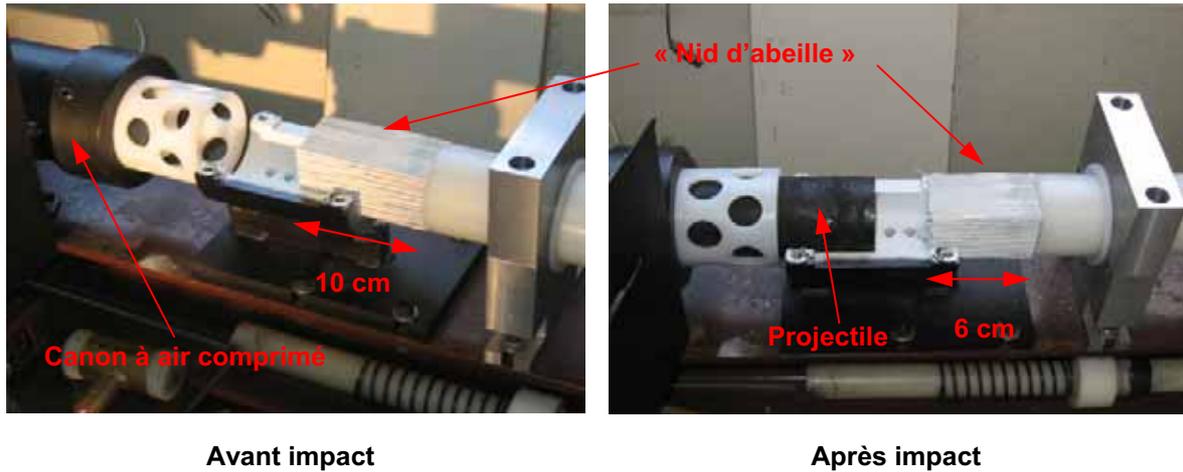


Figure 4.2-2 Test d'écrasement d'un matériau « nid d'abeille » (vitesse d'impact de 200 km/h)

Ces différentes mesures sont illustrées par la Figure 4.2-3.

La quantification de l'effet de l'amortisseur d'énergie sur les colis transportés dans la cage a nécessité des études de simulation développées dans le paragraphe 4.7. Elles permettent de constater qu'au moment de l'impact, l'amortisseur et la cage absorberaient la majeure partie de l'énergie. La structure métallique de la hotte de transfert serait déformée mais ne montrerait pas d'ouverture. Les colis primaires devraient rester intègres, même si dans le cas des colis B, l'enveloppe béton de leur colis de stockage serait endommagée.

Cependant, compte tenu des incertitudes liées au déroulement de la chute de la cage dans le puits qui ne seraient pas couvertes par les études de simulation évoquées précédemment, des scénarios de relâchement de matières radioactives ont été également envisagés dans le paragraphe 4.7 afin d'obtenir un ordre de grandeur des conséquences radiologiques de la chute et de s'assurer qu'il existe des moyens techniques permettant, le cas échéant, d'en limiter l'impact à un niveau acceptable pour l'environnement.

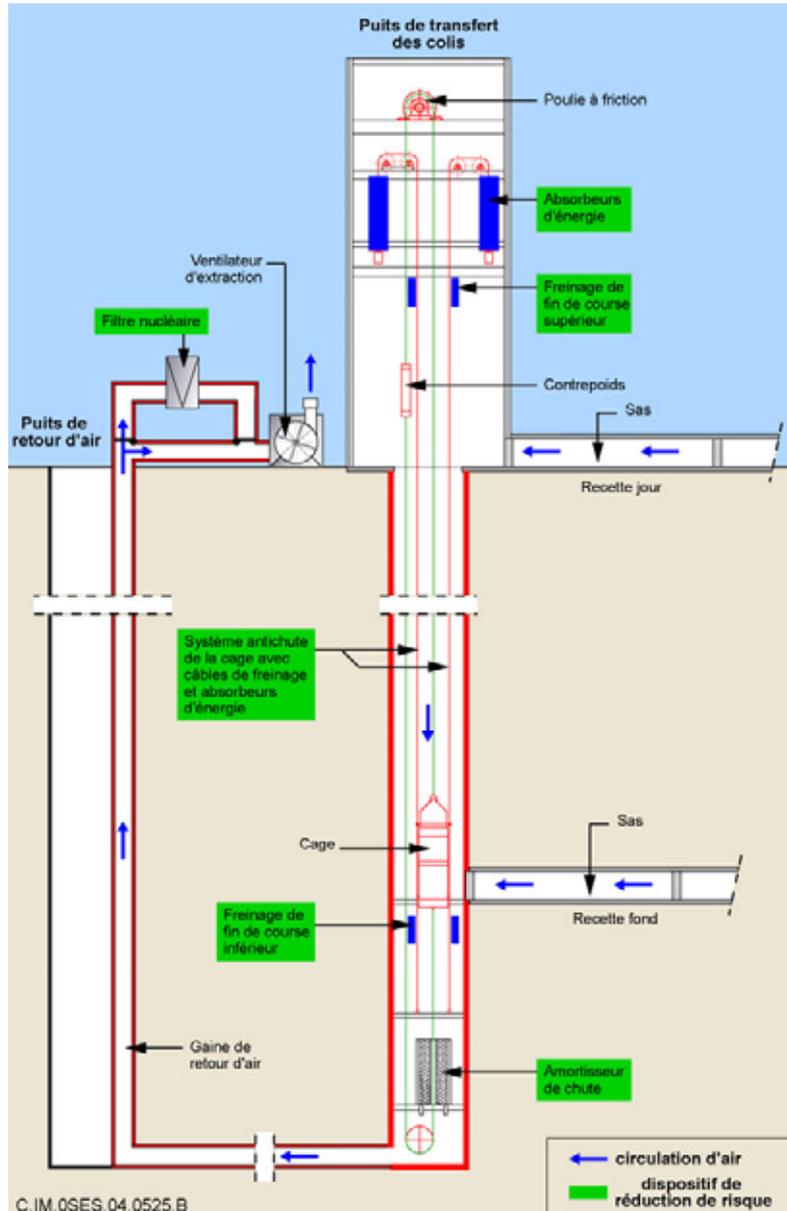


Figure 4.2-3 Schéma des dispositifs de réduction de risque envisagés vis-à-vis du transfert de colis en puits

● **Risque de criticité associé à la chute de la cage chargée de la hotte de transfert d'un colis de combustibles usés dans le puits**

Un scénario de chute de la cage chargée de la hotte avec un colis de combustibles usés, qui associerait un endommagement grave de ce colis (modification de sa géométrie interne, ruptures et rapprochements des faisceaux de combustibles...) et une arrivée d'eau, pourrait conduire à un risque de criticité.

Compte tenu des mesures envisagées vis-à-vis du risque de chute en puits, un tel niveau d'endommagement du colis n'apparaît pas vraisemblable. Cependant, une précaution supplémentaire serait de s'assurer de l'absence d'eau (ou d'un autre fluide hydrogéné) dans le puits pour s'affranchir totalement de ce risque. Cela consisterait à interdire de placer des canalisations dans le puits de descente des colis tout en disposant en plus d'un système d'évacuation de l'eau en fond de puits.

Les autres situations dangereuses envisagées [45] n'apparaissent pas pouvoir induire un risque de criticité.

● Synthèse

Un bilan de l'analyse (voir Tableau 4.2-2) est présenté par type d'activité (construction, exploitation, fermeture). La conduite de travaux associés à un retrait éventuel des colis de stockage a également été envisagée.

Ce tableau permet de tirer les enseignements suivants :

- l'analyse ne montre pas de différences notables quant à la nature des risques entre l'activité de mise en stockage et celle de retrait des colis. Les opérations liées à un éventuel retrait des colis seraient des opérations inverses à celles réalisées en phase de mise en stockage;
- l'activité de fermeture ne présente pas de risques liés à la manutention et au transfert des colis. En revanche, une attention particulière sera nécessaire vis-à-vis d'éventuels défauts de protection radiologique au cours des opérations conduites sur les têtes d'alvéoles de stockage ;
- l'analyse recense des risques classiques tels que les défauts de protection radiologique pour lesquels les mesures de prévention et de contrôle sont connues et ne nécessitent pas d'études particulières à ce stade des études ;
- on peut considérer également que les risques de chute de colis et d'incendie dans les installations de surface ne justifient pas d'études complémentaires à ce stade de l'étude compte tenu du retour d'expérience des installations nucléaires de surface similaires existantes ;
- les risques radiologiques associés au transfert et à la mise en place des colis en alvéole de stockage demandent en revanche des compléments d'étude. Les risques induits par des incendies d'engin nécessitent de prendre en compte leurs caractéristiques et le fait que l'incendie se développerait dans un milieu semi confiné. De même, les scénarios de chute de colis font référence à des hauteurs de chute qui diffèrent des hauteurs usuelles de manutention dans les installations de surface, en particulier au cours du transfert de la hotte en puits. Ces différents risques seront abordés respectivement dans les paragraphes 4.5 et 4.6 pour les risques d'incendie, et les paragraphes 4.7 et 4.8 pour les risques de chute.

Risques \ Activités	Exploitation			Fermeture	Retrait éventuel des colis
	Installations de surface	Transfert jour / fond	Installations souterraines		
Défaut de protection radiologique lié à un équipement	x		x	x	x
Défaut de protection radiologique au cours d'une intervention	x		x	x	x
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à un incendie dans une cellule des installations de surface	x				
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à une chute de colis primaire dans les installations de surface	x (B et CU nus)				
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à un incendie d'un engin de transport ou de manutention	x		x		x
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis liés à une chute de colis B au moment de sa mise en stockage ou de son retrait			x		x
Défaut de protection radiologique / perte de confinement de colis / criticité ³¹ liés à une dérive incontrôlée ou à une chute de cage en puits lors d'un transport de hotte		x			

X	Risque à prendre en compte		Risque négligeable		Sans objet		Risque faisant l'objet d'une étude complémentaire
---	----------------------------	--	--------------------	--	------------	--	---

Tableau 4.2-2

Bilan relatif aux risques radiologiques liés au stockage

4.2.3 Risques liés à l'environnement externe du stockage

4.2.3.1 Séisme

La région de Bure est une zone faiblement sismique. Les installations de surface d'un éventuel stockage devraient être dimensionnées selon les règles parasismiques en vigueur. De plus, des mesures devraient être prises pour prévenir toute perte d'une fonction de sûreté qui serait susceptible d'avoir un impact radiologique pour le personnel d'exploitation et les populations.

Les mesures consistent à dimensionner au Séisme Majoré de Sécurité [51] les bâtiments (stabilité d'ensemble des bâtiments) afin de protéger les sources à l'intérieur de ces bâtiments, et les équipements qui, directement ou indirectement, pourraient être à l'origine de dissémination radioactive.

³¹ Le risque de criticité ne concerne que les combustibles usés.

Les ouvrages souterrains résistent mieux aux sollicitations sismiques que les installations de surface du fait de leur atténuation avec la profondeur. Il a été montré que le séisme [52] n'aurait pas d'effet significatif en profondeur.

4.2.3.2 Risques météorologiques

Les principaux risques météorologiques ne concernent que les installations de surface et n'ont pas d'impact sur les activités souterraines. Il s'agit principalement des précipitations (pluie, neige), des températures extrêmes, de la foudre et du vent.

4.2.3.3 Chute d'avion

Indépendamment des conséquences physiques directes, une chute d'avion sur les installations de surface pourrait entraîner la perte des fonctions de sûreté et induire une exposition radiologique du personnel et un rejet dans l'environnement.

Ce risque pourrait être abordé selon les principes définis par la RFS I.1.a [53]. Celle-ci recommande une évaluation de la probabilité de chute sur les « cibles » des installations dont la perte des fonctions pourrait avoir des conséquences importantes pour la sûreté. Cette évaluation est faite selon l'emplacement du site pour différents types d'activité aérienne : aviation générale, aviation commerciale, aviation militaire. L'objectif est que la probabilité d'une chute d'avion conduise à des rejets inacceptables soit inférieure à 10^{-7} /an. Au-dessus de cette valeur, le risque de chute doit être intégré dans le dimensionnement des installations incriminées.

Dans un tel cas, les mesures mises en œuvre pour protéger les installations, notamment celles contenant les sources radioactives, consisteraient à dimensionner les ouvrages en béton pour qu'ils résistent à une chute d'avion et à baliser les obstacles les plus élevés (superstructures des puits).

4.2.3.4 Risques liés à la perte en énergie et utilités

Même si cet événement est peu probable (il pourrait résulter par exemple de conditions météorologiques extrêmes) et s'il ne met pas en danger immédiat le personnel présent, il pourrait entraîner des difficultés du fait du nombre important de systèmes qui seraient arrêtés : ventilation, éclairage, pompage, cage de transfert. Les mesures de prévention consistent en la redondance des sources d'énergie et des alimentations de secours (générateurs, batteries,...) pour les systèmes essentiels.

4.2.4 Conclusion

L'analyse de sûreté opérationnelle conduite repose sur une analyse systématique de risques qui a bénéficié de l'appui d'experts dans les différents domaines techniques concernés.

L'activité de construction des différentes installations du stockage ne diffère pas de la construction d'autres installations industrielles de surface et ouvrages souterrains (mines, tunnels...). De ce fait, les risques de cette activité sont des risques conventionnels (écrasement, chute...) recensés dans tous les travaux de construction de ce type d'installations. Ils ne justifient pas d'études complémentaires à ce stade, mais seront à prendre en considération au niveau de la conception détaillée des ouvrages et des équipements.

L'activité nucléaire dans les installations de surface du stockage, qui comprend la réception, la préparation et l'entreposage de colis de déchets, est très comparable aux activités pratiquées dans les installations nucléaires françaises d'où proviennent ces colis. De ce fait, l'analyse n'a pas nécessité d'études spécifiques propres aux installations du stockage.

L'activité nucléaire dans les installations souterraines du stockage, qui comprend le transfert des hottes (contenant les colis de stockage) dans le puits et en galerie, l'introduction et la mise en place des colis de stockage dans leurs alvéoles, est menée conjointement avec des travaux de réalisation de galeries et d'alvéoles. Ceci n'est pas couramment rencontré, même si des stockages souterrains existent de par le

monde³² [54] et il est proposé dans la conception de garantir leur indépendance par une séparation des circuits des engins et des systèmes de ventilation.

L'activité de fermeture du stockage n'apporte pas d'éléments supplémentaires par rapport aux autres activités. La fermeture des installations de surface n'a rien de particulier par rapport à un chantier de démantèlement classique. Les travaux de fermeture des installations souterraines, qui se traduisent par des travaux de remblayage et la réalisation d'ouvrages de scellements placés en galerie ou en puits, seraient comparables, au niveau de l'organisation des chantiers et des types d'engins utilisés, aux activités de construction.

L'analyse a mis en exergue les risques qui nécessitent une attention particulière compte tenu de leurs spécificités ou de leur influence sur la conception du stockage et de ses équipements.

Ces risques sont le risque d'explosion lié à l'émission de gaz par certains colis de déchets (voir paragraphe 4.3), le risque d'incendie dans les installations souterraines (voir paragraphe 4.4) avec une focalisation sur les scénarios qui impliqueraient des colis de stockage (voir paragraphes 4.5 et 4.6) et les risques propres au transfert de colis de matières radioactives avec le scénario de chute en puits (voir paragraphe 4.7) et de chute en alvéole de stockage de déchets B (voir paragraphe 4.8).

Cette analyse correspond à la perception actuelle des principaux risques identifiés à ce stade de connaissance des installations. Elle peut être amenée à évoluer avec l'approfondissement des études de définition des installations.

³² Parmi ces stockages, on peut citer celui du WIPP (New Mexico, USA), où des colis de déchets transuraniens (comparables à certains colis B) sont stockés dans des installations souterraines auxquelles on accède par des puits de 650 m de profondeur [54] ainsi que le SFR (Suède) où sont stockés, entre 60 et 100 m de profondeur, des colis de faible et moyenne activité.

4.3 Étude du risque lié à l'émission de gaz explosifs par des colis de déchets B

Une majorité des colis de déchets B (principalement B2 et B5) émet des gaz, depuis leur arrivée dans les installations de surface jusqu'à leur stockage en alvéole souterraine. Ces gaz ont pour origine un phénomène de radiolyse qui est lié à l'effet des rayonnements ionisants (β , γ) émis par les matières radioactives sur les produits hydrogénés présents dans les colis de stockage (matières organiques, eau de la matrice de conditionnement).

Ces gaz de radiolyse sont majoritairement l'hydrogène (plus de 90 % du dégagement gazeux) et, à un moindre degré, le méthane³³. L'émission de ces gaz peut être à l'origine d'une explosion, si leurs concentrations dépassent leur limite inférieure d'explosivité³⁴.

L'objet de cette section est de vérifier que l'émission de ces gaz par des colis de déchets B n'est pas susceptible d'entraîner un risque d'explosion [46].

4.3.1 Caractéristiques des colis de déchets

Les colis de déchets concernés par le relâchement de gaz explosifs sont principalement les colis de type B2 et de type B5.1, qui contiennent des matières organiques.

Colis primaire	Nature et contenu du colis primaire	Taux d'émission de gaz explosifs (H ₂ , CH ₄) (l/fût/an)
B2.1 B2.2	Fût métallique avec boues bitumées	- 10 litres/fût/an (valeur moyenne) - 57 litres/fût/an (valeur maximale correspondant à une minorité de fûts)
B5.1	Conteneur avec coques et embouts, et déchets technologiques (y compris organiques)	- 10 litres/fût/an (valeur moyenne) - 500 litres/fût/an (valeur maximale correspondant à une minorité de fûts)

Tableau 4.3-1 Taux d'émission de gaz explosifs libérés par certains colis de déchets B

Les valeurs moyennes d'émission de gaz par les colis ont été retenues pour les simulations dans les installations de surface et en alvéole de stockage, car elles correspondent à plusieurs centaines ou plusieurs milliers de colis ; en revanche, les valeurs maximales ont été utilisées lorsque les simulations sont relatives à la phase de transfert en galerie de la hotte chargée du colis de stockage.

La concentration des gaz dans un local donné a été estimée en fonction des caractéristiques de sa ventilation. Le taux de renouvellement d'air par heure est pris égal à 2 dans les locaux des installations nucléaires de surface. Pour la ventilation des alvéoles de stockage des colis B, les données retenues sont un débit d'air de 3 m³/s, ce qui correspond, pour une alvéole de 250 mètres de longueur, pleine de colis, à un taux de renouvellement d'air par heure égal à 5.

Enfin, il a été fait l'hypothèse que l'hydrogène émis par les colis de stockage se diluait de manière homogène dans le volume libre situé au dessus des colis de stockage³⁵ et que la ventilation restait en service jusqu'au moment du scellement de l'alvéole.

³³ Le phénomène de radiolyse est aussi à l'origine de la libération en très faible quantité de gaz carbonique et de monoxyde de carbone. Ces gaz sont dilués par la ventilation des installations comme ceux produits par les engins à moteur thermique.

³⁴ La Limite Inférieure d'Explosivité (LIE) est la concentration minimale en gaz à partir de laquelle il y a risque d'explosion en présence d'une source d'ignition. La LIE est de 4 % pour l'hydrogène et de 5,3 % pour le méthane.

³⁵ L'hydrogène, plus léger que l'air, aura tendance à migrer au dessus des colis vers le haut du local.

Les estimations sont faites avec l'hypothèse pénalisante de taux de dégazage constants sur la durée de l'activité d'exploitation et de fermeture du stockage.

4.3.2 Analyse en phase d'exploitation

Cette analyse est présentée en fonction de la logique du cycle suivi par les colis : entreposage des colis primaires, entreposage des colis de stockage, transfert des colis de stockage en hotte, mise en place des colis de stockage dans les alvéoles de stockage.

4.3.2.1 Entreposages de surface (colis primaires et de stockage)

Une simulation, faite sur la base des hypothèses présentées précédemment montre que le taux d'hydrogène dans l'atmosphère des locaux est négligeable en conditions normales de ventilation (avec des taux variant de 10^{-6} à 10^{-7} dans les différents locaux de surface), et que le délai pour atteindre la limite d'explosivité de 4.10^{-2} (4 %) suite à un arrêt de ventilation est de plusieurs dizaines d'années. Le risque d'explosion n'existe donc pas dans ces locaux.

4.3.2.2 Transfert des colis de stockage en hotte

L'émission d'hydrogène se produit également dans la hotte pendant le transfert des colis entre les installations de surface et l'alvéole de stockage. L'existence des jeux de construction des portes de la hotte et éventuellement la présence d'un évent permettront de diluer l'hydrogène émis par les colis dans l'atmosphère du lieu de passage de la hotte et il n'y aura pas de risque d'explosion compte tenu du faible débit d'hydrogène émis en regard des flux de ventilation circulant dans les différentes installations.

4.3.2.3 Alvéoles de stockage

La simulation a été faite en supposant un arrêt de ventilation dans une alvéole de stockage de 250 mètres de longueur remplie de colis B5.1. Il a été considéré que l'hydrogène se concentrerait préférentiellement dans les 15 cm supérieurs de l'alvéole de stockage, au dessus des colis de stockage.

Dans ces conditions, la durée d'atteinte de la limite d'explosivité de 4 % est de l'ordre d'une trentaine de jours. Il n'y a donc pas de risque d'explosion même avec un arrêt temporaire de la ventilation.

4.3.3 Analyse en phase de fermeture du stockage

Vis-à-vis du risque d'explosion, cette phase peut être subdivisée de la manière suivante.

4.3.3.1 Phase de scellement des alvéoles de stockage

La réalisation d'un scellement commencerait par la mise en place d'un écran de radioprotection constitué de blocs de béton équipés de conduits permettant le maintien de la ventilation en alvéole (voir paragraphe 5.1.6 du tome « architecture et gestion du stockage géologique » [22]). Cette étape se poursuit par la réalisation d'un massif d'appui en béton qui remplit la tête d'alvéole et isole ainsi les colis de stockage par rapport à la galerie d'accès. Dans ces conditions, le relâchement d'hydrogène vers la galerie d'accès serait très faible et ne pourrait être source d'explosion, d'autant plus que cette galerie sera ventilée pendant toute la durée de la mise en place du noyau d'argile gonflante du scellement.

4.3.3.2 Période après scellement des alvéoles de stockage

Les travaux de remblayage eux-mêmes pourraient se dérouler en deux étapes – le remblayage des infrastructures de la zone de stockage de déchets B, puis, plus tardivement le remblayage du reste des infrastructures avant la fermeture complète du stockage.

Ces travaux de remblayage sont isolés des alvéoles de stockage par les scellements et ne peuvent pas induire de risques d'explosion.

Cependant, si un retour dans une alvéole après mise en place du scellement était envisagé, une telle opération ne pourrait se faire qu'après un renouvellement préalable de l'atmosphère de l'alvéole de stockage de manière à évacuer l'hydrogène présent (voir chapitre 10 du tome « architecture et gestion du stockage géologique » [22]). Ceci nécessiterait de prendre des dispositions spéciales pour ne pas avoir de risques d'ignition au moment de la remise en place du système de ventilation, du type de celles pratiquées en mines de charbon grisouteuses.

4.3.4 Conclusion

Les risques liés à l'émission de gaz explosifs (H_2 pour l'essentiel) par certains colis de déchets B sont maîtrisés en phase d'exploitation par la ventilation des différentes installations du stockage, qui assure leur dilution. Une interruption de cette ventilation ne présente pas de réels dangers car le délai disponible pour intervenir est important.

Les étapes de fermeture du stockage ne présentent pas de risques d'explosion, sauf en cas de retour dans une alvéole après mise en place du scellement. Dans ce cas, il sera nécessaire de rétablir une ventilation pour extraire les gaz accumulés dans l'alvéole de stockage en prenant les dispositions de sécurité nécessaires au moment de son installation.

4.4 Étude du risque d'incendie dans les installations souterraines du stockage

L'incendie reste l'un des événements les plus redoutés en milieu souterrain parce qu'il se développe dans un milieu semi confiné et que les fumées et les gaz toxiques associés pourraient s'étendre à travers les galeries dans les installations, gêner l'évacuation des personnes et mettre en danger un nombre important de personnes.

Le retour d'expérience des incendies en ouvrages souterrains montre que, le potentiel calorifique des galeries proprement dites étant très faible, seuls les engins et équipements peuvent être à l'origine d'un incendie important. Les trois causes principales des incendies d'engins sont, d'après une étude sur les mines suédoises [55], les courts-circuits électriques (de l'ordre de 50 %), une fuite d'huile sur une surface chaude (de l'ordre de 25 %) et une surchauffe de moteur (pour 10 % des cas environ). En revanche, le risque de collision induisant un feu est réduit compte tenu des faibles vitesses de déplacement et de la faible fréquence de croisements entre engins.

Les mesures essentielles de prévention de l'incendie dans les installations souterraines sont :

- l'utilisation préférentielle de matériaux ininflammables, non propagateurs d'incendie et non émetteurs de fumées toxiques ;
- un contrôle des produits inflammables présents (justification du choix et de l'utilisation du produit, quantité maximale autorisée, conditions de transport et procédures d'utilisation...) ;
- la limitation de la quantité du carburant pour les engins à moteur thermique, la protection des parties sensibles des engins, ainsi que le choix éventuel d'engins électriques à plus faible charge calorifique, si le type d'activité le permet ;
- la mise en place de procédures de contrôle, de maintenance et d'utilisation des engins et équipements (permis de conduite des engins, permis de feu...), ainsi qu'une formation du personnel pour réagir efficacement en cas d'anomalie.

Des équipements de détection d'incendie (avec des détecteurs de fumées, de flammes ou de température) sont également utiles pour permettre une intervention rapide et une maîtrise de l'incendie avant atteinte de toute sa puissance. Ces systèmes sont installés préférentiellement au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Les mesures de protection contre l'incendie sont d'abord les moyens de première intervention mis à la disposition du personnel, avec des extincteurs et un réseau d'eau sous pression installés jusqu'à proximité du chantier. Des systèmes d'extinction automatique fixes, installés dans des zones à risque (stockage de carburants ou d'huiles), et des systèmes embarqués sur engin pourraient être aussi des moyens efficaces à utiliser.

Indépendamment de ces actions sur l'incendie, les installations souterraines devraient être équipées d'un système d'extraction des fumées permettant l'évacuation du personnel dans des conditions de température, de visibilité et de toxicité acceptables. L'installation de systèmes d'alerte³⁶, d'alarme et d'un poste de contrôle (PC) centralisé apte à suivre la situation et diriger les opérations, contribuerait aussi à organiser cette évacuation dans les meilleures conditions de sécurité possibles.

Cette section fait l'hypothèse du développement d'un incendie malgré les mesures de prévention présentées précédemment. Elle a pour but d'étudier différents scénarios d'incendie représentatifs, d'évaluer leurs conséquences (élévation de température, émission de fumées, émission de gaz toxiques) et de s'assurer que les conditions d'évacuation du personnel sont satisfaisantes. Elle ne traite pas des incendies susceptibles d'avoir des conséquences radiologiques, qui nécessitent des développements particuliers et sont abordés dans les paragraphes 4.5 et 4.6.

³⁶ Une mesure intéressante serait la mise à disposition du personnel d'un moyen de phonie individuel relié à un réseau interne et au PC, qui serait utilisé en temps normal pour l'organisation du travail et qui, en cas d'incendie, serait le meilleur moyen d'alerte en temps réel.

4.4.1 Simulations d'incendie

Des études de simulation [46] ont été menées afin d'appréhender les conséquences potentielles de différents scénarios d'incendie envisagés en fonction de leurs caractéristiques.

4.4.1.1 Caractérisation des scénarios d'incendie

Les engins utilisés pour la réalisation des ouvrages (engins de creusement, de boulonnage, de transport...) ou les activités d'exploitation (engins de transport des hottes...) ainsi que quelques équipements particuliers (convoyeurs à bande pour le transport des déblais...) peuvent être à l'origine d'un incendie à potentiel calorifique élevé³⁷. Ce type d'incendie se caractérise par sa puissance thermique, la quantité de toxiques et le débit de fumées produits.

La détermination de la puissance thermique s'appuie sur la définition d'un scénario réaliste. Dans le cas d'un engin, l'événement initiateur du scénario retenu est le plus souvent une fuite de liquide combustible associée à un point chaud (étincelle...). Le taux de fuite du liquide pris en compte détermine la puissance initiale du feu. La durée de l'incendie dépend du potentiel calorifique de l'engin : les quantités de combustibles ou d'huiles apportent une grande part de ce potentiel qui est immédiatement mobilisable en cas de feu ; les pneumatiques contribuent à en augmenter la durée et la quantité de fumées produites. Il est aussi fait l'hypothèse que le comburant (oxygène de l'air) est en quantité suffisante et qu'il n'y a pas extinction par étouffement du foyer.

La synthèse des résultats relatifs à l'ensemble des engins étudiés montre que deux grandes catégories de feux d'engins se distinguent. Les engins diesel ou diesel-électrique (tombereau, engin de chargement, engin de creusement, engin de boulonnage/foration...) correspondent à des feux de puissance thermique maximale proche de 25 MW tandis que les engins de transport électriques ont une puissance thermique maximale proche de 15 MW.

Pour s'affranchir des difficultés liées à la modélisation des courbes présentant des phénomènes transitoires, les simulations d'incendie ont utilisé des courbes standardisées définies par le CETu (Centre d'Études des Tunnels), qui sont enveloppes des précédentes en terme de puissance et de durée. Ces courbes, issues de l'expérience des feux en tunnels, correspondent à des incendies de véhicules routiers avec des puissances totales respectives³⁸ de 30 MW et 15 MW. Il est aussi associé à chaque type d'incendie des courbes d'émission de monoxyde de carbone et de production de fumées.

La Figure 4.4-1, qui représente l'évolution de la puissance thermique d'un feu 30 MW en fonction du temps, est un exemple de ces courbes standardisées qui ont toutes le même profil avec une rampe de montée, un palier et une rampe de descente.

³⁷ Un autre type d'incendie à risque élevé serait celui d'un stockage de produits inflammables, mais ce cas n'est pas pris en compte à ce stade de l'étude, d'une part parce que sa localisation et son dimensionnement ne sont pas connues, et d'autre part, parce que ce type d'installation peut faire l'objet plus facilement de mesures d'extinction spécifiques installées de manière fixe.

³⁸ De manière générale pour ce type d'incendie, la puissance totale se dissipe par convection pour deux tiers, le dernier tiers étant dissipé par rayonnement.

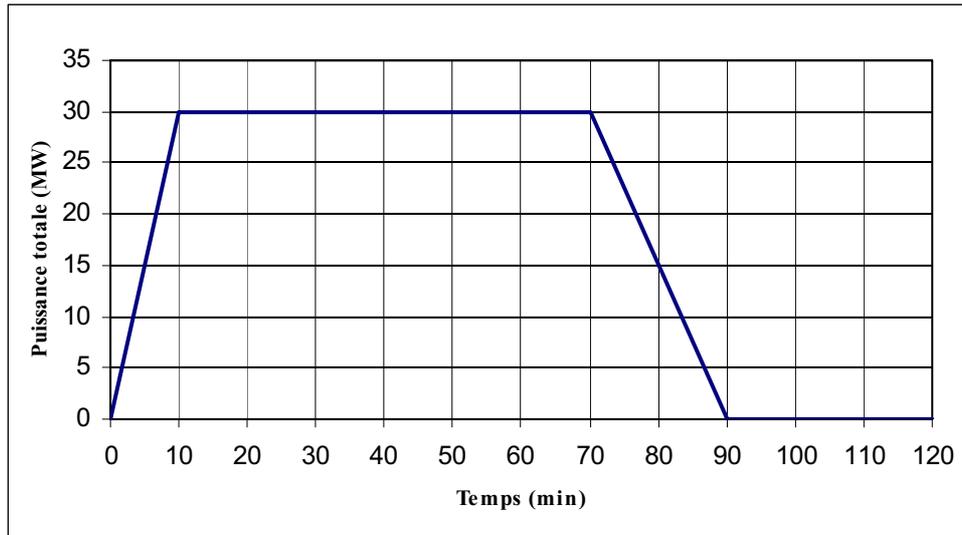


Figure 4.4-1

Puissance thermique totale standardisée pour un feu de 30 MW

4.4.1.2 Mode de développement des incendies

En milieu souterrain, les incendies se développent en émettant des fumées qui vont envahir tout le volume de la galerie (incendie avec « déstratification des fumées ») ou qui vont se localiser préférentiellement en partie supérieure de la galerie (incendie avec « stratification des fumées ») en fonction des conditions de ventilation rencontrées.

● Incendies avec déstratification des fumées

Les incendies avec déstratification des fumées se traduisent par un envahissement progressif des galeries par des fumées qui opacifient l'atmosphère et peuvent rendre l'évacuation des personnes plus difficile. Ce type d'incendie, qui se produit lorsque les vitesses d'air en galerie sont supérieures à une vitesse de l'ordre de 1 m/s, se caractérise par une homogénéité du mélange air / fumées dans la section transversale de la galerie à une distance donnée par rapport au feu.

Dans le cas du stockage, les incendies dans les galeries d'accès aux alvéoles C et CU, ventilées par une arrivée d'air frais en pleine section et avec une évacuation des fumées par une trappe de désenfumage en limite d'unité d'exploitation, seraient de ce type.

Pour ce type d'incendie (voir Figure 4.4-2), l'évacuation se fait préférentiellement en remontant vers la galerie de liaison alimentée en air frais. Dans le cas contraire, les personnes en aval de l'incendie peuvent rejoindre la première recoupe pour accéder à la galerie d'accès contiguë alimentée en air frais (avec une distance de 200 mètres au maximum à parcourir du fait de la disposition des recoupes), puis la galerie de liaison.

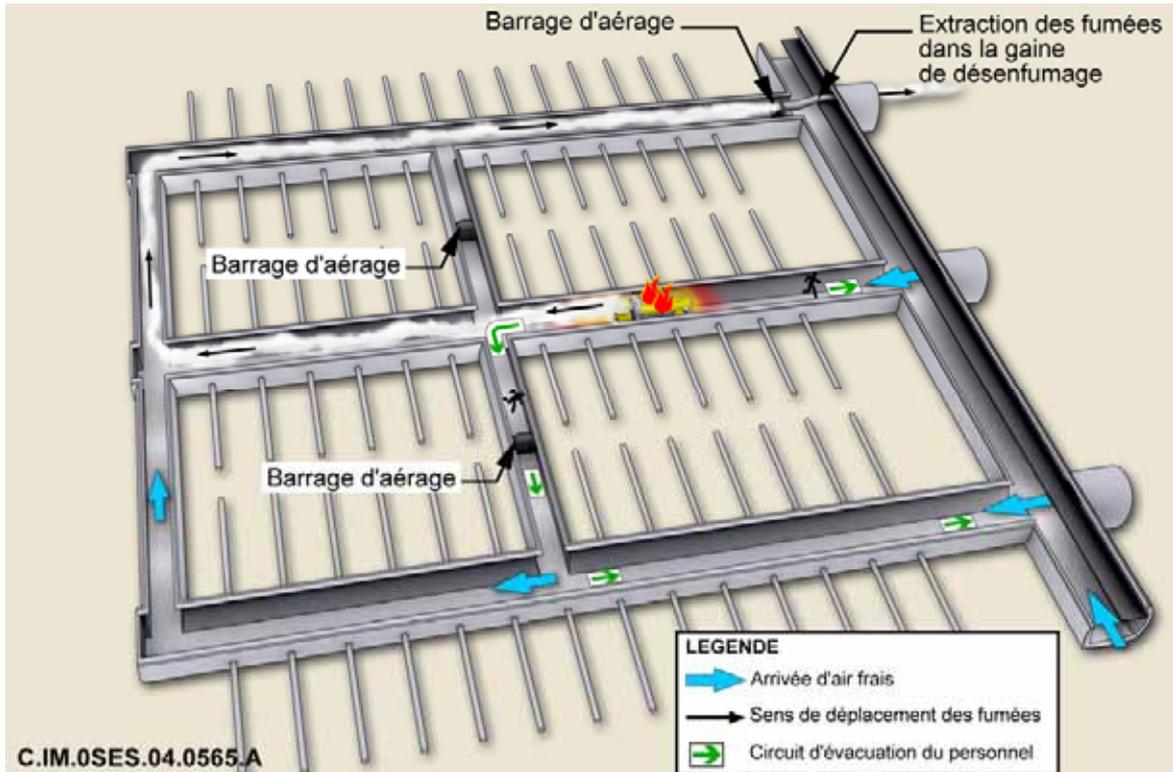


Figure 4.4-2

Circulation des fumées et évacuation dans le cas d'un incendie dans une unité C (ou CU) en exploitation

● Incendies avec stratification des fumées

Les incendies avec stratification des fumées conduisent à une localisation préférentielle des fumées en partie haute des galeries (voir Figure 4.4-3). Ce sont alors les conditions de température associées au rayonnement de ces fumées qui constituent le principal risque pour les personnes. Ce type d'incendie se produit lorsqu'on est en présence de vitesses d'air en galerie faibles (inférieures à 1 m/s environ), avec des fumées qui se propagent de part et d'autre du foyer.

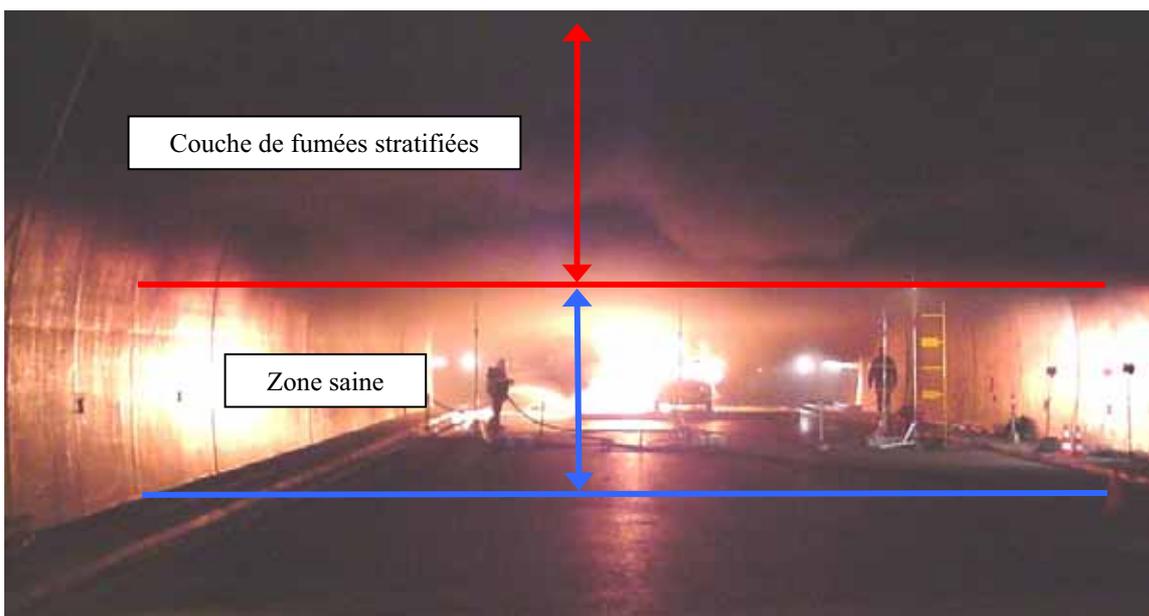


Figure 4.4-3

Cas d'incendie avec fumées stratifiées

Dans un stockage, les incendies dans les galeries de liaison, avec extraction des fumées par des trappes disposées à intervalles réguliers, seraient de ce type.

Selon leur position vis-à-vis de l'incendie, les personnes peuvent évacuer en amont ou en aval du feu par la première recoupe rencontrée pour rejoindre la galerie de liaison contiguë alimentée en air frais. La distance maximale pour atteindre ces recoupes varie de 100 m dans les galeries de liaison secondaires, à l'intérieur des zones de stockage (voir Figure 4.4-4) à 400 m dans les galeries de liaison principales.

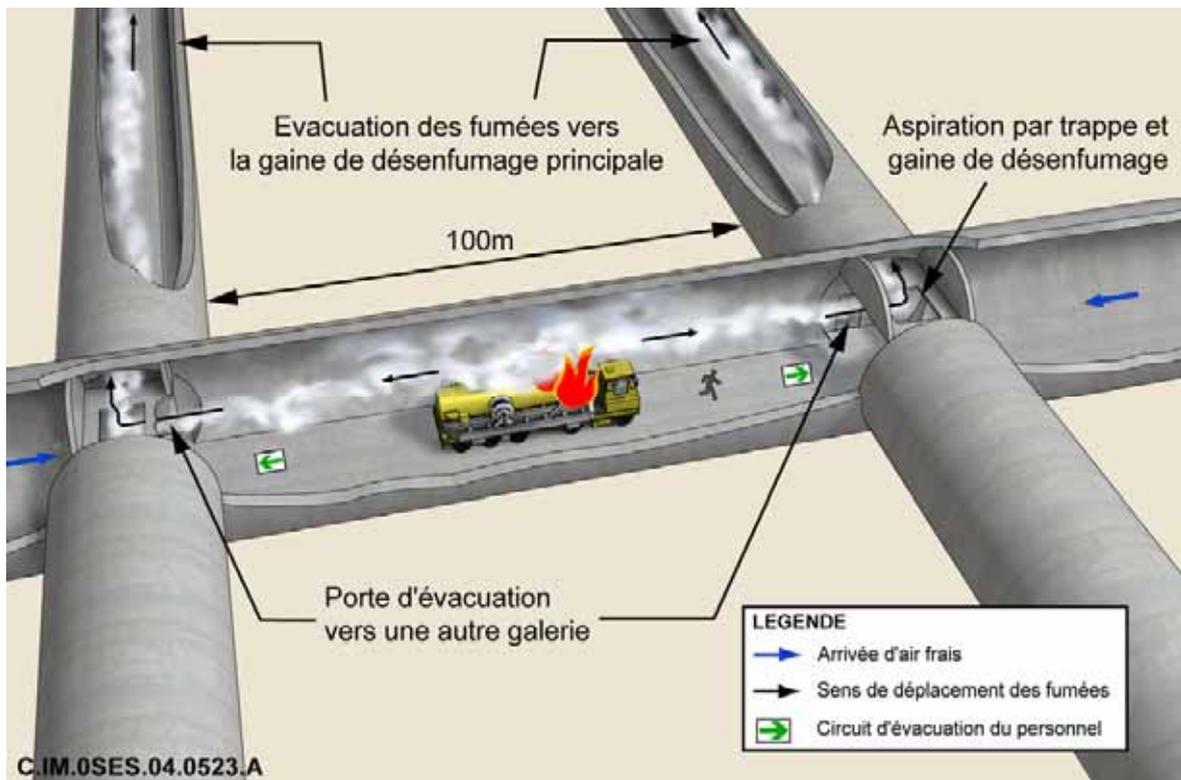


Figure 4.4-4 Cas d'un incendie en galerie de liaison : évacuation de part et d'autre de l'incendie

● Cas particulier d'un incendie dans une galerie en cul-de-sac

L'incendie dans une galerie en cul-de-sac est un cas particulier intermédiaire entre les deux cas précédents. D'une part, il se rapproche de l'incendie avec déstratification des fumées car l'extraction des fumées se fait uniquement à partir de la gaine d'extraction d'air du chantier, mais d'autre part, la faible distance entre le lieu de l'incendie et ce point d'évacuation des fumées limite l'envahissement de la galerie par les fumées.

Deux situations sont possibles (voir Figure 4.4-5) : si les personnes peuvent évacuer en amont aérée de l'incendie, elles rejoignent, par la recoupe la plus proche, la galerie contiguë qui est alimentée en air frais ; dans le cas contraire, elles rejoignent le refuge mobile³⁹ dans l'attente des secours.

³⁹ Ce refuge mobile, équipé de parois coupe-feu, dispose de réserves d'air comprimé et d'eau.

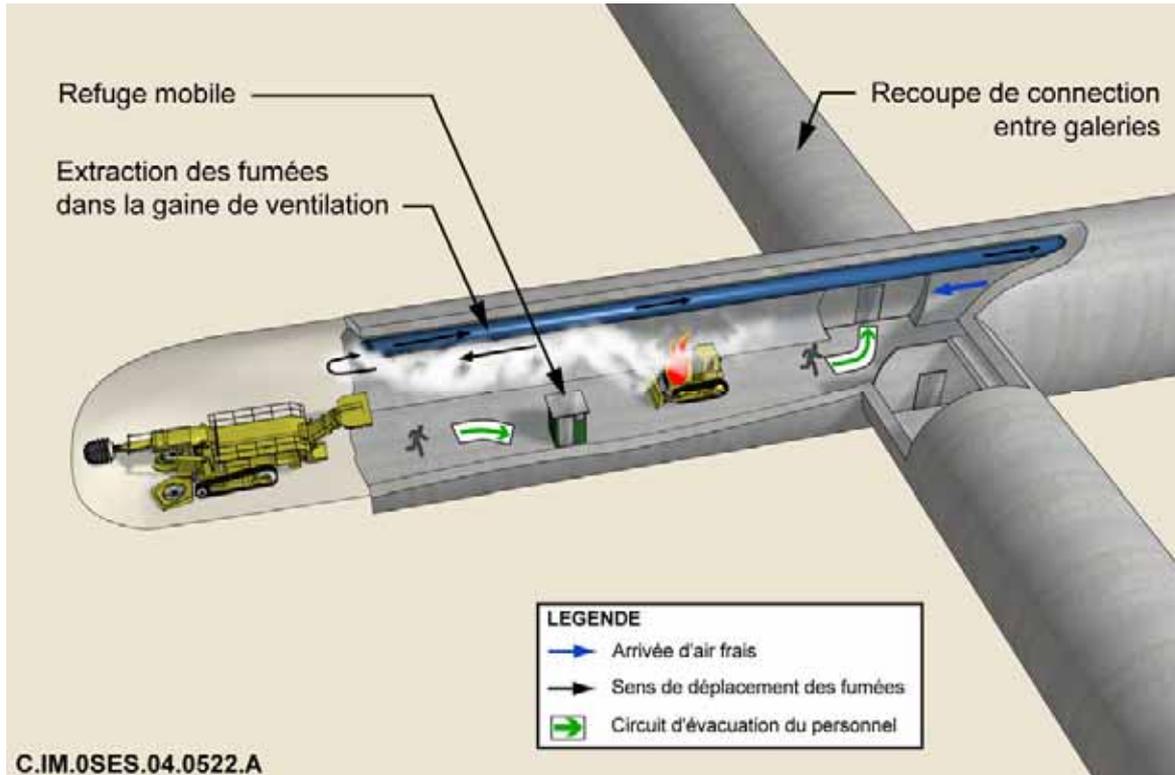


Figure 4.4-5

Incendie dans une galerie en cul-de-sac : évacuation du personnel par une recoupe vers la galerie contiguë ou mise en sécurité dans un refuge mobile

Dans tous les scénarios d'incendie présentés, le personnel peut ensuite rejoindre, par des galeries de liaison alimentées en air frais, le puits de transport du personnel afin de remonter en surface.

4.4.2 Simulation des conditions d'évacuation du personnel

Les résultats de ces études préliminaires de simulation sont présentés comme précédemment par type d'incendie, car les conditions d'évacuation du personnel sont directement liées au fait qu'il y ait ou non stratification des fumées.

4.4.2.1 Incendie avec déstratification des fumées

L'exemple présenté est l'incendie d'un engin de puissance thermique de 15 MW dans une galerie d'accès aux alvéoles C. Cette puissance correspond à la puissance maximale des engins utilisés en exploitation nucléaire.

Le cas retenu est celui d'un incendie situé juste après une intersection, ce qui correspond à une distance d'évacuation maximale pour rejoindre la première recoupe, soit près de 200 m.

Les données obtenues⁴⁰ (température, concentration en monoxyde de carbone et opacité du mélange air / fumées) sont à comparer aux seuils admissibles qui caractérisent les conditions de survie et d'évacuation pour ce type d'incendie. La température ne doit pas dépasser 80 °C, pendant une durée supérieure à 15 minutes. La teneur en monoxyde de carbone ne doit pas excéder les valeurs d'une fourchette estimée entre 500 ppm pendant 60 minutes et 3000 ppm pendant 10 minutes. Enfin, une opacité supérieure à 0,3 m⁻¹ correspondant à une visibilité en marche de 7 m commence à gêner l'évacuation des personnes ; elle devient difficile pour une opacité supérieure à 1 m⁻¹ (visibilité inférieure à 1,5 m).

⁴⁰ L'évolution de la température a été calculée en appliquant les lois de la convection thermique en écoulement turbulent de flux d'air. Les évolutions de l'opacité et de la concentration en monoxyde de carbone ont été simulées numériquement, comme la température, au moyen du logiciel Camatt (Calcul Monodimensionnel Anisotherme Transitoire en Tunnel).

Les résultats des simulations sont présentés en mettant en exergue les conditions d'évacuation du personnel sous deux hypothèses : une vitesse d'évacuation de 1 m/s correspond à un cas normal ; une vitesse de 0,5 m/s serait celle d'un groupe devant évacuer un blessé.

● Température

Le diagramme [distance en aval du feu (m) / temps après départ du feu (s) / température (°C)] met en évidence l'influence du système de désenfumage⁴¹ dont la mise en route infléchit la montée de la température de l'air dans les galeries en aval aérée de l'incendie.

La simulation (voir Figure 4.4-6) montre que l'évacuation des personnes situées en aval de l'incendie devrait se faire dans des conditions acceptables même pour les personnes proches du départ de feu. Les personnes évacuant à vitesse normale atteignent la recoupe dans une atmosphère à une température d'air inférieure à 30 °C, et entre 40 °C à 50 °C si elles sont ralenties par la présence d'un blessé. Ces conditions restent acceptables par rapport au seuil de 80 °C mentionné précédemment.

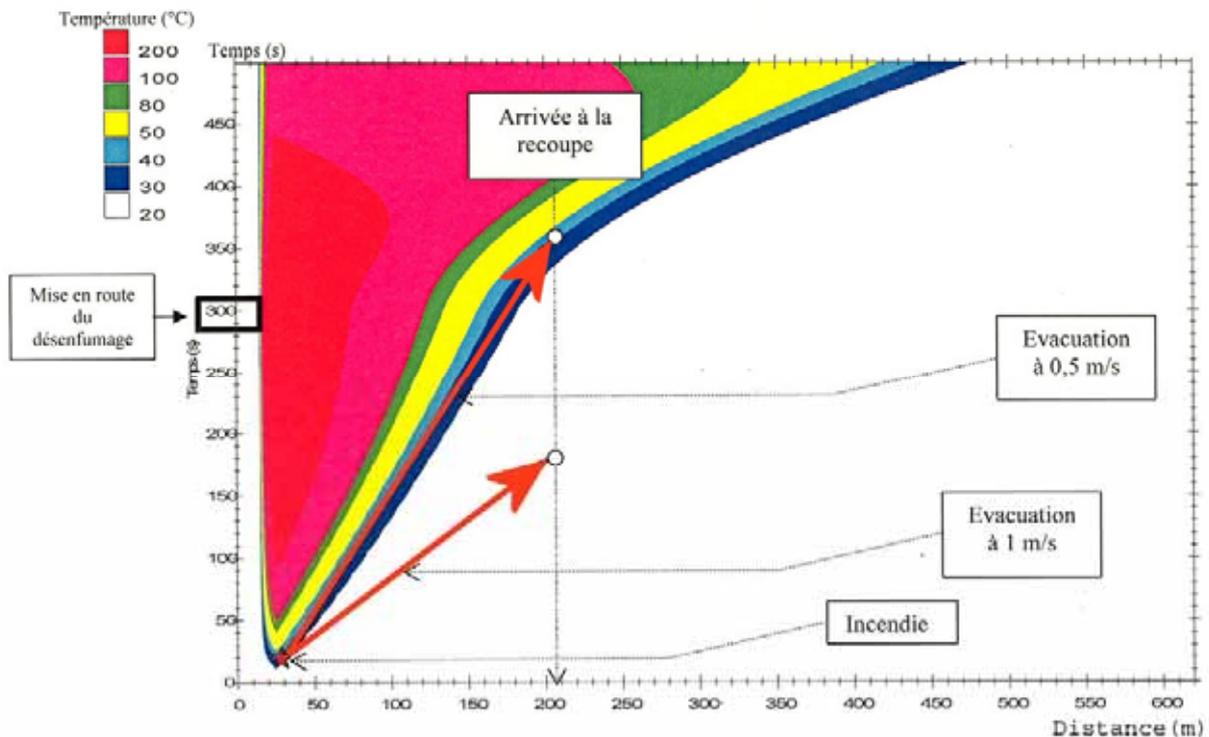


Figure 4.4-6

Évolution spatio-temporelle de la température de l'air (°C) dans le cas d'un incendie dans une galerie d'accès aux alvéoles C en exploitation nucléaire – Représentation du déplacement des personnes situées en aval de l'aéragé de l'incendie

● Concentration en monoxyde de carbone

Selon la même approche que précédemment, la simulation montre que les personnes situées en aval aérée de l'incendie évacuant à vitesse normale peuvent atteindre la recoupe dans des conditions saines. Avec une vitesse d'évacuation réduite à 0,5 m/s, les personnes arrivent à la recoupe dans une atmosphère dont la teneur en CO (de l'ordre de 200 ppm) reste inférieure au seuil de 500 ppm.

⁴¹ Il a été considéré, que le début de la mise en œuvre des installations de désenfumage se ferait 5 minutes (300 s) après le début de l'incendie et qu'un régime stable serait établi au bout de 8 minutes. Ces données sont issues de l'expérience en ouvrages souterrains.

● Opacité

La simulation montre que les personnes évacuant à 1 m/s peuvent atteindre la recoupe sans gêne avec une opacité qui reste inférieure à $0,10 \text{ m}^{-1}$, ce qui correspond à une visibilité de l'ordre de 10 mètres.

En revanche, avec une vitesse d'évacuation lente (0,5 m/s), les personnes seraient rapidement rejointes par les fumées, avec une opacité moyenne de l'ordre de $0,6 \text{ m}^{-1}$, soit une distance de visibilité limitée à 2 mètres. Dans ce cas, le personnel pourrait être amené à s'équiper de ses appareils respiratoires individuels pour parcourir les derniers mètres jusqu'à la recoupe.

4.4.2.2 Incendie avec stratification des fumées

L'exemple retenu est celui de l'incendie d'un engin de puissance thermique de 30 MW en galerie de liaison. Ce cas, qui correspond à un engin de travaux, est un cas enveloppe par rapport à celui d'un engin de transfert de colis qui serait de plus faible puissance thermique (15 MW).

La propagation, la hauteur et la température de la couche de fumée ont été déterminées de manière analytique en exploitant les connaissances des phénomènes de stratification observés dans le cas des tunnels routiers. Les effets liés au rayonnement émis par les fumées de l'incendie sont à comparer au seuil admissible des effets thermiques sur l'homme (2 kW/m^2 pour les personnes non équipées de protection⁴²).

Les résultats de la simulation (voir Tableau 4.4-1) montrent que les personnes évacuent en étant soumises à une valeur de rayonnement maximum de $0,9 \text{ kW/m}^2$ au bout de 100 m d'évacuation dans le cas d'une évacuation à la vitesse la plus lente (0,5 m/s), ce qui correspond à des conditions satisfaisantes.

Rayonnement thermique reçu par le personnel (kW/m^2)		
Vitesse de déplacement du personnel	0,5 m/s	1 m/s
Localisation par rapport au foyer		
100 m	0,88 kW/m^2	0,38 kW/m^2
200 m	0,56 kW/m^2	0,38 kW/m^2
400 m	Les fumées n'atteignent pas cette distance en raison de la mise en marche du système de désenfumage	0,36 kW/m^2

Tableau 4.4-1 Rayonnement thermique reçu pendant l'évacuation dans le cas d'un incendie (30 MW) avec fumées stratifiées en galerie de liaison

⁴² Cette puissance radiative correspond à une température maximale de la couche de fumée de l'ordre de 200 °C, qui induirait une température de la couche d'air inférieure à 80 °C dans la zone « saine » (voir Figure 4.4-3).

4.4.3 Conclusion

Dans les installations souterraines du stockage, deux types d'incendie peuvent se développer : les incendies avec des fumées stratifiées (dans des galeries de liaison) ou déstratifiées (dans des galeries d'accès aux alvéoles C ou CU). Dans les deux cas, les simulations effectuées tendent à montrer que la conception de l'infrastructure du stockage souterrain avec des faisceaux de galeries parallèles reliées à intervalles réguliers par des galeries de jonction (recoupes) permet aux personnes de s'éloigner du lieu de l'incendie dans des conditions satisfaisantes, de rejoindre rapidement une galerie parallèle alimentée en air frais (hors du circuit des fumées) puis de regagner la surface dans de bonnes conditions.

Dans quelques cas (incendie avec déstratification des fumées et vitesse d'évacuation lente), on ne peut exclure à ce stade que les personnes pourraient être rejointes par les fumées et devraient utiliser leurs protections respiratoire et oculaire individuelles.

Un cas particulier est celui dans lequel un incendie se développerait en phase de travaux dans une galerie en cul-de-sac. Des personnes pourraient se trouver prises entre l'incendie et l'extrémité de la galerie sans pouvoir rejoindre une recoupe pour évacuer. Dans cette situation, elles devraient s'abriter dans un refuge mobile équipé (air comprimé, eau...) qui aurait les caractéristiques nécessaires de résistance au feu et d'étanchéité aux fumées. Les personnes attendront le secours du personnel d'intervention qui devra arriver sur le lieu de l'incendie pour agir le plus rapidement possible.

Le retour d'expérience en travaux souterrains montre qu'un effort particulier doit être mené sur les mesures de prévention et de formation du personnel, avec des exercices réguliers permettant d'acquérir les réflexes de sauvegarde indispensables. Si les personnes sont bien formées et disposent des moyens adéquats pour intervenir efficacement en cas d'incendie, elles parviennent généralement à éteindre le feu avant qu'il ait eu le temps de se développer. Une intervention par du personnel spécialisé avec un équipement plus conséquent ne serait requise que dans 10 % des départs de feu environ [55].

4.5 Étude des conséquences d'un incendie de l'engin de transfert des hottes (B, C et CU)

Les hottes de transfert des colis de stockage sont chargées dans les installations nucléaires de surface sur un engin porteur. Celui-ci les amène jusqu'au puits de transfert des colis et les positionne sur un support métallique dans la cage qui les descend ensuite jusqu'au niveau des installations souterraines. Elles sont alors reprises par un engin analogue à l'engin utilisé en surface, qui transporte les hottes jusqu'aux alvéoles de stockage.

En plus des conséquences usuelles du développement d'un incendie (augmentation de température, émission de fumées...), traitées dans la section précédente, l'incendie de cet engin pourrait avoir des conséquences radiologiques s'il affectait la protection assurée par la hotte (protection contre l'exposition externe) et le colis primaire (maintien du confinement).

L'objet de cette section est d'estimer, par des études de simulation [46], si des conséquences radiologiques sont susceptibles de se produire et de proposer, si nécessaire, des mesures complémentaires pour prévenir ce risque ou s'en protéger.

4.5.1 Évaluation des conséquences d'un incendie de l'engin porteur sur la hotte et son contenu

Cette évaluation est réalisée dans l'hypothèse de l'incendie d'un engin porteur de hotte de colis B, C ou CU malgré les mesures de prévention préconisées (voir paragraphe 4.4). La nature de ces colis, l'évolution de leurs caractéristiques en fonction de la température à laquelle ils sont portés ainsi que les principales caractéristiques des hottes sont rappelées dans le Tableau 4.5-1.

Colis primaire (température interne)	Données spécifiques relatives aux conditions de température	Colis de stockage	Hotte de transfert	
			Matériau	Épaisseur (mm)
B2.1 ⁴³ boues bitumées (température ambiante)	Enrobé bitumineux : ramollissement à 40°C point éclair à 230°C auto-inflammation à 350°C	Colis béton (avec 4 colis primaires en position verticale)	Acier Écran thermique ⁴⁴	180 à 220 20
CSD-V déchets vitrifiés (64 °C au cœur du déchet)	Cristallisation du verre : 450 °C	Surconteneur métallique (avec un colis CSD-V en position horizontale)	Acier interne Neutrophage Acier externe	200 à 230 140 à 150 20
CU1 combustibles usés UOx (87 °C au centre de l'assemblage)	Fragilisation de la gaine de l'élément combustible au-delà de 500 °C	Conteneur métallique (avec 4 combustibles usés en position horizontale)	Acier interne Neutrophage Acier externe	70 120 20

Tableau 4.5-1 Caractéristiques principales des colis et hottes de transfert

⁴³ Le colis de boues bitumées a été retenu parmi les différents colis B parce qu'il est celui qui présente le plus de risques d'ignition.

⁴⁴ Pour certains colis B (B4, B5), il est prévu un matériau neutrophage dont les caractéristiques lui permettraient de jouer le rôle d'écran thermique, comme pour les colis C et CU.

4.5.1.1 Définition du scénario d'incendie

Le véhicule utilisé pour le transfert des hottes est un engin de transport automoteur électrique sur pneumatiques. Le feu de référence étudié est localisé dans les installations souterraines. Il a été défini à partir des caractéristiques spécifiques de l'engin et des préconisations du Centre d'Étude des Tunnels routiers (CETu) ; il correspond à un incendie d'une puissance thermique de 15 MW pendant une durée d'une heure (voir paragraphe 4.4).

L'incendie se développe dans une galerie de liaison, avec un débit de ventilation en fonctionnement normal de 30 m³/s environ, s'élevant à 50 m³/s après mise en route du système de désenfumage.

4.5.1.2 Données relatives aux études de simulation

La simulation utilise une méthode des éléments finis qui permet une description élaborée des champs de température et une traduction efficace de la non linéarité des échanges thermiques.

La puissance thermique émise par l'incendie se transmet du foyer à l'ensemble des éléments constituant l'engin de transport et la hotte par un flux convectif et un flux radiatif représentant respectivement 2/3 et 1/3 de la puissance thermique totale de l'incendie⁴⁵ :

- la puissance convective se retrouve dans les fumées émises par le foyer de l'incendie. Elles sont mélangées avec l'air circulant en galerie, enveloppent la hotte et échangent avec elle ;
- la puissance radiative est liée au rayonnement du foyer de l'incendie. Elle s'applique différemment, suivant la forme géométrique de la hotte. Dans le cas des hottes cylindriques (colis C et CU), elle est appliquée uniformément sur le plateau de l'engin, sur le châssis des hottes et sur leur demi cylindre inférieur. Pour les hottes parallélépipédiques contenant les colis B, cette puissance est appliquée pour moitié sur la face inférieure en contact avec le plateau de l'engin et pour moitié sur les faces latérales.

4.5.1.3 Résultats relatifs à un incendie sur la hotte de transfert, le colis de stockage et le colis de déchets de boues bitumées (B2)

Le Tableau 4.5-2 présente les résultats de la simulation d'incendie avec les températures maximales qui seraient atteintes au niveau des faces externes de la hotte de transfert, du colis de stockage et des colis primaires. Il donne également la durée nécessaire depuis le début de l'incendie pour atteindre cette température maximale.

		Température maximale atteinte (°C)	Durée d'atteinte de Tmax depuis le début de l'incendie
Hotte de transfert	Face inférieure	900	~ 1 h
	Faces latérales	455	~ 2 h
	Face supérieure	127	~ 1 h
Colis de stockage	Selon la face	de 203 à 561	~ 3 h
Colis primaire	Corps du fût	143 (en face inférieure)	~ 16 h
	Déchets	< 120 (sauf en base du colis)	~ 16 h

Tableau 4.5-2 *Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis primaire de boues bitumées (B2) obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie*

⁴⁵ Cette répartition correspond aux préconisations du CETu (Centre d'Études des Tunnels) pour un incendie de ce type d'engin.

Les simulations montrent que le risque d'inflammation des déchets de boues bitumées est écarté compte tenu de la conservation de l'intégrité de la hotte, du colis de stockage et de l'enveloppe du colis primaire qui empêche tout contact d'une flamme avec la matrice bitumineuse. Une auto-inflammation des produits bitumineux, qui nécessite une température de l'ordre de 350 °C, ne peut également pas se produire. La seule conséquence de l'incendie sur les déchets serait un ramollissement de l'enrobé bitumineux.

Les températures déterminées montrent que la hotte devrait être faiblement affectée d'un point de vue mécanique, en raison de son épaisseur importante.

Grâce à l'effet bénéfique de l'écran thermique incorporé dans la structure de la hotte, l'enveloppe béton du colis de stockage serait soumise à des températures de l'ordre de 500 °C, qui ne devraient pas affecter l'intégrité du colis.

L'enveloppe métallique des colis primaires, qui est peu sollicitée thermiquement avec des températures maximales de l'ordre de 150 °C (voir Figure 4.5-1), ne serait pas endommagée par l'incendie.

Ces résultats amènent donc à écarter l'hypothèse d'une détérioration du colis primaire de déchets et d'une perte de confinement.

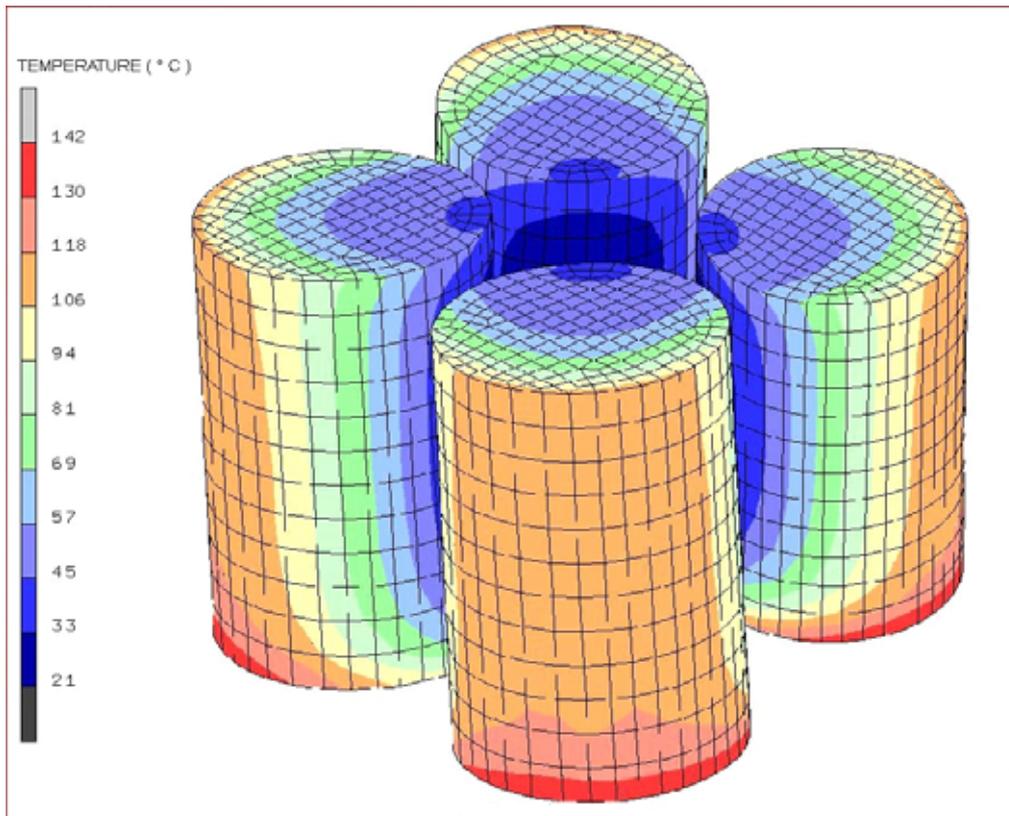


Figure 4.5-1

Champ de températures au niveau des colis primaires de boues bitumées (B2.1)⁴⁶ dans le cas d'un incendie de l'engin de transfert

⁴⁶ Sur cette figure, le foyer d'incendie est localisé sous les colis et l'enveloppe béton du colis de stockage n'est pas représentée.

4.5.1.4 Résultats relatifs à un incendie sur la hotte de transfert, le colis de stockage et le colis de déchets vitrifiés (C)

Dans le cas des colis C (voir Tableau 4.5-3), les simulations montrent que l'épaisseur de la hotte et la présence du matériau neutrophage PPB (Plâtre Polyéthylène Boré), qui joue un rôle d'écran thermique, permettraient de limiter la température au niveau des déchets à 90 °C environ.

Ce résultat apparaît comme une valeur maximale, sachant que la température sur la face externe de la hotte est estimée à environ 1 400 °C, alors que le retour d'expérience sur des incendies en milieu souterrain donnent des températures généralement comprises entre 800 et 1 200 °C [56] [57].

		Température maximale atteinte (°C)	Durée d'atteinte de Tmax depuis le début de l'incendie
Hotte de transfert	Face externe	1410	~ 1 h
	Plâtre polyéthylène boré	1347	~ 1 h
	Face interne	71	~ 4 h
Colis de stockage	Selon la face	70	~ 23 h
Colis primaire	Corps du conteneur	71 à 83	de 23 h à 27 h
	Déchets	92	~ 30 h

Tableau 4.5-3 *Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis primaire C obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie*

L'intégrité du colis de stockage (surconteneur / conteneur) apparaît donc assurée et la température atteinte dans le colis primaire ne serait pas susceptible de modifier les caractéristiques de la matrice vitreuse des déchets C.

Compte tenu des températures de l'incendie, la hotte pourrait être affectée par des phénomènes de fluage de l'acier et des défauts de cohésion du PPB. Ceci nécessiterait de contrôler le niveau de protection radiologique avant toute opération de reprise de la hotte.

4.5.1.5 Résultats relatifs à un incendie sur la hotte de transfert, le colis de stockage et les assemblages de combustibles usés (CU1)

Les résultats relatifs à l'incendie d'un engin porteur de hotte de combustibles usés amènent les mêmes commentaires que dans le cas des colis C (voir Tableau 4.5-4).

Les contraintes thermiques ne seraient pas susceptibles d'induire des conséquences mécaniques sur l'assemblage de combustibles usés. Il n'y aurait pas de risque d'endommagement car ils ne subiraient qu'une élévation d'une quinzaine de degrés par rapport à leur température initiale.

Comme précédemment, les résultats obtenus amènent à écarter l'hypothèse d'une détérioration du colis de combustibles usés susceptible d'avoir des conséquences radiologiques.

		Température maximale atteinte (°C)	Durée d'atteinte de Tmax depuis le début de l'incendie
Hotte de transfert	Face externe	1280	~ 1 h
	Plâtre polyéthylène boré	1250	~1 h
	Face interne	271	~2 h
Colis de stockage	Conteneur	98	~4 h
	Insert	69	~8 h
	Étui	67	~9 h
Assemblage de combustibles usés	Centre de l'assemblage	100	-

Tableau 4.5-4 Températures estimées au niveau de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis de combustibles usés (CU1) obtenues par simulations numériques en conditions d'incendie

4.5.2 Conclusion

En phase de transfert entre les installations de surface et les alvéoles de stockage, l'incendie d'un engin porteur de hotte ne devrait pas avoir de conséquences thermomécaniques pouvant affecter l'intégrité des colis de déchets transportés, qui bénéficient d'une double protection : la hotte de transfert, dont l'un de ses constituants a une capacité d'écran thermique, et le colis de stockage.

En revanche, il serait nécessaire que les opérations d'intervention consécutives à l'accident soient menées après contrôle du niveau de protection radiologique assuré par la hotte. Dans le cas où ce niveau serait insuffisant, les interventions nécessiteraient, par exemple, l'utilisation de protections radiologiques mobiles.

4.6 Étude des conséquences d'un incendie de l'engin de manutention des colis B

Dans les installations de surface, les colis de stockage de déchets B⁴⁷ sont mis en place dans la hotte de transfert par un engin de manutention élévateur à fourches à alimentation électrique. Ils sont ensuite déplacés dans cette hotte jusqu'à l'alvéole de stockage où ils sont repris par le même type d'engin pour leur mise en alvéole.

En plus des conséquences usuelles du développement d'un incendie (augmentation de température, émission de fumées...), l'incendie de l'engin de manutention des colis de stockage B à l'intérieur de l'alvéole pourrait avoir des conséquences radiologiques s'il affectait la fonction de maintien du confinement du colis primaire.

L'objet de cette section est d'estimer, par des études de simulation [46], si des conséquences radiologiques sont susceptibles de se produire et, si nécessaire, de proposer des mesures complémentaires pour prévenir ce risque ou s'en protéger.

4.6.1 Évaluation des conséquences thermomécaniques d'un incendie sur le colis de stockage et les colis primaires contenus

Cette évaluation est réalisée dans l'hypothèse d'un incendie de l'engin de manutention d'un colis de stockage malgré les mesures de prévention prises (voir paragraphe 4.4). Les caractéristiques du colis de stockage ont été précédemment décrites dans le Tableau 4.5-1.

4.6.1.1 Définition du scénario d'incendie

Le scénario retenu est celui qui surviendrait au cours d'une manutention des colis de type B2 car la matrice bitumineuse des déchets de ce type de colis apparaît comme la plus sensible à une élévation de température. D'autre part, le cas de l'incendie de l'engin en souterrain a été étudié préférentiellement parce que cet engin apparaît avoir un potentiel calorifique plus élevé que l'engin de surface.

L'engin de manutention à fourches utilisé pour transférer les colis de stockage de leur hotte vers leur emplacement définitif en alvéole de stockage serait un véhicule automoteur électrique sur rails. L'incendie considéré surviendrait pendant le transfert du colis de stockage entre l'entrée de l'alvéole et les piles de colis déjà stockés. Il serait d'origine électrique et impliquerait les batteries et les moteurs de l'engin. Le scénario tient compte de la mise en place d'un écran thermique de 2 cm d'épaisseur entre la partie motorisation de l'engin et la partie manutention.

Les caractéristiques de l'incendie ont été définies à partir des caractéristiques de l'engin ; il lui correspond une puissance thermique de 3 MW pendant une durée d'une demi-heure. Cet incendie se développe dans une alvéole dans laquelle le débit de ventilation est de l'ordre de 3 m³/s.

4.6.1.2 Hypothèses relatives aux études de simulation

La méthodologie utilisée est similaire à celle présentée pour l'incendie en transfert de colis (voir paragraphe 4.5.1.2). La seule différence est liée au fait que le colis de stockage est situé en position latérale par rapport au foyer de l'incendie qui serait situé au niveau des batteries de l'engin. Dans ces conditions, il est considéré que la puissance radiative appliquée du côté du colis correspond à la moitié de la puissance radiative totale et celle-ci se répartit pour 50 % sur la face latérale directement soumise à l'incendie, et pour 50 % sur les quatre faces qui lui sont adjacentes.

⁴⁷ Ce cas de figure ne concerne pas les colis C et CU introduits directement depuis la hotte dans leurs alvéoles sans nécessiter l'intervention d'un engin supplémentaire.

4.6.1.3 Comportement thermique du colis de stockage et du colis primaire de boues bitumées B2 lors de l'incendie

Le Tableau 4.6-1 présente les résultats de la simulation avec les estimations de températures qui seraient atteintes au niveau des différentes faces du colis de stockage et au niveau des colis primaires pendant l'incendie. Il indique également la durée nécessaire depuis le début de l'incendie pour atteindre la température maximale.

		Température maximale atteinte (°C)	Durée d'atteinte de T max depuis le début de l'incendie
Colis de stockage	Face latérale, du côté du foyer de l'incendie	521	~ 30 min
	Faces adjacentes	319	~ 30 min
	Face opposée	134	~ 30 min
Colis primaires situés du côté du foyer de l'incendie	Corps du fût	98	~ 4 h
	Déchets	66 à 97	~ 3 h

Tableau 4.6-1 *Températures estimées au niveau du colis de stockage et des colis primaires de boues bitumées obtenues par simulation numérique de conditions d'incendie*

Les simulations montrent que le risque d'inflammation des déchets est écarté, compte tenu de la protection assurée par l'enveloppe béton du colis de stockage qui empêche tout contact direct d'une flamme avec la matrice bitumineuse. Une auto inflammation des enrobés bitumineux, qui nécessite une température de l'ordre de 350 °C, ne peut également se produire. La seule conséquence de l'incendie sur les déchets serait un ramollissement de l'enrobé bitumineux lié à son échauffement. Des mesures de protection complémentaires comme l'arrêt ou la diminution du flux de ventilation en alvéole (clapet coupe-feu) pourraient aussi être retenues pour isoler l'alvéole concernée et diminuer l'intensité de l'incendie.

Les colis primaires seraient soumis à des niveaux de température inférieurs à 100 °C pour les deux colis les plus exposés, côté incendie, ce qui n'endommagerait pas leur enveloppe métallique et n'affecterait pas les déchets bitumineux contenus. Leur température moyenne serait d'une quarantaine de degrés (voir Figure 4.6-1).

L'enveloppe béton du colis de stockage serait soumise à des températures de l'ordre de 500 °C, qui ne devraient pas affecter son intégrité. En revanche, ses propriétés mécaniques pourraient être altérées et un phénomène d'écaillage est susceptible de se produire à sa surface⁴⁸.

Dans tous les cas, les résultats obtenus amènent à écarter l'hypothèse d'une détérioration du colis de boues bitumées susceptible d'avoir des conséquences radiologiques.

⁴⁸ Des essais ont montré que des colis béton fibres d'épaisseur comparable soumis à une température moyenne de 800°C pendant 30 mn pouvaient montrer des phénomènes d'écaillage superficiel de la surface lié au contact de la flamme, mais sans éclatement du béton.

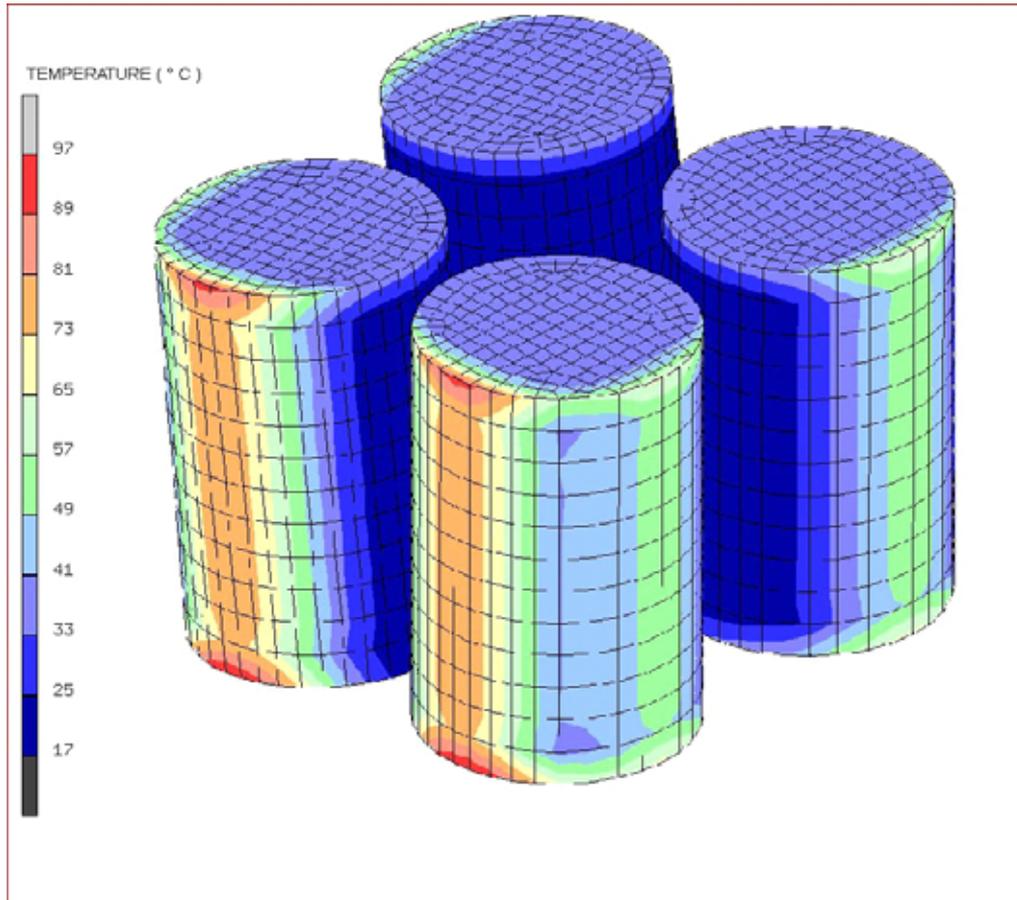


Figure 4.6-1 *Champ de températures au niveau des colis primaires de boues bitumées (B2.1) dans le cas d'un incendie en alvéole de stockage⁴⁹*

4.6.2 Conclusion

L'incendie de l'engin de manutention utilisé pour la mise en place des colis de boues bitumées dans l'alvéole de stockage ne devrait pas avoir de conséquences radiologiques, car l'enveloppe béton du colis de stockage et un écran thermique placé entre la source d'incendie et le colis protègent efficacement les fûts de boues bitumées. D'autre part, la température, qui devrait être limitée à une centaine de degrés, n'est pas de nature à provoquer l'auto inflammation du bitume.

⁴⁹ Le foyer d'incendie est placé latéralement à gauche des colis et l'enveloppe béton du colis de stockage n'est pas représentée.

4.7 Étude des conséquences d'une chute de cage lors du transfert des colis de stockage en puits

On retient une chute libre de la cage depuis la surface⁵⁰ comme scénario accidentel de chute en puits.

Dans ce cadre, les études s'attachent d'abord aux estimations des conséquences mécaniques de la chute sur les différents constituants du mobile (cage, hotte, colis de stockage, colis primaires) avant d'estimer quelles pourraient être les conséquences radiologiques si l'impact mécanique de la chute induisait une perte de confinement des colis de déchets transportés et un relâchement de matières radioactives [46].

Elle comprend aussi une analyse du risque de criticité [45] qui pourrait être consécutif à la chute de la cage lors d'un transfert de colis de combustibles usés.

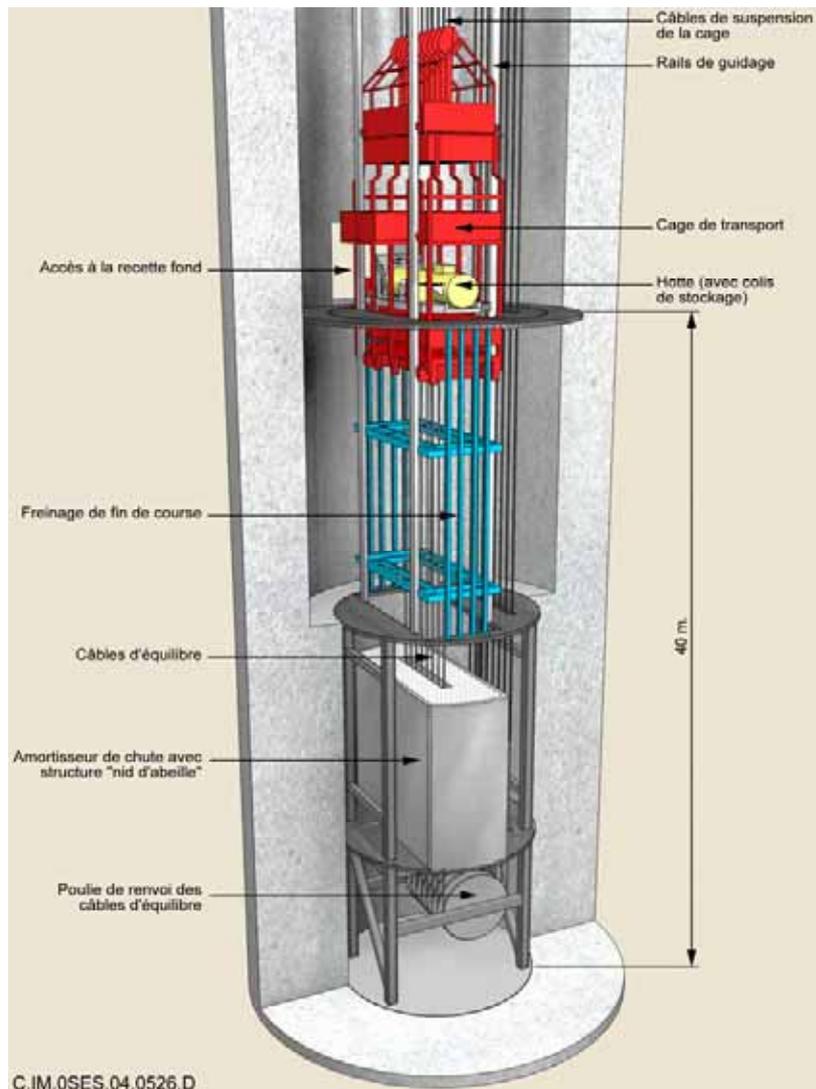


Figure 4.7-1

Représentation 3D de la partie basse du puits avec le système amortisseur de chute

⁵⁰ Les accidents de chute de cage liés à une défaillance mécanique du système sont extrêmement rares. En France, le dernier accident grave connu a eu lieu à Reumaux (Lorraine) en 1925. Il était dû à une défaillance de frein qui a engendré une chute de cage sur 600 m environ dont les 170 derniers en chute libre après rupture du câble (il s'agissait d'un treuil à tambour). Il n'y avait ni système anti-chute, ni amortisseur en fond de puits. Cet accident a coûté la vie à 55 mineurs, alors que 28 mineurs, qui étaient tous dans le compartiment supérieur de la cage, ont été dégagés vivants.

4.7.1 Évaluation des conséquences mécaniques d'une chute de la cage en puits

Cette évaluation a été faite pour les colis de stockage B, C et CU suivants (voir Tableau 4.7-1).

Colis primaire	Colis de stockage	Hotte de transfert (masse en charge)
B2.1 : boues bitumées ⁵¹	Colis béton ⁵² (avec 4 colis primaires en position verticale)	Hotte parallélépipédique (40 t environ)
CSD-V : déchets vitrifiés	Surconteneur métallique (avec un conteneur CSD-V en position horizontale)	Hotte cylindrique (50 t environ)
CU1 ⁵³ : assemblages de combustibles usés	Conteneur métallique (avec 4 assemblages de combustibles usés en position horizontale)	Hotte cylindrique (100 t environ)

Tableau 4.7-1 Données principales relatives aux cas de chute en puits étudiés

4.7.1.1 Scénario de chute

Le scénario envisagé est celui d'une chute libre de la cage⁵⁴ sur toute la hauteur du puits qui impacterait un système amortisseur de chute placé en fond de puits⁵⁵.

Ce scénario, qui est majorant au niveau de la hauteur de chute, ne tient pas compte :

- du fonctionnement du système anti-chute de la cage ;
- de l'effet éventuel de freinage lié à un frottement ou un coincement des câbles de suspension de la cage pendant la chute ;
- de l'effet du freinage de fin de course installé en fond de puits.

4.7.1.2 Données relatives aux études de simulation

L'approche par simulation⁵⁶ numérique se fait par étapes en quantifiant les conséquences de la chute successivement sur la cage, la hotte, le colis de stockage et le(s) colis primaire(s) transporté(s). L'état de chaque élément de ces objets à l'issue de la chute est caractérisé par sa déformation plastique qui correspond au cumul de l'ensemble des types de déformations subies (dilatation, distorsion...). Le coefficient correspondant, exprimé en %, peut être comparé à la valeur caractéristique admissible (VCA) du matériau qui constitue cet élément. Le risque de rupture est analysé en fonction des valeurs du coefficient de déformation et de la localisation, la forme et l'extension de la zone déformée.

⁵¹ Le colis de stockage B2.1 a été retenu pour représenter la famille des colis B, parce qu'il correspondait au colis primaire (fût métallique de faible épaisseur) le plus fragile.

⁵² Pour la simulation, on a pris les caractéristiques du colis de stockage en béton fibré non armé, plus vulnérable à l'effet d'une chute que le colis de stockage renforcé par des armatures métalliques.

⁵³ Le colis CU1 (UOx), qui contient plusieurs assemblages, apparaît mécaniquement plus fragile vis-à-vis du risque de chute que le colis CU2 (MOx) qui ne contient qu'un assemblage.

⁵⁴ Dans ce scénario, la rupture des câbles de suspension de la cage a aussi pour conséquence la chute du contrepoids sur une cinquantaine de mètres jusqu'en fond de puits.

⁵⁵ Plusieurs éléments techniques conditionnent le dimensionnement de l'amortisseur : la masse la plus lourde transportée, la limitation de la décélération de la hotte à une valeur n'induisant pas d'endommagement mécanique majeur, la limitation de l'écrasement de l'amortisseur à la moitié de sa hauteur. Afin de minimiser l'effet de l'impact sur le mobile, il est également envisagé d'utiliser un amortisseur de chute avec un étage supérieur de seuil d'écrasement inférieur à celui de l'étage inférieur pour qu'il fonctionne de la manière la plus progressive possible.

⁵⁶ Les études de simulation de chute ont été réalisées avec le logiciel Radioss, qui permet d'étudier par éléments finis tout comportement fortement non linéaire d'une structure soumise à des sollicitations pouvant aller du quasi-statique à la dynamique rapide. Radioss intègre temporellement les équations de la dynamique non linéaire par une approche explicite.

4.7.1.3 Conséquences d'une chute de la cage en puits

Après une analyse du bilan énergétique de la chute, l'état du colis primaire est examiné avec l'objectif de savoir si les dommages occasionnés par la chute sur l'amortisseur sont ou non susceptibles de se traduire in fine par une perte de confinement et un relâchement de radionucléides.

● Bilan énergétique

Le bilan énergétique, illustré par la chute de la hotte de déchets C (voir Figure 4.7-2), montre que la plus grande partie de l'énergie cinétique incidente a été transformée au cours de l'impact en énergie interne de déformation en un temps très court.

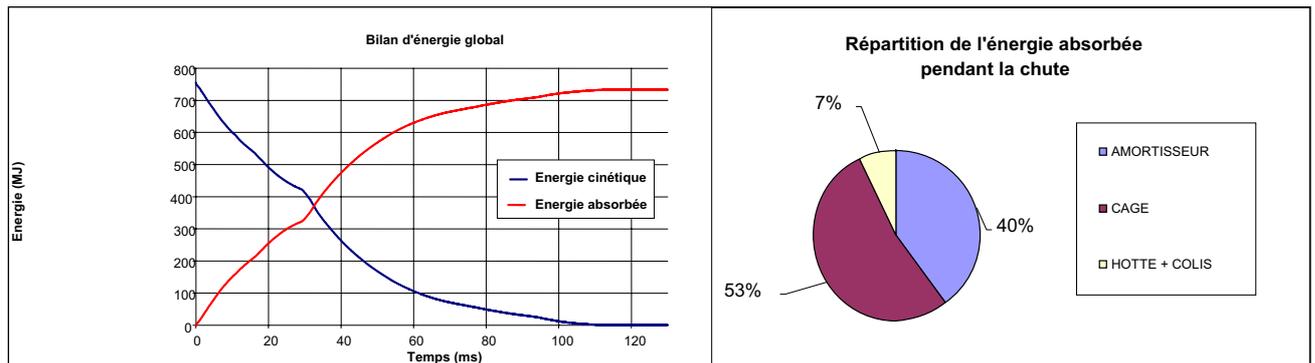


Figure 4.7-2 Bilan énergétique d'une chute en puits d'une cage transportant une hotte avec déchets C

Plus de 99 % de l'énergie du choc est absorbée par l'amortisseur, la cage et la hotte. Le colis de stockage absorbe moins de 1 % de l'énergie. Cette répartition reste valable pour les chutes de colis B et CU.

● Conséquences mécaniques de la chute sur les colis primaires de déchets

L'estimation des déformations observées sur les colis primaires permet d'appréhender le risque de perte de confinement de matières radioactives, à travers les deux éléments d'appréciation suivants :

- la valeur maximale du coefficient de déformation du colis primaire, qui est une donnée indicative (car une valeur de déformation élevée limitée à quelques éléments du maillage n'est pas significative) ;
- la surface du colis primaire pour laquelle le coefficient de déformation est supérieur à la valeur caractéristique admissible (VCA), ce qui signifie un risque de rupture.

Les résultats des simulations (voir Tableau 4.7-2) montrent que, pour l'ensemble des colis B, C et CU, le risque de perte de confinement des matières radioactives est écarté puisque aucune valeur de déformation n'est supérieure à la VCA du matériau constitutif du colis primaire. On peut cependant noter que les colis B sont les colis primaires qui subissent les déformations les plus élevées et qu'il subsiste une incertitude, en particulier pour les colis type B2, quant à la tenue au choc du sertissage de leur couvercle.

Type de colis	Localisation	Déformation maximale (%)	VCA (%)	Surface pour laquelle la déformation dépasse la VCA
B (B2.1)	Colis primaire	25,9	35	Aucun dépassement n'est constaté pour les différents types de colis. Il n'y aurait pas rupture de leur enveloppe
C (CSD-V)	Colis primaire	0,3	35	
CU1 (assemblages nus)	Logement de section carrée contenant l'assemblage de combustible	1,2	26	
CU1 (assemblages en étuis)	Étui cylindrique contenant l'assemblage de combustible	17,4	40	

Tableau 4.7-2 Estimations des déformations subies par les colis primaires à l'issue de la chute sur l'amortisseur

Les résultats des études de simulation soulignent l'intérêt d'installer, dans le puits de transfert des colis, un amortisseur de chute. Celui-ci devrait permettre d'éviter la rupture de l'enveloppe métallique de la hotte de transfert en cas de chute de la cage.

À l'intérieur de cette hotte, les premières estimations tendent à montrer que les colis primaires C ainsi que les tubes ou étuis contenant les combustibles usés devraient résister au choc sans rupture. En ce qui concerne les colis primaires B, un endommagement des colis les plus fragiles comme les colis de type B2 ne peut être totalement exclu.

4.7.2 Évaluation des conséquences radiologiques d'une chute de la cage en puits

La prise en compte des résultats des études relatives aux conséquences mécaniques d'une chute de cage conduirait à considérer qu'il n'y a pas de perte de confinement de matières radioactives lors du transfert de colis en puits.

Cependant, compte tenu des incertitudes sur le déroulement de la chute en puits et sur la définition du mobile, des scénarios de relâchement de matières radioactives ont été envisagés pour estimer le risque radiologique qui serait associé [46].

4.7.2.1 Scénarios de relâchement de matières radioactives

Il est fait l'hypothèse d'une ouverture de la porte de la hotte de transfert, d'une rupture du colis de stockage, et d'une rupture du colis primaire qui induiraient un relâchement de matières radioactives mises en suspension dans le puits et rejetées dans l'environnement. Les colis étudiés sont ceux qui présentent le contenu radiologique le plus pénalisant au sein de chaque catégorie. Il est ainsi retenu le colis B5 (déchets B), le colis C3 (déchets C) et le colis CU1 pour les combustibles usés.

Différents jeux de données ont été retenus quant aux quantités de radionucléides susceptibles d'être libérés et relâchés dans l'atmosphère du puits. Les données relatives aux colis B5 ont été définies par analogie avec des observations faites au cours d'opérations de compactage (l'énergie est du même ordre de grandeur lors d'une chute et lors d'un compactage). Les données relatives aux colis C sont liées à des résultats d'essais de chute. En ce qui concerne les combustibles usés, l'approche paramétrique correspond à des hypothèses sur le degré de détérioration de l'assemblage, avec une rupture des crayons et un broyage des pastilles contenues plus ou moins importants.

4.7.2.2 Données relatives aux études de simulation

L'existence de sas au niveau des recettes (voir Figure 4.2-3) et l'interdiction d'accès à la zone du puits pendant une opération de transfert de colis sont des mesures qui devraient permettre d'éviter tout risque radiologique pour les personnes présentes dans les ouvrages souterrains. Aussi, aucune estimation n'a été faite pour le personnel affecté aux installations souterraines.

Les conséquences radiologiques d'un éventuel rejet radioactif dans l'environnement en sortie de puits de ventilation ont été estimées en tenant compte de l'ensemble des voies potentielles d'exposition :

- l'exposition liée au passage du panache des rejets induit une exposition externe et une exposition interne par inhalation ;
- l'exposition liée aux dépôts laissés par le panache induit une exposition externe, une exposition interne par inhalation suite à la remise en suspension et une exposition interne par ingestion d'aliments.

4.7.2.3 Résultats

Les études de simulation montrent que le phénomène de mise en suspension instantanée au moment de l'impact apparaît prépondérant par rapport au phénomène de mise en suspension lié à un balayage par l'air circulant dans le puits. Les radionucléides relâchés seraient totalement libérés dans l'environnement avec des conséquences potentielles sur une personne en limite de site, considérée par hypothèse à 500 mètres de l'émissaire du rejet.

Les voies prépondérantes d'exposition seraient, pour les trois types de déchets, l'inhalation due au passage du panache de radionucléides et, à un moindre degré, l'ingestion alimentaire.

Les résultats préliminaires des simulations effectuées amèneraient à envisager des mesures de réduction du risque avec, notamment, la possibilité d'une filtration sur le circuit de retour d'air des installations souterraines. Avec ce type de dispositif⁵⁷, qui est couramment utilisé dans des installations nucléaires de surface existantes, la dose totale d'exposition serait de l'ordre de 1 mSv⁵⁸ pour une personne en limite de site.

Une autre mesure envisageable consisterait à isoler la zone des puits (puits de descente des colis et puits de retour d'air) et ensuite, à faire un état des lieux avant de procéder à une intervention adaptée à la nature, l'importance et l'extension de la zone contaminée.

4.7.3 Analyse du risque de criticité

Sur la base des concepts de colis définis à ce jour et pour le mouvement d'un seul colis de stockage dans le puits, les situations accidentelles de chute des colis de stockage B et C ne présentent pas de risque de criticité, quelle que soit la géométrie du colis de stockage après la chute, compte tenu de la faible quantité de matière fissile contenue dans ces colis.

Pour les colis de combustibles usés, l'endommagement des assemblages (désolidarisation des crayons, rupture des gaines...) et leur rapprochement suite à la chute de la cage pourraient induire un phénomène de criticité s'il y avait en plus une venue d'eau au sein des assemblages [45].

Un tel niveau d'endommagement n'apparaît pas vraisemblable au vu des résultats des simulations de chute. Cependant, par précaution, des mesures de conception visant à empêcher toute présence d'eau dans le puits seraient à retenir (voir paragraphe 4.2.2.2) pour s'affranchir complètement de ce risque.

⁵⁷ Il pourrait être intéressant d'asservir les mouvements de descente de cage à la mise en route de l'unité de filtration pour s'affranchir d'un mode de filtration en continu avec des volumes d'air importants. Ce type de fonctionnement a été retenu dans le stockage américain de déchets transuraniens du WIPP, New Mexico [54], où l'unité de filtration installée sur le puits de retour d'air n'est mise en marche qu'en cas d'incident.

⁵⁸ Cette valeur est à confronter avec le fait que des dispositions spécifiques sont prévues réglementairement vis-à-vis du public lorsque des situations accidentelles induisent des doses supérieures à 10 mSv.

4.7.4 Conclusion

En phase de transfert des colis en puits, le risque de chute de la cage présente une probabilité d'occurrence très faible du fait des mesures de prévention préconisées. Malgré ces dispositions, en cas de chute libre du mobile dans le puits, la présence d'un amortisseur de chute en fond de puits permet de limiter l'endommagement de la hotte de transfert qui conserverait, au vu des résultats d'études de simulation, son intégrité mécanique.

Cependant, compte tenu des incertitudes des simulations de chute (définition du mobile, conditions de chute), il a été envisagé la possibilité d'un relâchement de radionucléides dans l'environnement au niveau du point de rejet. Pour estimer les conséquences radiologiques d'un tel événement, différents cas de figure ont été définis dans le cadre d'une approche paramétrique. Ceci a permis de proposer des dispositions techniques permettant de limiter le relâchement des radionucléides : une première consisterait à piéger les radionucléides par épuration de l'air au niveau du puits de ventilation, une autre serait d'obturer la zone entre le puits de colis et le point de rejet pour éviter tout risque de dissémination. Dans les deux cas, une mise en sécurité des installations et des mesures de contrôle seraient nécessaires avant de procéder, si nécessaire, à des opérations de décontamination.

Le risque de criticité associé à une chute d'un colis de combustibles usés n'est pas envisageable du fait de l'ensemble des dispositions proposées pour limiter l'endommagement du colis et en raison de l'absence d'eau dans le puits.

4.8 Étude des conséquences d'une chute de colis de stockage B lors de sa mise en place en alvéoles de stockage

La manutention des colis de stockage B est assurée par un engin commandé à distance par un opérateur hors de l'alvéole. L'analyse de risque a conduit à retenir comme scénario accidentel celui d'une chute d'un colis en alvéole de stockage au moment où celui-ci serait placé au niveau supérieur d'une pile de colis. Ce scénario est un scénario enveloppe vis-à-vis des opérations de manutention dans l'ensemble des installations du stockage.

Des simulations [46] s'attachent d'abord aux estimations des conséquences mécaniques de la chute sur les colis avant d'estimer quelles pourraient en être les conséquences radiologiques. Il est prévu de valider les résultats de ces simulations par des essais de chute des colis de stockage à échelle réelle au cours de l'année 2005.

4.8.1 Évaluation des conséquences mécaniques d'une chute de colis de déchets B en alvéole de stockage

L'évaluation des conséquences mécaniques d'une chute d'un colis de stockage a été réalisée par modélisation numérique pour les différents de types de conteneur envisagés : conteneur standard et conteneur à capacité de rétention renforcée. Ils sont représentés respectivement par un colis de type B2.1 et un colis de type B2.2 (voir Tableau 4.8-1).

Colis primaire Nature des déchets	Nombre de colis primaires par colis de stockage	Type de colis de stockage [58]
B2.1 : boues bitumées	4	Conteneur standard (le corps et le couvercle préfabriqués sont en béton armé et fibré)
B2.2 (CSD-C) : mélange de coques et embouts et de déchets technologiques	4	Conteneur à capacité de rétention renforcée (le corps préfabriqué et les couvercles individuels coulés sont en béton fibré)

Tableau 4.8-1 Caractéristiques principales des colis de stockage étudiés

4.8.1.1 Scénario de chute

Le scénario de chute retenu est fondé sur l'hypothèse d'un basculement et d'un retournement du colis de stockage suivi d'une chute verticale du colis tombant en un coin du couvercle sur un sol indéformable. Le centre de gravité du colis est situé à la verticale du point d'impact (voir Figure 4.8-1). Cette configuration est plus sévère que des cas de « chute à plat » ou de « chute sur arête ».

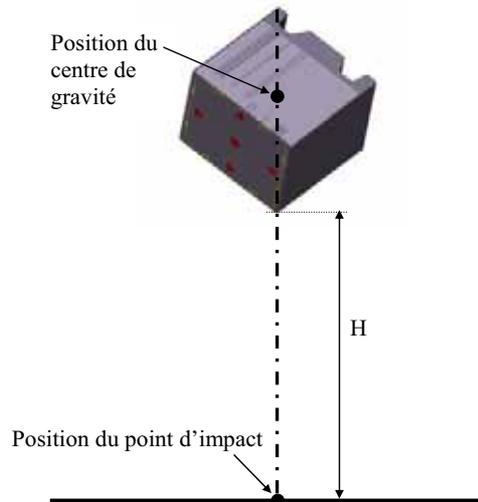


Figure 4.8-1 Scénario de chute d'un colis de stockage sur le sol de l'alvéole

Ce scénario a été modélisé pour une hauteur de chute de 6 mètres⁵⁹ qui correspond à la hauteur de manutention maximale des colis de stockage au moment de leur mise en place en alvéole.

4.8.1.2 Données relatives aux études de simulation

Les études de simulation ont été réalisées avec la même démarche que dans le cas des études de chute en puits (voir paragraphe 4.7.1.2). Le logiciel utilisé prend en compte la complexité des phénomènes mis en jeu (matériaux soumis à des déformations plastiques, voire des ruptures) et la diversité des matériaux qui constituent le colis de stockage.

4.8.1.3 Conséquences d'une chute d'un colis de stockage

L'objectif des simulations est d'estimer si les dommages occasionnés aux colis primaires par la chute du colis de stockage sur le sol se traduiront in fine par une perte de confinement et un relâchement de radionucléides.

● Bilan énergétique

Le bilan énergétique montre que la plus grande partie de l'énergie cinétique incidente est transformée au cours de l'impact en énergie interne de déformation en un temps très court. L'enveloppe béton du colis de stockage absorbe 90 % de l'énergie cinétique incidente. Les colis primaires reçoivent les 10 % restants.

● Conséquences de la chute sur les colis primaires

Les résultats (voir Tableau 4.8-2) sont donnés pour l'enveloppe métallique du colis primaire le plus exposé au moment de la chute, qui est celui à proximité immédiate du point d'impact.

Le critère retenu est la déformation de l'enveloppe du colis primaire au regard de la valeur caractéristique admissible (VCA) propre au matériau constitutif de cette enveloppe.

⁵⁹ La hauteur de chute est définie comme la distance, au début de la chute, entre le point d'impact (coin inférieur du couvercle) et le sol.

Type de colis	Caractéristiques de la chute	Déformation maximale de l'enveloppe du colis primaire (%)	VCA (%)
B2.1	Chute sur un coin du couvercle	23 ⁶⁰	35
B5.2	Hauteur de chute égale à 6 m	9	35

Tableau 4.8-2 Estimation des déformations des colis primaires à la suite d'une chute du colis de stockage

Les résultats relatifs au colis B2.1, montrent des déformations assez élevées (jusqu'à 23 %) localisées en partie supérieure du colis primaire (voir Figure 4.8-2)

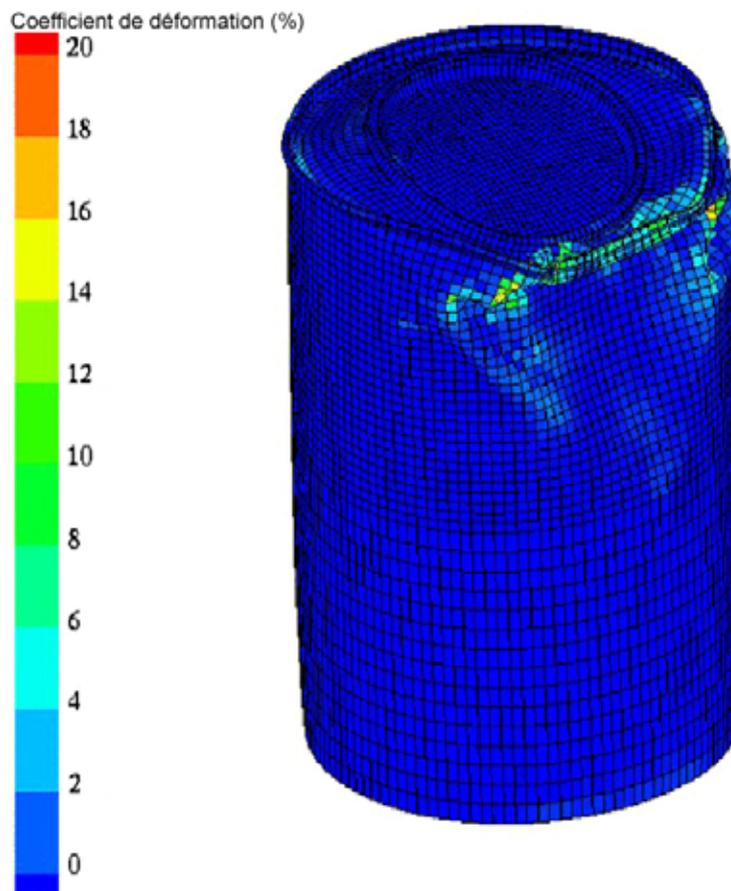


Figure 4.8-2 Déformations plastiques du colis primaire B2.1 (Chute de 6 mètres du colis de stockage sur un coin⁶¹)

⁶⁰ Le conteneur, objet de la simulation, sans armature mais avec une densité importante de fibres métalliques, ne correspond pas strictement au conteneur standard. Aussi, ce résultat est donné à titre indicatif.

⁶¹ Pour mieux visualiser les déformations, le colis primaire est représenté dans sa position initiale avant la chute, c'est-à-dire en position verticale, couvercle en haut.

Les résultats relatifs au colis B5.2 (voir Figure 4.8-3) montrent un endommagement limité du colis primaire en dessous de la collerette de manutention avec une valeur de déformation maximale proche de 10 %.

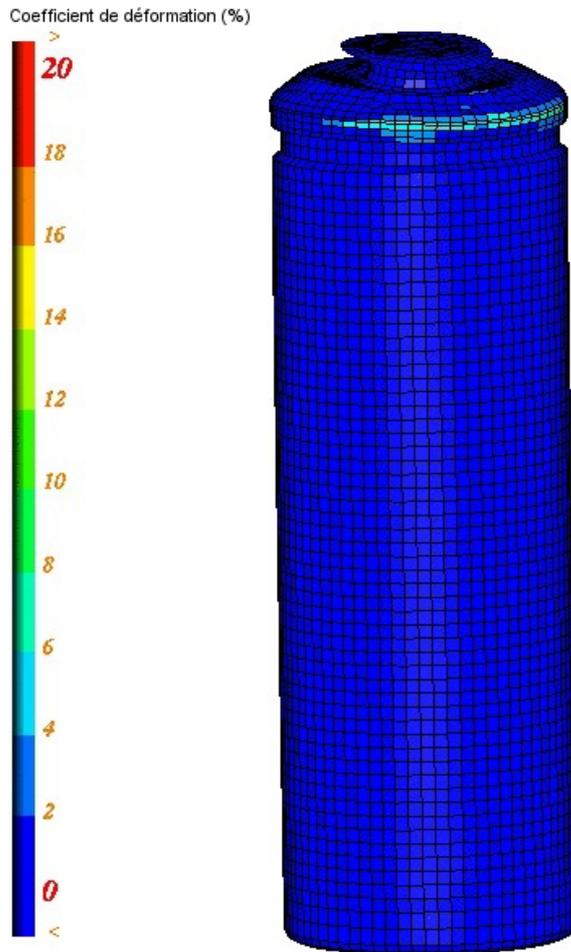


Figure 4.8-3 *Déformations plastiques du colis primaire B5.2 (chute de 6 mètres du colis de stockage sur un coin)*

Dans les deux cas, une chute n'entraînerait pas une perte de confinement des matières radioactives puisque aucune valeur de déformation de l'enveloppe des colis primaires n'est supérieure à leur valeur caractéristique admissible (VCA).

Cette conclusion doit cependant être tempérée par le fait que les simulations ne permettent pas de connaître avec certitude le comportement au choc du sertissage des couvercles des colis primaires (colis B2) et le comportement de la jonction entre corps et couvercle du conteneur. Les tests réels de chute permettront de lever les incertitudes à ce sujet et d'apporter, si nécessaire, les adaptations requises à la conception du colis de stockage.

4.8.2 **Évaluation des conséquences radiologiques d'une chute de colis de déchets B en alvéole de stockage**

Compte tenu des résultats des simulations et des incertitudes de modélisation mentionnées précédemment, des scénarios de relâchement de matières radioactives ont été envisagés pour le conteneur standard contenant des colis B2 [46].

4.8.2.1 Hypothèses retenues

Les études de simulation font l'hypothèse d'une ouverture du colis de stockage au niveau de la jonction entre le corps et le couvercle. Cet événement pourrait induire une déchirure locale du (des) colis primaires(s), avec un relâchement de matières radioactives qui seraient mises en suspension dans l'alvéole de stockage. L'air contaminé circulerait dans le circuit de retour d'air avant d'être rejeté dans l'atmosphère au niveau du puits d'extraction.

Différentes hypothèses ont été retenues quant aux quantités de radionucléides susceptibles d'être libérées et relâchées dans l'alvéole. Dans un cas, un seul colis présente une déchirure locale et, dans un autre cas, il est supposé un détachement du couvercle des quatre colis primaires. Il a été aussi tenu compte de la nature de la matrice de boues bitumineuses, qui a une bonne capacité à immobiliser les déchets radioactifs.

4.8.2.2 Conséquences radiologiques d'une chute de colis B2 en alvéole

Les études de simulation montrent que le phénomène de mise en suspension instantanée au moment de l'impact apparaît prépondérant par rapport au phénomène de mise en suspension continue par léchage des matières radioactives par la ventilation.

Les voies prépondérantes d'exposition du public seraient l'inhalation due au passage du panache de radionucléides et, à un moindre degré, l'ingestion alimentaire.

Les simulations montrent que la dose reçue à 500 mètres du point de rejet serait inférieure à 0,001 mSv, quel que soit le scénario retenu. Cette dose négligeable n'engendrerait pas de conséquences pour les personnes et l'environnement.

4.8.3 Conclusion

Durant les opérations de transfert et de manutention des colis B en alvéoles de stockage, la chute ne devrait pas survenir du fait des mesures de prévention préconisées. Néanmoins, s'il s'avérait que le colis basculait et tombait sur le sol de l'alvéole malgré les dispositions prises, cette chute induirait des détériorations mécaniques du colis de stockage. Les simulations montrent que le ou les colis primaires ne devraient pas subir de rupture de confinement et ne devraient pas libérer pas de particules radioactives. Cependant, pour les colis de boues bitumées (B2) il a été étudié des scénarios de relâchement de particules dans l'alvéole puis dans l'environnement via les circuits de ventilation. Ceci a conduit à estimer des détriments radiologiques qui s'avèrent négligeables pour le public.

4.9 Synthèse de l'analyse

L'analyse de risque effectuée couvre les activités industrielles de construction, d'exploitation et de fermeture du stockage de déchets radioactifs à vie longue. Menée en liaison avec les études de conception, elle a pour objectif à ce stade d'étude du projet de donner des orientations techniques et de proposer des mesures de réduction de risques éprouvées qui garantissent un fonctionnement sûr et permettent de satisfaire les fonctions de sûreté opérationnelle définies par l'Andra. Cette analyse menée de manière systématique a bénéficié du retour d'expérience d'installations industrielles existantes.

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

L'analyse de risque a distingué les risques conventionnels, rencontrés classiquement dans toute installation industrielle, les risques liés aux colis de déchets, et les risques liés à l'environnement extérieur du stockage.

Dans les installations de surface, les risques conventionnels existent, à un degré plus ou moins élevé, tout au long des différentes activités du stockage. Il s'agit essentiellement des risques d'écrasement (chute de charges manutentionnées, heurt par un engin ...), des risques de chute liée à des travaux en élévation, des risques d'électrisation ainsi que du risque d'incendie. Ces risques ne justifient pas d'études complémentaires à ce stade, mais seront à considérer avec attention lors de la conception détaillée des ouvrages et des équipements.

Dans les installations souterraines, ces risques sont aussi présents. Parmi eux, le risque d'incendie a fait l'objet d'une étude complémentaire compte tenu de son influence sur la conception des installations. Elle a permis de s'assurer que les solutions préconisées pour la conception des infrastructures et leur exploitation permettraient l'évacuation des personnes dans des conditions de sécurité satisfaisantes.

Les risques liés aux colis de déchets sont, pour l'essentiel, des risques radiologiques. Ils sont présents pendant l'activité d'exploitation du stockage, et à un moindre degré pendant l'activité de fermeture. Ces risques pourraient être associés à des défauts de protection radiologique, à des interventions à proximité d'une source radioactive ainsi qu'à un incendie ou une chute affectant les colis eux-mêmes. Les dispositions envisagées qui bénéficient du retour d'expérience d'installations industrielles similaires doivent permettre de maîtriser ces risques.

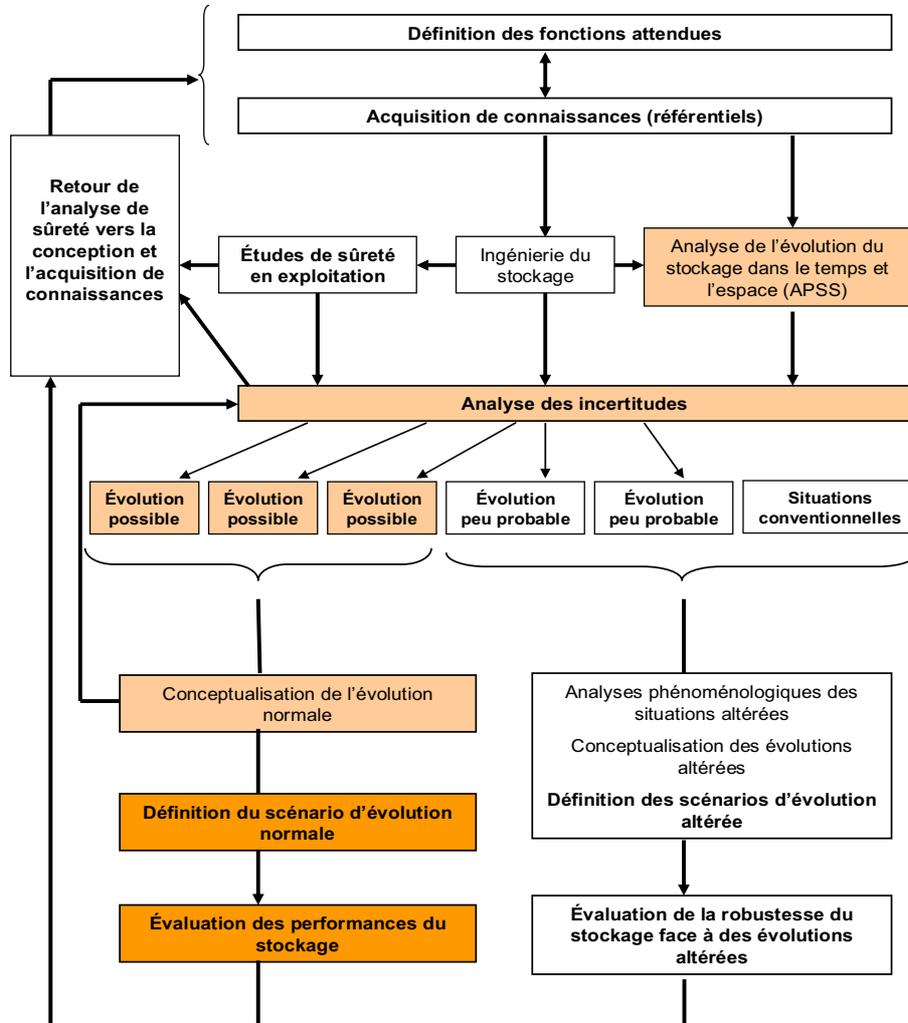
Les risques liés à l'environnement du stockage (séisme, conditions météorologiques, chute d'avion...), pris en compte sur la base des pratiques usuelles des installations nucléaires françaises en fonction des caractéristiques locales du site n'apparaissent pas soulever de difficultés spécifiques.

L'analyse de sûreté opérationnelle conduite n'a pas mis en évidence, à ce stade, d'éléments mettant en cause la faisabilité technique de la construction et de l'exploitation, la fermeture du stockage et sa gestion réversible par étape (avec notamment la possibilité d'un retour en arrière).

5

Évaluation des performances à long terme du stockage

5.1	Objectifs du scénario d'évolution normale.....	209
5.2	Des modèles conceptuels vers le modèle de calcul de sûreté	213
5.3	Description du modèle de sûreté.....	218
5.4	Evaluation quantitative du SEN.....	266
5.5	Principaux enseignements de l'analyse des performances	347



THEME ABORDE EN TANT QUE DE BESOIN DANS LE PRESENT CHAPITRE



THEME TRAITÉ SPECIFIQUEMENT DANS LE PRESENT CHAPITRE

Synoptique 5-1

Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : conceptualisation et définition du scénario d'évolution normale et évaluation des performances du stockage

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'impact du stockage en scénario d'évolution normale (SEN), c'est-à-dire au travers d'une modélisation et d'un calcul qui entendent couvrir l'ensemble des situations jugées « certaines ou très probables », selon la définition de la RFS III.2.f. [2].

Cette étape de l'analyse constitue la validation de la sûreté à long terme des architectures proposées. Elle sera complétée aux chapitres 6 et 7 par une analyse de la robustesse des concepts face aux incertitudes résiduelles et aux événements externes qui pourraient affecter l'évolution du stockage. Le présent chapitre s'appuie sur la description des architectures de stockage, et des fonctions en phase de post-fermeture qui leur sont associées, telle qu'elle a été présentée au chapitre 3, et sur l'ensemble des éléments de connaissance scientifique (voir en particulier le tome « évolution phénoménologique du stockage géologique » [7]) pour bâtir une représentation des possibles transferts de radionucléides à long terme. L'objet du chapitre est de présenter les différents compartiments du calcul et les motivations principales qui ont justifié les choix de modélisation, puis d'exposer les résultats et les enseignements qui peuvent en être tirés.

On notera que, essentiellement pour la commodité de lecture du chapitre 5, on n'a pas cherché à y discuter de manière très fine les incertitudes portant sur les choix de situations, de modèles et de paramètres constituant le SEN. Seuls les choix principaux, dictant l'architecture générale du calcul, sont présentés ici. Le chapitre 6 procédera ensuite à un examen plus détaillé des incertitudes. Il présentera de manière plus systématique la manière dont elles sont couvertes, soit par le SEN et ses analyses de sensibilité, soit par les scénarios d'évolutions altérées. Cette présentation en deux temps préserve la lisibilité du chapitre 5, tout en laissant au lecteur intéressé par une analyse détaillée l'opportunité de se reporter au chapitre 6, ou aux documents qu'il référence.

5.1 Objectifs du scénario d'évolution normale

5.1.1 Définition du scénario d'évolution normale

L'évaluation de performance consiste à traduire les choix fonctionnels d'une part et la compréhension phénoménologique de l'évolution du stockage d'autre part, en un scénario de déroulement de la vie du stockage, qualifié de scénario d'évolution normale (SEN).

Les incertitudes sur l'évolution du stockage sur un million d'années font qu'il n'est pas possible de définir de manière univoque un seul enchaînement de processus comme étant l'évolution de référence. Des variantes dans la nature même des interactions physico-chimiques au sein du stockage peuvent exister, la durée et l'extension spatiale des phénomènes peuvent être soumises à des variations. C'est la raison pour laquelle on a introduit la notion de « domaine d'évolution normale » (chapitre 1, paragraphe 1.7.3), qui est l'ensemble des évolutions qui paraissent suffisamment probables pour être prises en compte comme « normales ». Le scénario d'évolution normale doit les représenter de manière « enveloppe », c'est-à-dire présenter une évolution type qui a des effets égaux ou plus défavorables à la sûreté que les situations du domaine d'évolution normale.

Au-delà de cette seule définition, le SEN répond à plusieurs objectifs distincts. Il a pour but avant tout de vérifier que le stockage, tel qu'il a été conçu et telle que son évolution dans le temps est comprise par la connaissance scientifique actuelle, répond aux objectifs de sûreté qui lui ont été assignés. Cet objectif général se décline en plusieurs objectifs complémentaires :

- vérifier que les performances atteintes, telles qu'elles apparaissent au travers des indicateurs, sont en accord avec les valeurs seuils fixées au préalable. Cet objectif de sûreté implique de présenter une vision majorant l'impact potentiel d'un stockage ;
- présenter une simulation d'ensemble de l'évolution du stockage, afin d'évaluer globalement le comportement attendu, sous forme d'une représentation nécessairement simplifiée et en partie conventionnelle, mais tendant néanmoins à être la plus représentative possible. Il s'agit d'évaluer l'importance relative des phénomènes majeurs, les performances des fonctions de sûreté. Cet objectif de compréhension impose de ne pas retenir de représentations trop simplificatrices, qui nuiraient à la représentativité des modèles ;

- apporter les éléments pour juger de la sensibilité de la sûreté aux variations de l'environnement et du comportement des composants du stockage, et donc quantifier la robustesse du stockage à travers des analyses de sensibilité.

Le SEN est indissociable d'un modèle de calcul de sûreté, qui permet de procéder à son évaluation et d'aboutir à un impact quantifié. Celui-ci est défini à partir de :

- l'analyse fonctionnelle interne du stockage (chapitre 3), de manière à représenter les composants qui ont une fonction de sûreté à remplir. Cette représentation est soit directe (le composant et ses caractéristiques sont modélisés directement), soit assurée en représentant les effets de ladite fonction (par exemple, un composant qui a pour fonction de protéger la formation hôte n'est pas nécessairement représenté ; mais les caractéristiques de la formation hôte qui sont retenues pour le calcul prennent en compte cette protection). Certains composants n'ayant pas de fonction de sûreté peuvent être modélisés (en particulier, ceux qui constituent une voie de transfert pour les radionucléides le sont aussi, même s'ils n'ont pas de fonction vis-à-vis de la sûreté) ;
- le recensement des phénomènes pouvant se produire au sein du stockage, dans une vision chronologique et géographique, tel qu'il est exposé dans l'analyse phénoménologique des situations de stockage en évolution normale [28], qui décrit la phénoménologie de référence. Celle-ci permet, au travers du recensement à caractère systématique des phénomènes mis en jeu, de fixer le « déroulement » du scénario d'évolution normale [59] ;
- la conceptualisation détaillée du stockage [60] qui, sur la base d'une première définition des phénomènes et composants à prendre en compte, propose les modèles conceptuels (voir Encadré 4), et les représentations adéquates. Les modèles retenus pour le calcul du SEN sont alors une sélection parmi les modèles conceptuels proposés, guidée par une logique de sûreté (voir paragraphe 5.2.1) ;
- une première analyse des incertitudes, effectuée continûment à travers l'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) et les modèles conceptuels, qui permet de prendre en compte celles-ci soit dans la description du scénario, soit dans les choix d'études de sensibilité. Cette analyse, sous forme de discussion des phénomènes, modèles et paramètres, ne prétend pas être complète à ce stade. C'est l'objet de l'analyse qualitative de sûreté (voir chapitre 6) que de reprendre de manière systématique le recensement des incertitudes et de confirmer que le SEN s'inscrit bien dans un ensemble cohérent.

Encadré 4

Les différents niveaux de modélisation

Un modèle est, de manière générale, la représentation d'un système ou d'un processus, sous une forme mathématique. Il peut être de nature différente selon l'usage que l'on souhaite en faire :

- lors de travaux de recherche, il peut être important de « tester » une explication d'un phénomène en la confrontant à des observations et des résultats expérimentaux. L'hypothèse est alors traduite sous forme d'un modèle, qui doit permettre de reproduire lesdites observations, soit de manière empirique, soit en retraduisant les phénomènes sous-jacents. S'ils ne sont pas cohérents avec les résultats expérimentaux, le modèle et donc l'hypothèse doivent être rejetés. En revanche, s'il y a bon accord entre les prédictions du modèle et l'ensemble des résultats, on dit que le modèle est « validé ». De tels modèles sont couramment définis, discutés, adoptés ou rejetés par la communauté scientifique ;
- pour les besoins des études, l'Andra doit représenter les processus qui se déroulent au sein du stockage et qui en pilotent l'évolution. Cette représentation sous forme de « modèles conceptuels » constitue une approche simplifiée, mais robuste, rendant compte de l'influence des paramètres déterminants. Ces modèles sont notamment utilisés dans les calculs préparatoires permettant de jauger l'impact des différents phénomènes. Pour couvrir des incertitudes, on peut proposer plusieurs modèles conceptuels (voir paragraphe 5.2.2.1) ;

- le « modèle de calcul de sûreté » (dénomination entérinée par l'usage, mais « simulation de calcul de sûreté » serait plus juste) est la représentation mathématique du stockage et de son environnement, utilisée afin d'évaluer les transferts de radionucléides. Il s'appuie sur les modèles conceptuels, soit en les intégrant directement à la modélisation (ainsi, les modèles conceptuels de relâchement des matrices de déchets sont intégrés au calcul, par le biais des équations qui les traduisent en termes mathématiques), soit en prenant en compte les résultats issus du modèle (ainsi, le modèle conceptuel de comportement mécanique de la roche n'est pas intégré à la simulation, mais les extensions de la zone endommagée qu'il permet de calculer sont prises en compte). On notera que le modèle de calcul de sûreté ne peut faire l'objet d'une « validation » : d'une part, il représente le comportement en grand du stockage, qui est impossible à reproduire par l'expérimentation. D'autre part, il ne prétend pas reproduire fidèlement une réalité physique, mais au contraire en présenter une vision qui majore l'impact.

Le SEN et ses études de sensibilités constituent un ensemble indissociable. Le scénario est donc composé d'un ensemble de cas de calculs, respectivement :

- un « **calcul de référence** » qui présente l'état des connaissances de l'Andra sur l'évolution prévisible du stockage, dans une approche qui prend en compte à la fois les acquis de la recherche et l'approche de sûreté. Il a pour objectif d'évaluer un majorant de l'impact d'une éventuelle installation de stockage. Pour cela, il se compose d'un ensemble de paramètres et de modèles dont la logique de sélection est de retenir ceux qui s'appuient sur la meilleure connaissance scientifique disponible, en ajoutant un degré de conservatisme variable en fonction des incertitudes : faible là où les paramètres et modèles ont fait l'objet de validations détaillées, fort là où il subsiste encore des interrogations importantes ;
- un ensemble **d'analyses de sensibilité**, mono ou multi-paramétriques, destinées à hiérarchiser les paramètres et les modèles, en déterminant ceux dont la variation induit le plus de conséquences sur l'évaluation globale.

On notera que le calcul de référence présente lui-même une variante, puisqu'il intègre deux modèles hydrogéologiques différents (voir paragraphe 5.3.2.4). De manière générale, les études de sensibilité peuvent être considérées comme des « variantes » du SEN, dans la mesure où elles présentent des configurations jugées en règle générale moins représentatives de l'état des connaissances que le calcul de référence (soit qu'elles soient trop conservatives, soit qu'elles anticipent sur des acquis de la recherche qui paraissent accessibles à une échéance proche), mais relevant néanmoins du « domaine d'évolution normale ».

5.1.2 Objectifs de protection – notion de groupe critique

Les objectifs de protection ont déjà été présentés et discutés au chapitre 1. On se contente ici de les rappeler. Indépendamment d'autres indicateurs qui sont pris en compte dans l'analyse dans le but d'obtenir des informations sur le comportement des différentes fonctions de sûreté (flux de radionucléides en des points particuliers du système de stockage, indicateurs tels que le nombre de Péclet donnant des informations sur le régime hydrologique général), l'indicateur premier à l'issue du calcul du SEN est la dose individuelle engagée à l'exutoire, évaluée sur un groupe critique dans le cadre d'une biosphère type.

Ce groupe est localisé près des compartiments de la biosphère susceptibles de présenter les impacts (concentrations d'activité ou de toxique chimique) les plus importants. Ses habitudes alimentaires et son mode de vie sont déterminés sur la base des connaissances actuellement disponibles correspondant à des contextes similaires.

Ce groupe critique évolue dans un environnement de surface, la « biosphère ». La prévision des évolutions de l'environnement de surface, sur de longues périodes, est entachée d'incertitudes fortes. La RFS III.2.f. introduit pour cette raison la notion de « biosphères types ». On se fonde pour les définir sur les habitudes de vie telles qu'elles sont connues aujourd'hui, sans chercher à anticiper sur des évolutions aujourd'hui imprévisibles. Les grands déterminants de l'évolution climatique et géodynamique de surface, tels qu'ils peuvent être prédits par les modèles, sont cependant pris en compte pour définir le modèle (par exemple, on prend en compte la possibilité de périodes glaciaires, ainsi que l'évolution naturelle du réseau hydrographique de surface). On décrira plus avant la biosphère retenue, au paragraphe 5.3.2.6.

Du point de vue des habitudes de vie du groupe critique, on conserve les habitudes actuelles des populations, en introduisant un facteur de sécurité pour augmenter le degré d'autarcie. L'individu du groupe critique représenté dans le calcul a ainsi des techniques de production agricoles proches des nôtres, mais se repose essentiellement sur ses propres productions pour sa subsistance. On a testé par ailleurs l'influence qu'aurait une autarcie complète, irréaliste dans le contexte du site de Meuse / Haute-Marne mais couvrant les incertitudes sur les évolutions futures.

● **Les critères d'évaluation de l'impact**

Le résultat des calculs du SEN est constitué par la collection des indicateurs retenus, dont les valeurs sont comparées aux critères et seuils fixés par la RFS III.2.f. et par l'Andra (voir chapitre 1, paragraphe 1.4.2.2).

On rappelle que, en particulier, la dose est comparée à l'objectif de la RFS III.2.f. de 0,25 mSv/an pour les 10 000 premières années. Ce seuil est conservé en référence pour l'ensemble du calcul, jusqu'au million d'années.

L'évaluation du risque associé aux toxiques chimiques est réalisée à l'aide de deux grandeurs :

- l'excédent de risque individuel (ERI) exprimé en probabilité, permettant de juger des effets cancérogènes des toxiques. La limite associée est fixée à 10^{-5} (soit 1 cas pour 100 000 individus exposés durant 70 ans) ;
- le quotient de danger (QD), nombre sans dimension permettant d'apprécier les effets non cancérogènes à seuil. La limite associée est fixée à 1.

En complément, on peut, si nécessaire, faire appel pour certains toxiques à des seuils réglementaires associés aux concentrations dans l'environnement.

5.2 Des modèles conceptuels vers le modèle de calcul de sûreté

5.2.1 Principes généraux

Le scénario d'évolution normale traduit le fonctionnement du stockage, en prenant en compte les évolutions naturelles les plus probables. Les composants y jouent le rôle qui leur est dévolu par l'analyse fonctionnelle, avec pour le calcul de référence un niveau de performance qui correspond généralement à la meilleure estimation de leur comportement en conditions de stockage. Par exemple, compte tenu du niveau de caractérisation atteint pour le Callovo-Oxfordien et de la bonne cohérence des mesures, on a retenu pour le calcul un modèle (exprimé en termes de perméabilité, coefficient de diffusion, porosité, etc.) restituant des valeurs représentatives de celles qui sont couramment mesurées. Les caractéristiques et phénomènes au regard desquels le programme de recherche n'est pas encore conclusif, ou pour lesquels les résultats obtenus mettent en évidence une variabilité potentiellement forte, sont représentés dans une vision conservatrice.

Le choix de représenter dans le SEN les composants remplissant les fonctions qui sont attendues d'eux ne doit pas induire de confusion sur le sens de la démarche entreprise. Comme cela a été présenté au chapitre 3, les choix fonctionnels retenus par l'Andra sont cohérents avec l'état des connaissances et sont étayés par une justification scientifique. Ils correspondent au comportement le plus probable de ces composants. Ainsi, le SEN, bien que conçu dans cette approche en relation avec les choix du concepteur, répond à la définition de la « situation de référence » de la RFS III.2.f., décrite comme « *correspondant à l'évolution prévisible du stockage au regard des événements certains ou très probables* ».

Une fois le SEN défini, il convient de le modéliser pour permettre le calcul. Les modèles de comportement des différents composants sont issus des modèles conceptuels. Ces modèles fournissent une représentation des phénomènes physiques. Cette représentation peut répondre à des objectifs différents : certains modèles retranscrivent fidèlement un mécanisme physique bien identifié, d'autres traduisent un certain nombre de résultats expérimentaux sans que nécessairement tous les phénomènes sous-jacents aient été individuellement décrits, d'autres enfin ne prétendent pas traduire une réalité, mais obéissent à un autre objectif (par exemple, représenter de manière pessimiste un effet). Un certain nombre de choix sont à effectuer pour aboutir à un modèle utilisable pour l'évaluation de performances, dit « modèle de calculs de sûreté », ou « modèle de sûreté ». Ces choix sont destinés à gérer des incertitudes sur la représentation de la réalité par la conceptualisation.

En effet :

- plusieurs modèles phénoménologiques peuvent coexister pour rendre compte d'un même phénomène, selon le degré d'avancement des études ou la finesse de prise en compte des conditions d'environnement ;
- les modèles peuvent dépendre de calage sur des valeurs de paramètres. Ces calages s'appuient sur les données expérimentales disponibles ; celles-ci peuvent ne pas être en nombre suffisamment représentatif pour permettre de dégager une moyenne et un écart-type, ce qui laisse une latitude dans le choix des paramètres du modèle ;
- enfin, dans certains cas, les modèles retenus, quand ils sont enchaînés les uns aux autres pour constituer le modèle global de calcul, peuvent conduire à une représentation exagérément complexe du stockage, qui nuit à la bonne compréhension des mécanismes fondamentaux.

Pour l'ensemble de ces raisons, des choix sont à effectuer pour établir le « modèle de sûreté », support de l'évaluation du SEN, par rapport aux modèles conceptuels disponibles et présentés notamment dans [60]. Ils doivent être effectués dans un sens qui ne conduise pas à sous-estimer l'impact du stockage.

Le souci de l'Andra a été que ces choix soient décrits avec la plus grande précision possible et que le lien entre modèles conceptuels et modèle de calcul de sûreté soit le plus explicite possible, en accord avec les recommandations du groupe de revue internationale du dossier 2001 [15]. Cela suppose de fixer une terminologie permettant de qualifier les modèles et les paramètres proposés par les

scientifiques, de manière que les choix « de sûreté » s’effectuent sur une base homogène partagée par les ingénieurs scientifiques et de sûreté.

5.2.2 Terminologie

Ce paragraphe expose la terminologie qui a été définie pour la présentation des modèles conceptuels. Ce vocabulaire standardisé est ensuite utilisé comme une grille de lecture pour le choix des modèles du calcul de sûreté.

On nomme « impact » le résultat attendu du calcul (généralement une dose exprimée en sievert, mais le cas est généralisable à tout indicateur de sûreté).

5.2.2.1 Définitions portant sur les modèles

On définit plusieurs types de modèles conceptuels.

● Un modèle « phénoménologique »

Il se définit :

- soit, dans l’absolu, comme étant le modèle reposant sur la compréhension la plus complète du phénomène à modéliser, et dont l’aptitude à rendre compte de résultats de mesures directs ou indirects a été vérifiée. Il peut s’agir d’un modèle prenant en compte l’ensemble des phénomènes pertinents (dans les cas les plus simples) au niveau le plus fin, ou d’un modèle intégrant les paramètres d’environnement les plus influents (par exemple : pression, pH, température, etc.) ;
- soit, par comparaison avec les autres modèles disponibles, comme étant celui qui permet la meilleure adéquation entre la réalité qu’il entend représenter et les résultats numériques qu’il permet d’obtenir dans le calcul d’impact, dans la gamme de variation des paramètres qui est celle de l’étude.

On peut citer comme exemple de modèles du premier cas :

- les modèles physiques les plus élémentaires (loi de Coulomb, etc.) ;
- les modèles mécanistiques de type loi de Fick, loi de Darcy, qui bien que ne prenant pas en compte tous les paramètres sont utilisables comme « phénoménologiques » dans des milieux donnés où ils rendent compte de l’influence des paramètres majeurs.

Le deuxième cas recouvre tous les modèles faisant l’objet d’une validation expérimentale large et/ou d’un bon accord des experts au niveau international.

Il ne peut y avoir de modèle « phénoménologique » s’il n’y a pas eu un programme d’étude significatif sur le sujet considéré. En cas de phénomène peu connu ou pas encore étudié en détail, ou n’ayant pas fait l’objet de mesures, on ne peut définir de modèle « phénoménologique », car on ne dispose pas des éléments de jugement permettant d’effectuer la sélection ci-dessus. Par exemple, on ne peut pas définir de modèle de relâchement « phénoménologique » pour certains types de déchets dont le comportement de la matrice est peu connu (déchets du colis type B3, par exemple).

● Un modèle « conservatif »

Il s’agit d’un modèle dont on peut démontrer que son utilisation tend, toute chose égale par ailleurs, à surestimer l’impact du stockage par rapport aux résultats qui seraient obtenus en prenant en compte l’ensemble des phénomènes pertinents, dans la gamme considérée de variation des paramètres.

Par exemple, le choix d’un modèle de transport ne prenant pas en compte la rétention chimique peut être, dans les situations où celle-ci a un effet potentiellement non négligeable, considéré comme « conservatif ».

● **Un modèle « pénalisant »**

On qualifie ainsi un modèle qui n'entend pas se fonder sur une compréhension de la phénoménologie, fût-elle empirique, mais dont l'utilisation a pour seul intérêt de surestimer de manière certaine l'impact du stockage.

Par exemple, supposer un relâchement immédiat des radionucléides par les colis de déchets est, en général et sauf cas particuliers, un choix pénalisant.

● **Un modèle « alternatif »**

On qualifie ainsi un modèle qui n'est pas le modèle considéré comme le plus proche du « phénoménologique » mais qui est proposé à titre alternatif, sans qu'il soit possible de le positionner sur une échelle « phénoménologique », « conservatif », « pénalisant ». Cela peut être un modèle dont le choix n'a pas d'effet univoque sur l'impact, ou le cas échéant un modèle apparaissant plus complet que le modèle retenu en référence, mais ayant fait l'objet d'une validation moindre.

5.2.2.2 Définitions portant sur les valeurs

Dans le cadre d'un modèle donné, on définit quatre types de valeurs de paramètres possibles.

● **Valeur « phénoménologique »**

La valeur phénoménologique est celle qui est jugée comme permettant d'obtenir, tout autre paramètre fixé par ailleurs, la meilleure adéquation entre les résultats du modèle et des résultats de mesure. Ce choix est effectué a priori indépendamment d'une référence à l'impact ; si le raisonnement sur lequel on se fonde pour déterminer la valeur phénoménologique laisse une marge d'interprétation ou un intervalle d'incertitude, on choisit dans ce cas la valeur qui permettra, dans le calcul d'impact, de maximiser celui-ci.

Le choix de valeur phénoménologique doit s'appuyer sur des arguments détaillés qui peuvent être :

- un nombre représentatif de mesures, auquel cas la valeur retenue est fondée sur des considérations statistiques adaptées (en règle générale la valeur la plus probable), en intégrant le cas échéant une marge de sécurité ;
- un raisonnement physique montrant que cette valeur est la plus représentative en se fondant sur des informations fiables (référence à des mesures effectuées dans un autre cadre, avec justification du modèle permettant la transposition, par exemple) ;
- un jugement d'experts reconnus la désignant sans ambiguïté comme la valeur à retenir dans le contexte de l'étude considérée.

● **Valeur « conservative »**

On désigne par ce terme une valeur qui, parmi celles issues des études et des mesures, permet d'obtenir un impact calculé qui se situe dans une gamme de valeurs hautes (tout autre paramètre étant fixé par ailleurs).

Dans le cas le plus simple, où l'impact varie de manière croissante (respectivement décroissante) lorsque la valeur du paramètre croît, on choisit une valeur dans la plage haute (respectivement basse) des valeurs disponibles. Plus précisément :

- cette valeur pourra correspondre à un intervalle de confiance suffisamment haut, si l'on dispose d'assez de données pour établir ce type de statistique ;
- dans le cas où l'on dispose de peu de données, on choisit la plus haute (respectivement la plus basse) après élimination d'éventuelles valeurs jugées aberrantes ;
- en l'absence de mesures, on s'appuie sur les données disponibles à l'international dès lors qu'elles sont suffisamment explicites dans la littérature.

Si la variation de l'impact n'est pas monotone par rapport à la variation du paramètre, alors on ne peut définir de valeur « conservative ».

● **Valeur « pénalisante »**

On désigne par ce terme une valeur ne se référant pas à un état des connaissances phénoménologiques, mais étant choisie de manière conventionnelle comme conduisant de manière certaine à un impact supérieur à ceux qui seraient calculés avec des valeurs possibles. Elle peut correspondre à une limite physique (par exemple, assimiler la perméabilité d'un remblai à celle d'un sable, sur la base du fait qu'elle ne pourra pas être plus dégradée). Cette valeur peut aussi être égale à la valeur conservative augmentée (ou diminuée, selon le cas) d'un facteur de sécurité adapté qui la situe significativement hors de la plage des valeurs mesurées. Comme pour le cas de la valeur « conservative », si on n'est pas capable de caractériser la variation de l'impact en fonction de la variation d'un paramètre ou d'un changement de modèle, il n'est pas possible de définir son caractère « pénalisant ».

● **Valeurs « alternatives »**

Dans les cas où il n'est pas possible de caractériser la variation de l'impact par rapport à la variation des paramètres, on ne peut définir de valeur « conservative » ou « pénalisante ». Pour explorer les gammes de variations de paramètres possibles, on peut alors proposer une ou plusieurs valeurs, qualifiées d'« alternatives », destinées à explorer l'effet de valeurs contrastées.

Par exemple, en géochimie, on pourra tester des valeurs « alternatives » de composition chimique des eaux pour tester leur effet sur le transport des radionucléides, sans qu'on sache par avance caractériser l'effet sur l'impact.

5.2.2.3 Stratégie de choix des valeurs pour le modèle de calcul de sûreté

La stratégie pour définir le modèle de calcul de sûreté à partir des modèles conceptuels obéit aux principes suivants :

- comme déjà indiqué, pour le calcul de référence, on retient, en cas d'incertitude faible à moyenne sur le choix des modèles ou des paramètres, ceux qui sont les plus étayés scientifiquement (modèles et paramètres « phénoménologiques »). S'il apparaît néanmoins important d'étudier l'impact d'une valeur plus défavorable (« conservative », « pénalisante ») écartée car trop improbable mais néanmoins pas exclue, cette valeur de paramètre relève d'une étude de sensibilité ;
- on retient, en cas d'incertitude forte, le modèle ou la valeur de paramètre conservative ou pénalisante, selon les modèles ou valeurs disponibles ;
- à titre complémentaire, on privilégie, par rapport aux modèles les plus complexes, et les plus dépendants des conditions d'environnement (chimiques, thermiques, mécanique, etc.), les modèles plus simples et robustes, à condition que ce choix ne conduise pas à sous-estimer l'impact ;
- enfin, pour des questions en rapport avec les capacités de calcul et avec la lisibilité de l'analyse, tous les phénomènes qui régissent l'évolution du stockage ne sont pas nécessairement représentés. Ils ne sont pas pour autant négligés ou ignorés par l'analyse. Mais ils ont pu être étudiés séparément et antérieurement à la réalisation du calcul, les conclusions de ces études préparatoires conduisant à ne pas les représenter ou à les représenter de manière très simplifiée. Il en va ainsi du transitoire hydraulique dans les ouvrages, qui n'est pas représenté dans le calcul bien qu'ayant fait l'objet d'études détaillées (voir paragraphe 5.3.1.3) ou de la zone endommagée de la roche, qui est représentée directement telle que les modèles mécaniques permettent de la prévoir, sans que ces modèles eux-mêmes aient été couplés avec le reste du calcul.

Dans le cas où la variation de l'impact en fonction du sens de variation d'un paramètre, ou d'un choix de modèle, n'est pas univoque, une approche peut être de tester des modèles et paramètres contrastés pour évaluer l'incertitude globale.

La notion d'incertitude « faible, moyenne ou forte » comporte inévitablement une part de subjectivité, bien qu'elle puisse s'objectiver dans certains cas par des considérations d'ordre statistique (dispersion des valeurs expérimentales, taux de confiance, etc.). Le jugement porté sur l'incertitude est discuté au cas par cas par les experts qui proposent les valeurs et les modèles, dans les documents servant de support à la modélisation (voir notamment [60]).

En plus du calcul du scénario de référence à proprement parler, des calculs de sensibilités sont effectués, testant des jeux de paramètres ou des modèles différents de ceux qui sont retenus comme les plus représentatifs. Ces sensibilités sont, pour la plupart, destinées à couvrir une incertitude résiduelle (sachant que les principales incertitudes sont déjà en règle générale intégrées dans le calcul de référence). Elles se font donc vers des valeurs plus défavorables (du « phénoménologique » vers le « conservatif », ou du « conservatif » vers le « pénalisant »). Elles permettent d'évaluer la sensibilité de l'incertitude en question vis-à-vis de l'analyse des performances.

Par ailleurs, certaines études de sensibilité ont pour vocation de « tester » une valeur plus favorable d'un paramètre du calcul, afin d'évaluer l'intérêt d'étudier plus avant, dans une phase ultérieure, la plage de variation possible.

5.3 Description du modèle de sûreté

Les modèles conceptuels décrivant les phénomènes qui peuvent se produire au sein du stockage sont présentés et discutés dans le tome « évaluation phénoménologique du stockage géologique » [7]. Ils ne sont pas discutés de nouveau dans le présent document. La suite du chapitre expose directement le modèle de calcul de sûreté en le justifiant.

Après quelques éléments génériques sur les choix de représentation, les différents compartiments du calcul sont présentés successivement. Pour chacun d'entre eux, on rappelle succinctement les principaux éléments de compréhension phénoménologique que l'Andra a acquis lors du programme de recherche, permettant d'appréhender sa représentation. On explique ensuite la manière dont on a choisi de le modéliser.

5.3.1 Données d'entrée et modalités de traitement

5.3.1.1 Définition de la zone de transposition vis-à-vis de l'analyse de sûreté

L'Andra a délimité un domaine géographique autour du laboratoire de Meuse / Haute-Marne à l'intérieur duquel les données relatives au milieu géologique qui sont déterminées à partir du laboratoire sont transposables. Ce domaine appelé « zone de transposition » a été défini à partir de trois catégories de paramètres présentées dans le tome 5 du référentiel de site [17] :

- l'épaisseur de la couche ; le critère retenu est une épaisseur minimale de Callovo-Oxfordien, égale à 130 mètres sur la zone de transposition ;
- les propriétés physico-chimiques (mécaniques, physiques, chimiques et de confinement de la formation), cette catégorie d'éléments ayant conduit à deux critères de définition de la zone de transposition :
 - ✓ un premier critère correspondant à la variation de faciès et amenant à délimiter la zone au sud de la flexure de Pertuis-en-Aulnois par manque d'information sur la nature des sédiments déposés. Les forages pratiqués en 2004 ont contribué à apporter des informations sur cette partie du secteur, et laissent envisager la possibilité d'étendre la zone de transposition plus au nord. Ces résultats récents n'ont cependant pas été pris en compte dans le présent dossier ;
 - ✓ un second critère correspondant à la fracturation sur le secteur d'étude amenant à exclure les zones au sud par les points d'arrêts des différentes failles, à l'ouest par une zone de garde de 1,5 km par rapport aux failles de socle non actives au moins à l'échelle historique, et à l'est par une zone de 1 km par rapport au fossé de Gondrecourt ;
- les facteurs contrôlant l'importance des perturbations autour des ouvrages souterrains amenant à définir un critère de profondeur maximale limitant ainsi la zone au nord-ouest.

L'application des critères relatifs aux trois catégories de paramètres définit la zone de transposition. Cette dernière présente une superficie d'environ 250 km². Les limites de cette zone sont représentées sur la Figure 5.3-1.

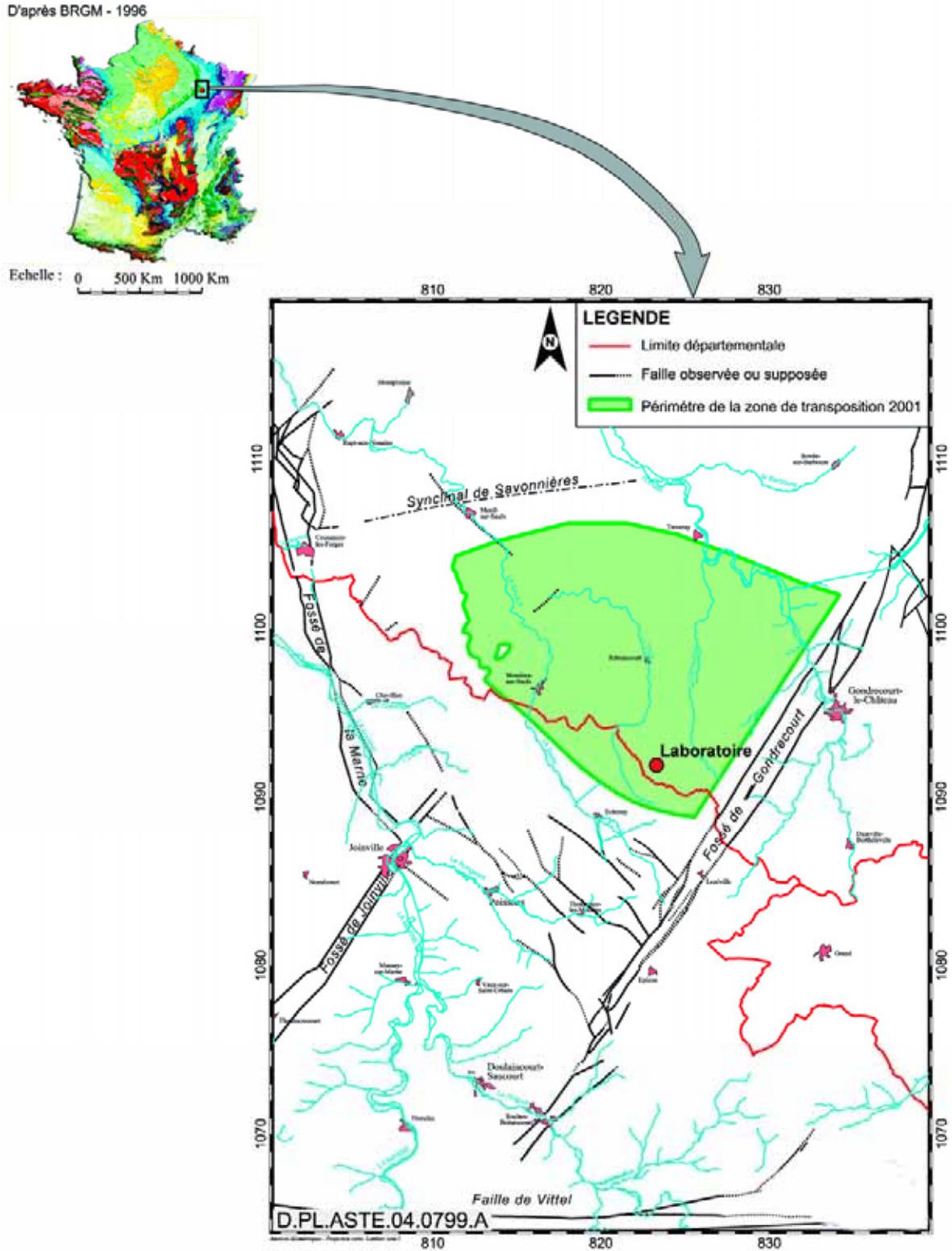


Figure 5.3-1

Site Meuse / Haute Marne – Limite de la zone de transposition

La démarche de transposition amène deux types de questions : celle de la localisation du stockage (« où le positionner dans la zone de transposition, en vue du calcul ? »), qui est abordée dans le paragraphe suivant, et celle des performances affectées aux fonctions de sûreté. Certaines d'entre elles sont en effet dépendantes du positionnement du stockage au sein de la zone. Par exemple, dans les zones les plus profondes, le comportement géomécanique de la roche devient plus défavorable. La zone endommagée peut y être plus étendue. Les performances de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » pourraient, le cas échéant, s'en trouver altérées.

La définition des concepts de stockage s'est effectuée à la profondeur du laboratoire de Meuse / Haute-Marne, là où le plus grand nombre de données est accessible et validé. En revanche, afin que les conclusions du calcul demeurent valables à l'échelle de la zone de transposition, les performances du système de stockage sont évaluées dans des conditions défavorables au regard du positionnement.

D'un phénomène à l'autre, la localisation la plus défavorable vis-à-vis des performances des fonctions de sûreté peut être différente au sein de la zone de transposition. Il apparaît donc clairement que cette démarche peut amener à définir un modèle global ne rendant pas compte d'une localisation particulière d'un stockage sur la zone de transposition, ce modèle global étant constitué d'un assemblage de modèles représentatifs de phénomènes localisés à des endroits éventuellement distincts.

En pratique, deux sujets sont abordés : l'épaisseur de la couche d'argilites – dont va dépendre la performance de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides », et le comportement géomécanique de la roche, qui influe notamment sur la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » au travers de l'endommagement en paroi d'ouvrages. Dans le premier cas, la performance de la fonction est d'autant plus faible que l'épaisseur de la couche est faible. Dans l'autre, la zone endommagée est plus étendue quand le stockage est implanté plus profondément. On retient donc une épaisseur de formation hôte minimale sur la zone de transposition et une profondeur maximale. On notera que ces deux choix correspondent à des positions différentes du stockage sur la zone : dans les environs du laboratoire de Meuse / Haute-Marne pour le premier cas, plus à l'ouest dans le second. Le calcul de performances ne rend donc pas compte d'une position donnée du stockage, mais se veut doublement pénalisant en termes de performances des fonctions de sûreté.

Une telle démarche permet de garantir que les évaluations prennent en compte de manière enveloppe la variabilité des positions possibles d'un stockage à l'échelle de la zone de transposition. S'il était décidé dans une étape ultérieure des études de s'intéresser à un site particulier au sein de cette zone, des investigations spécifiques sur l'emplacement en question seraient nécessaires pour affiner la connaissance des caractéristiques locales.

5.3.1.2 Positionnement du stockage

Compte tenu des choix réalisés sur les modèles dans le Callovo-Oxfordien, la définition de la localisation du stockage au sein de la zone de transposition n'a pas d'influence sur le calcul de transport dans les ouvrages et la roche.

Localiser le stockage, démarche qui est purement arbitraire à ce stade, est en revanche indispensable pour le calcul du transport des éléments dans les formations encaissantes, jusqu'aux exutoires potentiels. Une localisation « par défaut », conventionnelle, correspondant au site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne, est retenue en référence.

Compte tenu des distances séparant chacune des zones de stockage (250 mètres minimum), elles sont indépendantes thermiquement, hydrauliquement, chimiquement et mécaniquement et sont traitées séparément. De manière à s'affranchir d'hypothèses sur la position des zones les unes par rapport aux autres, elles sont supposées superposées en un même emplacement.

Les calculs sont donc effectués par zone de stockage ou sous-zone de stockage en les supposant centrées sur l'emplacement « générique » du laboratoire de recherche. Ce mode de représentation est illustré par la Figure 5.3-2. Il est appliqué à toutes les zones ou sous zones de stockage considérant un groupement de colis-types (voir paragraphe 5.3.2.1).

Il convient de s'interroger sur l'impact de ces choix sur le résultat du calcul. Dans la mesure où il minimise l'étendue du stockage, le fait de « superposer » les zones tend à concentrer les flux vers un nombre plus limité d'exutoires que si les différentes zones étaient représentées de manière étendue ; dans ce cas, les lignes de courant pourraient suivre des trajectoires a priori plus contrastées. De plus, la migration des radionucléides issus, par exemple, de la zone des déchets B n'est pas influencée par un panache superposé de radionucléides issus des zones de combustibles usés, qui pourrait en freiner la progression du fait des limites de solubilité dans le milieu.

Dans la définition des exutoires (voir paragraphe 5.3.2.5), on s'est efforcé de choisir les plus pénalisants par rapport à une localisation donnée du stockage. Le fait de regrouper toutes les zones de stockage dans cette localisation est majorant vis-à-vis de l'exutoire le plus proche.

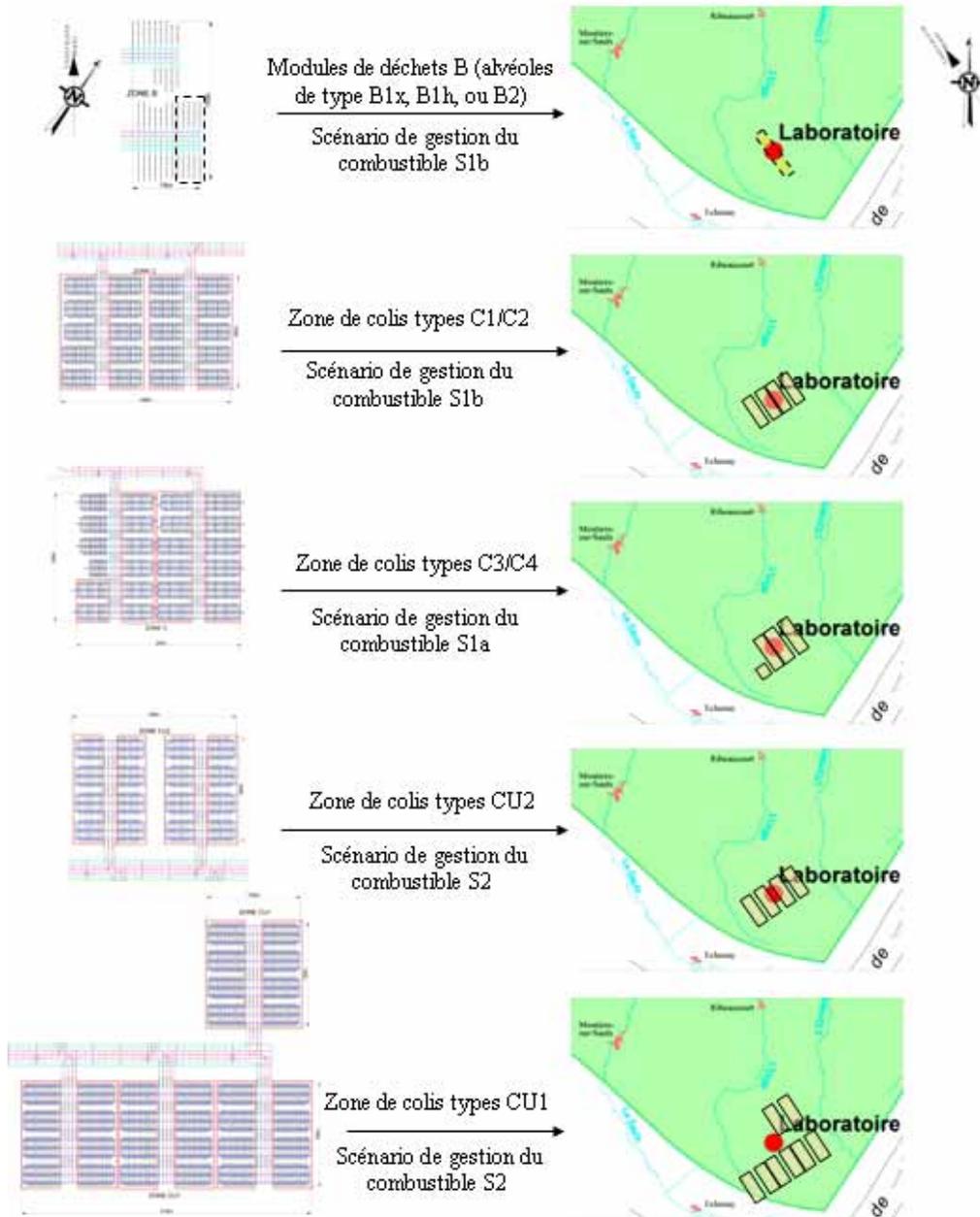


Figure 5.3-2 Position des zones de stockage des colis types de combustibles usés – Exemple du colis type CU1 et CU2 du scénario S2

5.3.1.3 État initial du stockage et prise en compte des transitoires

La variabilité des conditions d'exploitation et de fermeture du stockage induit potentiellement une indétermination sur l'état du stockage après fermeture. À titre d'exemple, l'état de désaturation ou d'oxydation de l'argilite peut varier en fonction des durées d'exploitation des alvéoles, particulièrement pour celles qui sont ventilées. Le choix est fait de retenir un état initial correspondant a priori à une durée séculaire à pluriséculaire d'exploitation des ouvrages du stockage. On étudiera plus précisément au chapitre 6, paragraphe 6.2.13 quelle influence la durée d'exploitation a sur les résultats du calcul.

Par ailleurs, les transitoires thermique, hydraulique, mécanique et chimique au sein du stockage ou dans les phases qui suivent la fermeture sont des éléments importants qui conditionnent les évolutions des composants et le transfert des radionucléides et des toxiques chimiques. Il convient alors de préciser les choix réalisés vis-à-vis de cette problématique.

● Transitoire thermique

Le transitoire thermique est représenté explicitement, à partir de calculs d'évolution thermique préalables au sein du stockage. La dépendance des caractéristiques du Callovo-Oxfordien en fonction de la température est prise en compte pour les paramètres les plus influents (à savoir le coefficient de diffusion et les coefficients de partage qui évoluent significativement avec la température, ceux du béryllium, du calcium, et un césium (voir paragraphe 5.3.2.3).

● Transitoire hydraulique

Pour déterminer s'il est nécessaire de prendre en compte les transitoires hydrauliques au sein du modèle de calcul, il importe auparavant d'en décrire sommairement les principaux effets.

L'état hydraulique initial de la formation hôte est perturbé par le creusement du stockage, qui induit une baisse de la pression de l'eau contenue dans les pores de l'argilite, à proximité des ouvrages (phénomène de « décharge hydraulique »). Dans les zones ventilées (ouvrages courants, alvéoles de déchets B), le renouvellement de l'air provoque de plus une désaturation, qui touche les ouvrages en béton (les soutènements et revêtements) ainsi que la périphérie de la roche. Pour une durée d'exploitation d'ordre séculaire, l'extension de la désaturation se limite à la zone endommagée. Même si l'exploitation se prolongeait, par exemple dans un contexte de réversibilité, la roche saine ne serait pas atteinte de manière significative, du fait de sa faible perméabilité [35]. Les ouvrages non ventilés (alvéoles de déchets vitrifiés ou de combustibles usés) se désaturent peu.

En phase de post-fermeture, et en conditions nominales, les ouvrages se resaturent. La durée de ce phénomène dépend des conditions d'exploitation préalables, mais également des caractéristiques physiques intrinsèques des composants (leur perméabilité) ainsi que du taux de vide dans les ouvrages.

L'arrivée d'eau permet à la corrosion des éléments métalliques de s'amorcer, dans un milieu qui devient rapidement réducteur. Cette corrosion anoxique produit de l'hydrogène. À ce phénomène s'ajoutent d'autres (radiolyse de l'eau, radiolyse des matières organiques, production par des micro-organismes), qui contribuent de manière minoritaire à l'accumulation de gaz au sein du stockage. Ce gaz s'ajoute à l'air enfermé dans le stockage après fermeture, l'oxygène étant cependant rapidement consommé par le retour à des conditions réductrices.

La corrosion se produisant même à des degrés de saturation faibles (de l'ordre de 30 %) la production d'hydrogène commence très tôt. Dans un premier temps, les gaz peuvent s'évacuer par dilution / diffusion dans le milieu. Mais, dans tous les cas de figure (alvéoles de déchets B, C et combustibles usés), une phase gazeuse finit par s'individualiser. Le gaz peut pénétrer dans les différents milieux qui l'entourent à partir du moment où il parvient à vaincre les forces de capillarité au sein de la porosité (on dit alors qu'il a atteint la « pression d'entrée » dans le milieu considéré, pour une taille de pores donnée). Il occupe la porosité en chassant l'eau libre, et peut ainsi migrer par écoulement biphasique lent. Au-delà d'une certaine pression, dépendante du milieu, il peut également interagir avec la porosité et la dilater pour faciliter son passage. Il crée ainsi des chemins préférentiels, assimilables à

une microfissuration. Des expérimentations, conduites par l'Andra et ses homologues étrangers (Nagra en particulier), montrent qu'elle est réversible et ne compromet pas à long terme la perméabilité à l'eau du milieu. Théoriquement, pour des pressions fortes, le gaz pourrait fracturer de manière irréversible les milieux qu'il traverse, mais les évaluations conduites par l'Andra montrent que les pressions nécessaires (autour de 12 MPa dans les argilites) ne sont jamais atteintes [61].

La montée en pression des gaz dure pendant un temps qui dépend des vitesses de corrosion et de la quantité de métal présent dans le stockage (qui dépend elle-même des quantités de déchets effectivement stockées). L'Andra a conduit des évaluations pénalisantes, qui supposent des vitesses de corrosion maximales, indépendantes du degré de saturation (de l'ordre de 2 à 3 microns par an, alors qu'on s'attend à des vitesses inférieures au micron par an en milieu anoxique). Ces évaluations montrent que la pression croît dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés pendant une phase de temps de 2 000 à 3 000 ans, et que les pressions atteignent respectivement 6 à 7 MPa dans les alvéoles de déchets C, 9 MPa environ dans les alvéoles de combustibles usés. Dans les alvéoles de déchets B, la montée en pression est significativement plus courte (500 ans) et les pressions de l'ordre de 7 MPa. La pression décroît ensuite régulièrement avec l'évacuation du gaz, jusqu'à sa disparition complète entre 100 000 et 200 000 ans.

L'accumulation de gaz peut désaturer les milieux qui comportent de l'eau libre mobilisable par le gaz, c'est-à-dire les milieux suffisamment poreux. La montée en pression désature ainsi en partie la zone endommagée de l'argilite, des bétons ainsi que des vides dans les alvéoles de déchets B. L'influence des gaz sur le degré de saturation des ouvrages en bentonite et du Callovo-Oxfordien est négligeable (quelques pourcents au plus). Les bouchons d'alvéole se resaturent par conséquent à l'échelle d'une centaine d'années, et les scellements de galeries et de puits à l'échelle des premiers millénaires, sans être influencés.

L'entrée du gaz dans la formation hôte ne mobilise qu'une fraction de sa porosité (3 % en champ proche, moins de 1 % en champ lointain). Néanmoins, elle est suffisante pour y engendrer des surpressions hydrauliques significatives en champ très proche. Ce phénomène est localisé, et la pression décroît rapidement au-delà de quelques mètres, bien que son influence puisse se faire sentir de manière résiduelle sur une quarantaine de mètres. Il est de plus transitoire, et cesse avant l'atteinte des 10 000 ans de phase de post-fermeture (au plus tard, pour le pourtour des alvéoles de combustibles usés, avant pour les autres alvéoles). Pendant cette phase, des écoulements divergents peuvent se produire dans la roche, mais les évaluations montrent que le régime de transfert reste diffusif à l'échelle de la formation hôte.

Pendant le même temps, dans les ouvrages d'accès, les scellements opposent une résistance à l'avancée du gaz, qui se répand en revanche très rapidement dans les remblais. La pression chute à mesure que l'on s'éloigne des alvéoles, le terme source de corrosion des galeries contribuant peu au volume total de gaz produit. Le volume d'expansion est suffisant pour que les différentes zones restent indépendantes les unes des autres.

Pendant cette phase et au-delà, et jusqu'à échéance de la centaine de milliers d'années, la pression est suffisante dans les alvéoles de déchets B pour retarder très significativement la resaturation. Si les déchets cimentés sont saturés dès l'origine et conservent une humidité significative (80 %), d'autres déchets comportant une macroporosité importante (tels que les B5) ne peuvent se saturer en eau. Les jeux entre colis sont secs et ne se remplissent que très lentement d'eau, par écoulement gravitaire. L'alvéole de déchets B n'est pas un milieu dans lequel existe une phase continue d'eau avant plusieurs millénaires, et elle n'est totalement resaturée qu'à l'échéance de la centaine de milliers d'années.

Dans les alvéoles de déchets vitrifiés et de combustibles usés, la phase de montée en pression correspond à la corrosion du chemisage, qui est le terme de production dominant. Les conteneurs sont donc épargnés par la corrosion, pendant cette phase. Ce « retard à la corrosion » n'est pas pris en compte dans les évaluations conservatives de durée de vie des conteneurs retenues pour le calcul de sûreté (4 000 ans et 10 000 ans respectivement pour les surconteneurs C et les conteneurs de combustibles usés). Celles-ci supposent une corrosion immédiate dans une alvéole qui reste totalement saturée.

À partir de la phase de décroissance de la pression et d'évacuation progressive du gaz, les écoulements convergent vers le stockage et accompagnent sa resaturation complète, au bout de 100 000 à 200 000 ans. Les scellements étant saturés à ce moment et n'ayant été que peu perturbés par les gaz, ils assurent un régime diffusif au niveau du stockage, et les écoulements sont très lents.

En résumé, dans l'hypothèse défavorable de vitesses de corrosion rapides, le transitoire hydraulique peut induire des pressions relativement fortes dans le Callovo-Oxfordien pendant les premiers millénaires. Cette phase est concomitante d'une désaturation de l'environnement des colis de déchets B et d'une absence de corrosion (ou d'une corrosion limitée) des conteneurs de déchets C et de combustibles usés. Elle n'est donc pas associée à un relâchement de radionucléides. L'objectif du scénario d'évolution normale étant de représenter les transferts de radionucléides, la phase de pression des gaz, sur les premiers dix mille ans, n'est pas représentée.

On se place directement dans une situation postérieure. Les scellements sont saturés à cette échéance. Le régime d'écoulement est donc diffusif, et supposer le stockage totalement resaturé est à cet égard une approximation valable au regard de la migration des radionucléides, et une hypothèse pénalisante au regard de l'évolution des composants (notamment les conteneurs et déchets métalliques) puisque cela accélère leur corrosion.

Pour s'affranchir des incertitudes sur la durée du transitoire hydraulique dû à la pression de gaz (cette durée dépendant de nombreux facteurs), on la fixe conventionnellement à zéro. On ne tire donc pas parti de la décroissance radioactive pendant cette phase.

Il ressort de la discussion précédente que cette hypothèse est :

- pénalisante au regard de la phase de montée en pression (premiers milliers d'années), pendant laquelle l'inventaire décroît sans que les radionucléides ne puissent être relâchés ;
- légèrement conservatrice, mais sans influence significative, sur la phase de resaturation qui suit, les radionucléides migrant essentiellement par diffusion malgré les écoulements qui sont d'une part globalement convergents et d'autre part très lents.

On trouvera au chapitre 6, paragraphe 6.2.5, une discussion plus détaillée des incertitudes qui peuvent entacher ce schéma de référence, et de leur influence sur le calcul. On note dès ce stade que, pour les couvrir, on a inclus dans les études de sensibilité du SEN une étude qui représente le transitoire de pression de gaz, en imposant des charges hydrauliques dans le modèle. Ce transitoire est supposé concomitant du relâchement des colis de déchets B, ainsi que des conteneurs défailants de combustibles usés (ce cas couvrant une situation équivalente sur les conteneurs de déchets vitrifiés). Cette étude de sensibilité considère donc la simultanéité de phénomènes physiques qui, en fait, s'excluent mutuellement.

● **Transitoire mécanique**

Les transitoires mécaniques ne sont pas représentés explicitement, mais sont pris en compte indirectement dans les calculs. De manière générale, et sous réserve d'une présentation plus détaillée composant par composant, la logique générale est la suivante.

L'EDZ est représentée pendant tout le calcul dans son état d'équilibre postérieur à la décharge mécanique due au creusement. Elle peut subir dans les phases qui suivent des actions sous l'effet des gaz (si la pression est suffisante pour y induire une dilatation temporaire de la porosité) ou sous l'effet du dégagement thermique des colis, mais ces actions sont réversibles et correspondent à des phases où il n'y a pas relâchement des radionucléides [62, 63]. On représente donc l'EDZ dans son état d'équilibre, une fois passés ces transitoires, tout en négligeant les phénomènes de cicatrisation qui vont se dérouler au-delà.

Pour les composants ouvragés, la perte de tenue mécanique est prise en compte à une date correspondant à une évaluation conservatrice. Au-delà de cette date, les fonctions de sûreté associées à la tenue mécanique sont dégradées : c'est par exemple le cas du conteneur de combustibles usés et du surconteneur de déchets vitrifiés, dont la tenue mécanique n'est plus assurée au-delà d'un certain degré de corrosion.

● **Processus chimiques**

Les phénomènes chimiques peuvent durer à l'échelle du calcul, sur le million d'années (voir chapitre 3). Les interactions correspondantes sont prises en compte au moment des choix de modèles et de paramètres, au cas par cas, en fonction à la fois de leur extension évaluée, et de leurs effets potentiels sur les fonctions de sûreté.

● **Conclusion sur la prise en compte des transitoires**

La discussion précédente montre que le SEN prend en compte de manière explicite le transitoire thermique. Le transitoire hydraulique, qu'il serait difficile de représenter dans une simulation globale, est négligé après avoir vérifié qu'une telle hypothèse est bien conservatrice. On a cependant défini des études de sensibilité sur la possibilité des transferts de radionucléides pendant ce transitoire, qui seront décrites dans la section qui leur est consacrée. Les transitoires mécanique et chimiques sont traités au cas par cas, sans couplage avec le calcul de sûreté.

5.3.1.4 Les vecteurs de transport

Deux vecteurs de transport peuvent favoriser la dissémination des radionucléides ou des toxiques chimiques contenus dans les déchets : l'eau et le gaz.

Le scénario d'évolution normale ne considère que le transport par l'eau dans la mesure où le transport d'éléments sous forme gazeuse apparaît négligeable.

En effet, les radionucléides susceptibles d'être présents sous forme gazeuse dans le stockage sont : le radon 222, le krypton 85, l'iode 129, le tritium, le carbone 14, le chlore 36 et l'argon 39.

Les gaz rares radioactifs (^{85}Kr , ^{39}Ar , ^{220}Rn) ne posent pas de problème en évolution normale soit parce que leur période est courte devant les échelles de temps d'étanchéité des conteneurs et de transfert dans le stockage (^{85}Kr , ^{39}Ar), soit parce qu'ils sont les descendants d'éléments fortement sorbés dans le milieu géologique, ne contribuant pas à l'impact en SEN (^{222}Rn).

Dans les conditions d'environnement du stockage, les halogènes (chlore et iode) se solubilisent facilement, et ne pourront pas migrer sous forme gazeuse sur des distances significatives.

Le carbone pourrait en revanche sous certaines conditions se trouver et rester sous forme gazeuse (le méthane). 98 % du carbone 14 de l'inventaire provient des gaines de combustibles (dans la zirconite et le zircaloy). La source principale est donc, selon les scénarios de gestion de déchets, soit les colis de coques et embouts (colis types B4 et B5) soit les colis de combustibles usés.

Le passage du carbone 14 sous forme méthane requiert la présence de microorganismes. Les colis de déchets compactés et les colis de stockage de combustibles usés ne représentent pas un environnement qui leur soit favorable, du fait de l'absence de nutriments. Seuls les colis types B5.1, qui contiennent une part de déchets organiques, sont susceptibles de présenter un dégagement de méthane radioactif. Ils représentent de 6 % à 20 % de l'inventaire total en carbone 14, soit 20 à 75 moles, ou encore un volume équivalent en conditions normales de température et de pression compris entre 0,5 et 1,7 m³, négligeable devant les quantités de gaz de corrosion présentes pendant les 100 000 premières années. Ce relâchement ne pourrait s'amorcer qu'avec la corrosion des gaines, soit après la phase de montée en pression (plusieurs milliers d'années). Il serait ensuite congruent à la corrosion des déchets (a priori rapide pour la zirconite, mais de l'ordre de 100 000 ans pour le zircaloy). Pendant ce temps, le carbone 14 décroît significativement, du fait de sa période qui est de 5 370 ans. Il n'est donc pas un contributeur significatif à l'impact⁶².

⁶² Même dans les cas les plus défavorables (hypothèse d'un relâchement tôt du carbone, ou d'un inventaire mobilisé plus important que prévu), le temps de transfert du méthane dans les encaissements permettrait, en dernière ligne de défense, une décroissance totale. On verra en effet dans les résultats du SEN que ce temps est d'au moins 50 000 ans.

5.3.1.5 Radionucléides et toxiques chimiques retenus pour l'évaluation de la dose

Pour limiter les temps de calculs et simplifier l'analyse, l'évaluation de performances a été menée avec un nombre limité de radionucléides. Pour ce faire, un exercice préalable aux calculs d'impact a consisté à sélectionner parmi les 144 radionucléides de période supérieure à 6 mois susceptibles de se trouver dans les colis de déchets et dont l'activité initiale est issue de [18], ceux contribuant a priori le plus à l'impact radiologique en SEN. La démarche et les résultats sont présentés ci-après.

Pour les actinides, un calcul préalable a mis en évidence que leur forte rétention chimique dans les argilites du Callovo-Oxfordien retarde l'apparition de leur maximum de débit molaire en sortie de formation hôte bien au-delà du million d'années. Sur cette période, la quantité d'activité sortant du Callovo-Oxfordien est négligeable et ils restent quasiment totalement confinés dans le champ proche. Ces derniers ne sont donc pas retenus pour le calcul d'impact global du SEN [64].

Pour les produits de fission et d'activation, la démarche de sélection a été réalisée en deux temps.

Une première phase a consisté à éliminer les radionucléides de période inférieure à 1 000 ans qui bénéficient de la décroissance radioactive dans la formation hôte. En effet, en partant du constat que les temps de transfert théoriques sont de l'ordre de quelques centaines de milliers d'années, soit a minima 100 fois la période de ces radionucléides, ces derniers ont une activité initiale qui a décliné au minimum de 30 ordres de grandeur environ, ce qui apparaît largement suffisant pour les rendre négligeables.

Une seconde étape a consisté à éliminer, parmi les radionucléides de période supérieure à 1 000 ans, ceux ne pouvant pas contribuer à l'impact. Pour cela, les éléments restants ont été groupés par classe de comportement géochimique similaire, ce qui permet de regrouper les radionucléides dont on s'attend à ce qu'ils migrent conjointement. Au sein de chaque groupe, ceux dont l'activité apparaît très faible ont été négligés (on a ainsi retenu le ^{99}Tc plutôt que le ^{98}Tc ou le ^{97}Tc qui sont en quantité plus faible). Un calcul complet sur l'ensemble des radionucléides de période supérieure à 1 000 ans a permis de valider a posteriori cette méthode [64], et de confirmer qu'elle ne conduisait pas à négliger un radionucléide important. En particulier, un grand nombre d'entre eux présente une très forte sorption dans les argilites, ce qui retarde et atténue encore plus fortement leur contribution (cas notamment de ^{137}La , ^{146}Sm , ^{150}Gd , ^{154}Dy , ^{176}Lu , ^{182}Hf , $^{186\text{m}}\text{Re}$, ^{208}Bi , $^{210\text{m}}\text{Bi}$).

Cette démarche a finalement conduit à retenir 15 radionucléides de période supérieure à 1 000 ans tous colis confondus pour le calcul d'impact du SEN ainsi que le niobium 93m (descendant du zirconium 93). Ils sont listés ci-après, les périodes de décroissance retenues sont cohérentes avec celles de la base de données JEF 2.2 [65] :

- ^{129}I	(forme anionique)	($T \cong 15\,700\,000$ ans)
- ^{107}Pd		($T \cong 6\,500\,000$ ans)
- ^{135}Cs		($T \cong 2\,300\,000$ ans)
- ^{10}Be		($T \cong 1\,600\,000$ ans)
- $^{93}\text{Zr} (\rightarrow ^{93}\text{Nb})$		($T_{\text{Zr}93\text{f}} \cong 1\,530\,000$ ans ; $T_{\text{Nb}93\text{m}} \cong 16,4$ ans)
- ^{36}Cl	(forme anionique)	($T \cong 302\,000$ ans)
- ^{99}Tc		($T \cong 213\,000$ ans)
- ^{41}Ca		($T \cong 103\,000$ ans)
- ^{126}Sn		($T \cong 100\,000$ ans)
- ^{59}Ni		($T \cong 75\,000$ ans)
- ^{79}Se	(forme anionique)	($T \cong 65\,000$ ans)
- ^{94}Nb		($T = 20\,300$ ans)
- ^{14}C	(forme anionique)	($T = 5\,730$ ans)
- ^{93}Mo	(forme anionique)	($T = 3\,500$ ans)
- ^{166}Ho		($T = 1\,200$ ans)

Le calcul d'impact a également été conduit pour quelques toxiques chimiques stables (bore, sélénium, nickel et antimoine), dans les mêmes conditions que pour les radionucléides. Dans ce cas, la décroissance radioactive n'intervient en général pas, sauf si le toxique considéré est aussi un radionucléide ou le descendant d'un radionucléide. Ces toxiques sont extraits de la liste des éléments dont l'identification est demandée couramment en entrée des centres de stockage (centres d'enfouissement techniques de classe 1), complétée par des toxiques plus spécifiques de l'industrie nucléaire. On a sélectionné des toxiques qui sont susceptibles d'être présents en quantité relativement importante dans les déchets HA et MA-VL.

5.3.2 Représentation des différents compartiments du calcul

5.3.2.1 Représentation des colis de déchets

Quatre scénarios de gestion du combustible ont été élaborés par l'Andra dans le cadre du modèle d'inventaire de dimensionnement (voir chapitre 2) de manière à couvrir différentes stratégies industrielles possibles. Dans le cadre du SEN, l'Andra a retenu de manière enveloppe le scénario le plus pénalisant, ou un des plus pénalisants, en terme d'inventaire quantitatif par colis type. Cette hypothèse de travail a conduit à se fonder sur l'inventaire S2 pour les combustibles usés, S1a pour les colis types (C3 + C4) et S1b pour les autres colis types.

Le calcul de référence s'effectue par regroupements de colis de déchets, pour éviter de trop nombreux cas de calculs. Il est conduit pour les types de colis suivants :

- les déchets B ne contenant pas de matière organique et ne dégageant pas d'hydrogène gazeux en phase d'exploitation du stockage. On a en effet fait l'hypothèse, pour le calcul, qu'ils puissent être stockés ensemble. Les alvéoles correspondantes sont dénommées sous-zone B1x dans la suite ;
- les déchets B ne contenant pas de matières organiques, mais pouvant présenter en exploitation des dégagements d'hydrogène. On nomme les alvéoles correspondantes sous-zone B1h ;
- les colis de déchets de boues bitumées, qui seront probablement stockés à part du fait de leurs caractéristiques propres ;
- les autres déchets B (hors B7 et B8) ;
- les verres C0 ;
- les verres C1 et C2, qui sont regroupés ;
- les verres C3 et C4, qui sont regroupés ;
- les combustibles usés CU1 ;
- les combustibles usés CU2 ;
- les combustibles usés CU3.

Compte tenu de leur très faible contribution totale à l'inventaire radiologique, les colis B7 (sources) sont négligés dans le calcul. Compte tenu de leurs caractéristiques (déchets contenant du radium, élément fortement sorbé dans le milieu naturel), on ne s'attend pas à ce que les déchets B8 contribuent à l'impact ; ils sont également négligés.

Les regroupements de colis, et les inventaires quantitatifs associés, sont rappelés dans le Tableau 5.3-1. Pour chaque regroupement, on a retenu sur la base du MID un inventaire radiologique moyen, hormis dans le cas des déchets vitrifiés pour lesquels on distingue les C2 des C1, et les C4 des C3.

Pour les études de sensibilité, on ne reconduit pas systématiquement la totalité de l'inventaire. En fonction des enseignements des résultats du calcul de référence, on retient les types de déchets les plus à même de répondre au besoin, au cas par cas.

Sous-zone de stockage regroupant des colis types ou des alvéoles types traitées dans les calculs*		Scénario de gestion	Nombre de colis
B1x*	Alvéole type regroupant les colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène gazeux (colis types B1/B5/B6 hors B5.1 et B6.4)	S1b	44 670
B1h*	Alvéole type regroupant les colis non organiques pouvant dégager de l'hydrogène gazeux (colis-types B3.1.1/B3.1.3/B3.2/B3.3.2/B4)	S1b	16 770
B2BB*	Alvéole type regroupant les colis organiques de boues bitumées (colis type B2)	S1b	105 010
Autres déchets B	Alvéole type regroupant les colis organiques autres que les boues bitumées (colis-types B3.1.2 / B3.3.1 / B3.3.3 / B3.3.4 / B5.1 / B6.4)	S1b	26 290
C0	Déchets vitrifiés « historiques »	S1b	4 120
C1 et C2	Déchets vitrifiés avec une « thermique actuelle » ou une « thermique future »	S1b	(4 640 C1 et 27 460 C2) 32 100
C3 et C4	Déchets vitrifiés issus d'un mélange de solution de produits de fissions de combustibles UO ₂ et MOX, et verre incorporant une faible quantité de Pu	S1a	(13 320 C3 et 13 250 C4) 26 570
CU1	Combustibles usés UO ₂	S2	13 500
CU2	Combustibles usés MOX	S2	4 000
CU3	Combustibles Recherche et Défense	/	5 810
*Alvéole type regroupant des sous colis types			

Tableau 5.3-1 *Sous-zones de stockage considérées dans les calculs et nombre global de colis considérés par sous-zone*

● Colis de déchets B

Modèle de relâchement des colis primaires de déchets B

Le stockage est supposé saturé dès sa fermeture et les compléments de colisage des déchets B sont supposés n'être pas étanches à l'eau ; le relâchement des toxiques par le déchet s'initie dès la fermeture du stockage du fait de cette hypothèse conventionnelle. Les modèles de relâchement et les valeurs retenues pour l'évaluation dépendent des types de déchets et du niveau de connaissance acquis.

Les déchets technologiques divers cimentés ou compactés (B3) ainsi que les déchets technologiques et de structure en vrac (B6), présentent un terme source immédiatement disponible à l'arrivée d'eau (que l'on qualifie de labile). Ce choix résulte principalement d'un manque de connaissance amenant à considérer un modèle de relâchement nécessairement pénalisant (cas des colis B6) mais peut également être associé au fait que la contamination apparaît essentiellement surfacique (cas des colis types B3).

Pour les autres colis, les modèles de relâchement et les paramètres associés sont choisis parmi les modèles disponibles à partir de :

- leur conformité aux expérimentations qui ont pu être réalisées pour les valider ;
- leur applicabilité à l'inventaire des déchets ;
- leur applicabilité aux conditions d'environnement en stockage ;
- leur capacité à prendre en compte les phénomènes potentiellement perturbateurs qui peuvent être néfastes pour la tenue des déchets.

Pour les déchets activés (B1), les déchets de structure cimentés (B4) ou compactés (B5), seuls les gaines en zircaloy (B4/B5 uniquement) et les déchets de structure présentent un niveau de caractérisation et de connaissance suffisant pour envisager un relâchement progressif des radionucléides qu'ils contiennent. Le relâchement des produits d'activation localisés dans les gaines ou les composants métalliques est supposé congruent à la vitesse de corrosion qui est estimée de façon conservative⁶³ de l'ordre de 10^{-5} an^{-1} (de 5.10^{-6} à $7.10^{-5} \text{ an}^{-1}$ selon le matériau et les déchets). Le reste des radionucléides est supposé labile. Une étude de sensibilité est réalisée en considérant un relâchement labile de l'activité contenue dans les gaines et dans les composants métalliques. Cette étude de sensibilité couvre largement toutes les incertitudes relatives aux risques de corrosion localisée par piqûre, aux caractéristiques variables des différents déchets ou à la présence éventuelle d'éléments oxydants issus de la radiolyse de l'eau. Le Tableau 5.3-2 et le Tableau 5.3-3 détaillent les valeurs de taux de relâchement retenues pour les colis types B1, B4 et B5.

	Calcul de référence	Calcul de sensibilité
Produits d'activation localisés dans les ressorts en inconel	$\tau_R = 5.10^{-6} \text{ an}^{-1}$	Activité totalement labile
Produits d'activation localisés dans les aciers en inox	$\tau_R = 4,5.10^{-5} \text{ an}^{-1}$	
Autres radionucléides	Activité labile	

Tableau 5.3-2 Modèle de relâchement retenu pour le colis type B1

	Calcul de référence	Calcul de sensibilité
Produits d'activation localisés dans le zircaloy	$\tau_R = 10^{-5} \text{ an}^{-1}$	Activité totalement labile
Produits d'activation localisés dans les ressorts en inox	$\tau_R = 7.10^{-5} \text{ an}^{-1}$	
Produits d'activation localisés dans les aciers en inox	$\tau_R = 1,5.10^{-5} \text{ an}^{-1}$	
Autres radionucléides	Activité labile	

Tableau 5.3-3 Modèle de relâchement retenu pour les colis types B4 et B5

Pour les boues bitumées (B2), la cinétique de relâchement est représentée par un modèle (Colonbo) développé à partir d'une phénoménologie validée expérimentalement dans la limite des possibilités de reproduction en laboratoire [66]. Il est fondé sur la reprise d'eau par le bitume et sur un comportement des radionucléides assimilés aux sels solubles de la matrice du bitume. Selon le niveau d'intégration des phénomènes dans le modèle, plusieurs sous-modèles peuvent être définis. Le cas retenu pour le calcul de référence est conservatif dans la mesure où il néglige :

- d'une part, l'insolubilisation dont les radionucléides ont fait l'objet lors du traitement des effluents ayant conduit à la constitution du colis de déchet. Les radionucléides sont en effet supposés associés aux sels solubles ;
- d'autre part, la diffusion des radionucléides au sein de la zone perméable de la matrice de bitume (le relâchement des radionucléides est congruent avec l'avancée du front de dissolution de la matrice).

Hormis l'hypothèse pessimiste selon laquelle existe un renouvellement important de l'eau au contact des colis, les paramètres du modèle (coefficient de diffusion apparent de l'eau dans le bitume, coefficient de diffusion effectif dans la zone perméable...) sont des valeurs « phénoménologiques ». Ils résultent d'expériences spécifiques de mesure des propriétés de transfert à travers la zone perméable [66]. Le taux de relâchement proposé est inversement proportionnel à la racine carrée du temps et conduit, en 10 000 ans, à un relâchement de l'ordre de 90 % de la masse initiale contenue dans les colis de bitume.

⁶³ Estimation conservative permettant notamment de prendre en compte les dégâts éventuels de l'irradiation, l'influence de la radiolyse de l'eau sur le processus de corrosion

Une étude de sensibilité est réalisée avec un modèle pénalisant qui couvre les incertitudes liées à l'évolution des colis (fluage, fissuration ...). Ce modèle s'affranchit des phénomènes de reprise d'eau par le bitume ; les radionucléides sont supposés associés aux sels solubles (hypothèses pénalisantes) et relâchés dès leur mise en solution. Ce modèle dépend donc de la solubilité de ces derniers et des flux d'eau transitant dans les alvéoles. Il conduit à un relâchement progressif (constant dans le temps) de la totalité de la masse sur 1 000 ans.

Le Tableau 5.3-4 détaille les valeurs de taux de relâchement retenues pour le colis type B2.

	Calcul de référence Modèle Colombo 3	Calcul de sensibilité
Ensemble des radionucléides	$\tau_R = \Lambda \frac{4,5 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{t}} \Lambda \text{ an}^{-1}$	$\tau_R = 10^{-3} \text{ an}^{-1}$

Tableau 5.3-4 *Modèle de relâchement retenu pour les colis de boues bitumées (B2)*

Représentation des fonctions du colisage en béton des colis de stockage

La dégradation du béton des colis est un processus extrêmement lent [67] qui permet d'imposer des conditions géochimiques favorables aux colis primaires de déchets B (notamment en terme de pH), conformément à l'exigence fonctionnelle, limitant ainsi leur dégradation. On n'a pas retenu pour les compléments de colisage des colis de déchets B de fonction nécessitant une tenue mécanique à long terme. De ce fait, le béton utilisé pour la conception des compléments de colisage ne joue pas de rôle hydraulique.

Les compléments de colisage des colis de stockage sont par conséquent représentés pour tous les colis de déchets B comme un environnement chimique homogène (ne se distinguant pas de celui de l'alvéole en béton) limitant les flux de radionucléides par des phénomènes de précipitation et de sorption. Les valeurs des paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique sont similaires à celles présentées dans le tableau ci-dessous.

$K = 1.10^{-6}$ m/s					
	Période [ans]	$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]
¹⁰ Be	1 600 000	0,3	6.10^{-10}	1	soluble
¹⁴ C	5 730	0,3	6.10^{-10}	3 500	1.10^{-2}
³⁶ Cl	302 000	0,3	6.10^{-10}	1	soluble
⁴¹ Ca	103 000	0,3	6.10^{-10}	3 500	20
⁵⁹ Ni	75 000	0,3	6.10^{-10}	14 000	$2,3.10^{-4}$
⁷⁹ Se	65 000	0,3	6.10^{-10}	700	$1,3.10^{-2}$
⁹³ Zr	1 530 000	0,3	6.10^{-10}	280 000	6.10^{-3}
⁹³ Mo	3 500	0,3	6.10^{-10}	1	7.10^{-4}
^{93m} Nb	16,4	0,3	6.10^{-10}	70 000	$2,4.10^{-4}$
⁹⁴ Nb	20 300	0,3	6.10^{-10}	70 000	$2,4.10^{-4}$
⁹⁹ Tc	213 000	0,3	6.10^{-10}	1	Soluble
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	0,3	6.10^{-10}	4 200	1.10^{-2}
¹²⁶ Sn	100 000	0,3	6.10^{-10}	70 000	3.10^{-5}
¹²⁹ I	15 700 000	0,3	6.10^{-10}	8	soluble
^{166m} Ho	1 200	0,3	6.10^{-10}	700 000	2.10^{-3}
¹³⁵ Cs	2 300 000	0,3	6.10^{-10}	71	soluble

Tableau 5.3-5 Valeurs des paramètres de transport et de rétention chimique dans le béton des colis de déchets B – calcul de référence

On étudie l'intérêt d'attribuer, à terme, des propriétés hydrauliques à certains compléments de colisage. Ceci pourrait concerner les colis de déchets B présentant un contenu radiologique plus élevé et dégageant peu d'hydrogène (notamment les déchets type B5.2. et B1). Cette variante est envisagée à titre exploratoire car elle présente encore des incertitudes notamment sur sa tenue mécanique à long terme. On la considère en étude de sensibilité du SEN. Dans ce cas, les compléments de colisage des colis sont représentés comme un milieu poreux homogène ; en plus des performances géochimiques déjà retenues en référence, la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » est également assurée par un transport par diffusion / convection avec un coefficient de diffusion de 2.10^{-13} m²/s, une porosité accessible à la diffusion de 10 % et une perméabilité de 10^{-13} m/s.

● Colis de déchets C vitrifiés

Retard à l'arrivée d'eau de 4 000 ans sur le verre assuré par le surconteneur

Le dimensionnement des surconteneurs est prévu pour être d'un ordre de grandeur millénaire, avec des marges permettant de couvrir les incertitudes chimiques, mécaniques et radiologiques (voir chapitre 6). Des évaluations dans des conditions conservatives cohérentes avec la définition du scénario d'évolution normale (resaturation immédiate du stockage), prenant en compte les dispositions de conception retenues (notamment la protection du conteneur lors de l'exploitation, par une fermeture provisoire de l'alvéole) et retenant des vitesses de corrosion conservatives, conduisent à une évaluation de sa durée d'étanchéité de 4 000 ans [68], ce qui se traduit par une absence de relâchement par la matrice durant cette période.

Ne pouvant exclure des problèmes de contrôle qualité au niveau des surconteneurs de déchets C réalisés en grand nombre, des défaillances initiales sont considérées dans le cas de référence. La conception du surconteneur se caractérise par une grande robustesse vis-à-vis de possibles défauts de fabrication (voir une présentation de ce point au chapitre 6, paragraphe 6.2.12.2). Dans ce contexte, et dans la mesure où les études détaillées sur la fabrication de tels objets sont prématurées, la définition des possibles défauts revêt nécessairement un caractère arbitraire. Néanmoins, compte tenu à la fois

des contrôles qu'il serait possible de mettre en place sur la fabrication des surconteneurs et du caractère relativement simple de leur conception, on peut considérer que l'expression d'un défaut immédiatement après la mise en stockage est peu vraisemblable et que seuls quelques surconteneurs seraient concernés par une défaillance aléatoire. En effet, les probabilités de ce type de défaut généralement considérées dans l'industrie nucléaire sont de un pour dix mille à un pour cent mille. Les surconteneurs sont présents dans le stockage en un nombre qui dépend du scénario de gestion et de retraitement des combustibles usés, mais qui s'élève à un peu plus de 50 000 colis. On s'attend donc au plus à quelques unités de colis défaillants.

Pour le calcul de référence du scénario d'évolution normale, il est fait l'hypothèse de trois surconteneurs défaillants, un dans chaque regroupement de colis. Un surconteneur défaillant est représenté conventionnellement par une perte d'étanchéité totale à une date de l'ordre du siècle après la fermeture du stockage⁶⁴, cette durée minimale étant une évaluation très pénalisante par rapport au temps qu'il faudrait pour qu'au moins un peu d'eau parvienne jusqu'au déchet en traversant le conteneur primaire. On verra lors de la discussion des résultats du calcul que ceux-ci ne sont que très peu dépendants du nombre exact de surconteneurs défaillants, et sont donc peu sensibles au taux de défaillance retenu.

On retient en conclusion un relâchement prématuré, après 200 ans de décroissance radioactive des déchets :

- d'un surconteneur de colis type C0 ;
- d'un surconteneur de colis type C2 pour la sous zone de stockage traitant les colis types C1/C2 ;
- d'un surconteneur de colis type C4 pour la sous zone de stockage traitant les colis types C3/C4.

La prise en compte de colis défaillants induit un relâchement et une migration de radionucléides dans un milieu à forte charge thermique et fort gradient de température. L'effet de la thermique sur les modèles et les paramètres de relâchement et de transport est pris en compte pour l'ensemble des composants.

Pour les raisons évoquées précédemment, un tel relâchement anticipé est en principe incompatible avec l'existence d'une pression hydraulique induite par les gaz au sein du stockage. On a cependant traité en étude de sensibilité le cas où le relâchement se produit en présence de gradients hydrauliques forts dus aux gaz, persistant pendant 10 000 ans. Cette étude de sensibilité est conduite sur le cas des combustibles usés, mais ses résultats sont extrapolables aux déchets vitrifiés.

On note également que des hypothèses de défaillances de colis plus drastiques sont traitées en scénario d'évolution altérée (voir chapitre 7).

Cinétique de relâchement des colis de déchets C vitrifiés

Le relâchement des radionucléides s'initie dès la perte d'étanchéité du surconteneur. Les modèles de relâchement et les paramètres associés diffèrent selon les colis types ; ils sont choisis parmi les modèles disponibles à partir de :

- leur conformité aux expérimentations qui ont pu être réalisées pour les valider ;
- leur applicabilité aux conditions d'environnement en stockage ;
- leur capacité à prendre en compte les phénomènes potentiellement perturbateurs qui peuvent être néfastes pour le comportement des déchets.

⁶⁴ Pour les besoins du calcul, on raisonne en termes de temps de décroissance des radionucléides. En prenant en compte le temps d'entreposage préalable des déchets, on a retenu 200 ans de décroissance.

Les colis peuvent :

- suivre un modèle fondé sur la vitesse de dissolution initiale du verre et la surface d'échange offerte par ce dernier (modèle $V_0.S$). Ce modèle conservatif est notamment retenu (avec des paramètres phénoménologiques pour la surface offerte à l'eau et la vitesse de dissolution) pour les verres C0 ; il conduit à des durées de relâchement de quelques centaines à quelques milliers d'années en fonction des colis considérés ;
- correspondre à un modèle phénoménologique ($V_0.S \rightarrow V_r$) comprenant deux phases. Dans un premier temps, le modèle est fondé sur la vitesse de dissolution initiale jusqu'à saturation en silice du milieu environnant ($V_0.S$). Dans un deuxième temps, la cinétique de dissolution décroît jusqu'à une vitesse résiduelle (V_r) [66]. Le transitoire de faible durée n'est pas représenté. Ce modèle conduit à des durées de relâchement de l'ordre de quelques centaines de milliers d'années. Par ailleurs, même si l'existence de la vitesse V_r est avérée, la phénoménologie qui lui est associée fait l'objet de débats. Aussi, par prudence, une étude de sensibilité a été réalisée en ne retenant que le modèle $V_0.S$.

● Colis de combustibles usés

Retard à l'arrivée d'eau de 10 000 ans sur les combustibles assuré par le conteneur

Les évaluations conduites dans les mêmes conditions que pour les surconteneurs de déchets vitrifiés (voir précédemment) montrent que la durée de vie des conteneurs de combustibles usés est supérieure à 10 000 ans. Pour le calcul, on a retenu une valeur arrondie basse de 10 000 ans pour la durée d'étanchéité du conteneur combustibles usés, durée qui se caractérise par une absence de relâchement. Dans le cas particulier des combustibles de Recherche et de Défense (CU3), qui sont supposés stockés dans le même type d'alvéoles que les déchets vitrifiés, la durée d'étanchéité du conteneur a été considérée égale à 4 000 ans

Les conteneurs sont au nombre de 17 500 dans le calcul. En retenant un taux de défaillance compris entre un pour dix mille et un pour cent mille, dans la même logique que celle suivie pour les déchets C, on considère pour le calcul de référence du scénario d'évolution normale la présence de deux conteneurs défaillants présentant une perte d'étanchéité après 200 ans de décroissance des radionucléides, un pour les combustibles CU1 et un pour les combustibles CU2. On verra que le résultat des études montre que l'impact est peu sensible au taux de défaillance exact retenu. Le SEA « défaut de colis » (chapitre 7) permet d'envisager des taux beaucoup plus drastiques.

On prend en compte dans le calcul les conditions thermiques prévalant au moment du relâchement. En étude de sensibilité, on suppose de plus que le relâchement du colis défaillant se produit pendant qu'il existe au sein du stockage une surpression induite par les gaz de corrosion, et que celle-ci dure 10 000 ans. On a vu précédemment que l'existence de cette surpression est en principe incompatible avec un relâchement de radionucléides. Il s'agit ici de couvrir de manière conventionnelle toute incertitude sur ce dernier point.

Cinétique de relâchement des combustibles usés

Le relâchement des radionucléides s'initie dès la perte d'étanchéité du conteneur. À cette date, les produits de corrosion du conteneur ou le reste du surconteneur lui-même n'assurent plus aucun confinement et les alvéoles de stockage sont supposées totalement saturées.

Pour les combustibles usés CU1 et CU2, le modèle de relâchement est fonction de la localisation des radionucléides au sein des sous-ensembles physico-chimiques du déchet ; pour les radionucléides contenus dans la matrice, ce dernier dépend également du taux de combustion des types de combustibles considérés (UOx2, UOx3 et URE). Globalement, on distingue :

- un modèle de relâchement progressif des radionucléides contenus dans les composants métalliques. Le relâchement, supposé congruent à la vitesse de corrosion des composants, conduit à des taux de l'ordre de $5.10^{-5} \text{ an}^{-1}$ pour les radionucléides contenus dans les gaines

(les radionucléides contenus dans la zircone en surface des gaines sont considérés labiles) à $2.10^{-3} \text{ an}^{-1}$ pour les radionucléides contenus dans les éléments de structure en inconel ;

- un modèle de dissolution radiolytique de la matrice de combustibles. Le modèle retenu pour les calculs intègre de manière pénalisante l'effet de la diffusion accélérée par auto-irradiation alpha (D3AI) ; il conduit alors à un relâchement progressif des radionucléides localisés au sein de la matrice sur 50 000 ans environ ;
- une fraction labile, qui correspond :
 - ✓ aux radionucléides contenus dans la pastille au niveau des joints de grains, des fissures et des vides au sein des crayons pour les combustibles UOx ou au niveau des amas de Pu pour les MOX. Elle dépend essentiellement du taux de combustion ;
 - ✓ au phénomène de diffusion accélérée par auto irradiation alpha (D3AI) au niveau de la matrice du combustible. Ce phénomène, couplé à la dissolution radiolytique, rend compte de l'effet possible de la décroissance alpha. Pour les calculs, il a été retenu un relâchement labile de 5 % de l'activité contenue dans la matrice du combustible. On considère en sensibilité que la D3AI concerne 15 % de l'activité de la matrice ;
 - ✓ aux radionucléides contenus dans la zircone.

Une étude de sensibilité est conduite pour couvrir des incertitudes résiduelles sur :

- la cinétique de dissolution radiolytique, en particulier la surface spécifique offerte aux grains, l'effet de la température et le taux de combustion. Cela consiste à prendre en compte un taux de combustion conservatif et à multiplier par 10 les vitesses de dissolution obtenues avec ce taux de combustion. Dans ce cas, les durées de relâchement associées à la dissolution radiolytique sont de quelques milliers d'années ;
- le pourcentage d'activité labile de la matrice. On prend alors en compte des pourcentages d'activité labile conservatifs définis dans les tableaux suivants (Tableau 5.3-7 à Tableau 5.3-9).

Pour prendre en compte l'hypothèse d'un effet inhibiteur de l'hydrogène gazeux sur la dissolution radiolytique, une étude de sensibilité est réalisée prenant en compte un modèle alternatif ; ce dernier est non plus fondé sur la dissolution radiolytique, mais sur la dissolution classique du combustible utilisé. Le modèle de dissolution classique est piloté par la solubilité de l'uranium, considérée égale à $7.10^{-7} \text{ mol/m}^3$.

Pour les combustibles usés CU3, les données disponibles à ce jour ne permettent pas de distribuer l'inventaire total au sein des différents sous-ensembles physico-chimiques et de définir pour chacun d'eux un modèle de relâchement. En conséquence et compte tenu de leur inventaire total relativement limité par rapport celui des autres combustibles usés, il a été fait le choix pénalisant de considérer toute l'activité immédiatement labile après la perte d'étanchéité du conteneur.

Les valeurs de paramètres retenus pour chaque colis type sont détaillées dans les tableaux ci-après (Tableau 5.3-7 à Tableau 5.3-9).

	Calcul de référence
Produits d'activation localisés dans le zircaloy (80 % de l'activité des gaines)	$\tau_R = 5.10^{-5} \text{ an}^{-1}$
Produits d'activation localisés dans la zircone (20 % de l'activité des gaines)	Activité labile
Produits d'activation localisés dans les structures en aciers inoxydables	$\tau_R = 4.10^{-4} \text{ an}^{-1}$
Produits d'activation localisés dans les structures en inconel	$\tau_R = 2.10^{-3} \text{ an}^{-1}$

Tableau 5.3-6 *Modèle de relâchement des produits d'activation localisés dans les composants métalliques pour les colis types CU1 et CU2*

		Calcul de référence	Calcul de sensibilité
Radionucléides contenus dans le gap, le rim et les joints des grains (y compris D3AI) de la matrice		Activité labile	
Pourcentage d'activité labile de la matrice	³⁶ Cl, ⁷⁹ Se, ¹²⁶ Sn, ^{135,137} Cs.	7,1 %	22,8 %*
	¹⁴ C	15 % (conservatif)	25 %*
	Autres radionucléides	6,8 %	20,4 %*
Reste des radionucléides contenus dans les grains de la matrice relâchés selon le modèle de dissolution radiolytique		$\tau_{R_réf.} = f(t ; TC)**$	$\tau_{R_Sensibilité} = 10^* \tau_{R_TCmax}$ ***
<p>* : dans le cas des colis défaillants la fraction d'activité labile corrélée à la D3AI est plus faible de 10 %</p> <p>** : Voir détail de la formule dans [67]</p> <p>*** : une étude de sensibilité est également menée en considérant, toutes choses étant égales par ailleurs, un modèle de dissolution classique.</p> <p>TC : Taux de combustion de 45 GWj/t en référence et 50GWj/t en sensibilité</p>			

Tableau 5.3-7 Modèle de relâchement des radionucléides de la matrice de combustibles usés - colis types CU1 (UOx2)

		Calcul de référence	Calcul de sensibilité
Radionucléides contenus dans le gap, le rim et les joints des grains (y compris D3AI) de la matrice		Activité labile	
Pourcentage d'activité labile de la matrice	³⁶ Cl, ⁷⁹ Se, ¹²⁶ Sn, ^{135,137} Cs.	12,3 %	30,1 %*
	¹⁴ C	15 % (conservatif)	25 %*
	Autres radionucléides	9,9 %	25,2 %*
Reste des radionucléides contenus dans les grains de la matrice relâchés selon le modèle de dissolution radiolytique		Idem CU1 UOx2 hormis TC _{UOx3} = 55 GWj/t en référence et TC _{UOx3} = 60 GWj/t en sensibilité	
* : dans le cas des colis défaillants la fraction d'activité labile corrélée à la D3AI est plus faible de 10 %			

Tableau 5.3-8 Modèle de relâchement des radionucléides de la matrice de combustibles usés - colis types CU1 (UOx3 et URE)

		Calcul de référence	Calcul de sensibilité
Radionucléides contenus dans le gap, le rim et les joints des grains (y compris D3AI) de la matrice		Activité labile	
Pourcentage d'activité labile de la matrice	³⁶ Cl, ⁷⁹ Se, ¹²⁶ Sn, ^{135,137} Cs.	38,9 %	77,1 %*
	¹⁴ C	15 % (conservatif)	25 %*
	Autres radionucléides	35 %	65 %*
Reste des radionucléides contenus dans les grains de la matrice relâchés selon le modèle de dissolution radiolytique		Idem CU1 UOx2 hormis TC = 48GWj/t en référence et TC = 53 GWj/t en sensibilité	
* : dans le cas des colis défaillants la fraction d'activité labile corrélée à la D3AI est plus faible de 10 %			

Tableau 5.3-9 Modèle de relâchement des radionucléides de la matrice de combustibles usés - colis types CU2

5.3.2.2 Représentation des ouvrages de stockage

● Représentation d'ensemble des alvéoles

On rappelle que le calcul s'effectue par zone de stockage. Des calculs préparatoires ont permis de mettre en évidence d'une part qu'il n'y a pas d'influence hydraulique d'un module sur un autre du fait de l'efficacité des scellements, d'autre part que le transport des radionucléides via le système de galeries horizontales est négligeable. Ainsi, si tous les modules de stockage sont représentés dans chaque zone de stockage, les infrastructures de liaison situées entre chacun d'eux (galeries de liaison secondaires) ne sont en revanche pas modélisées.

● Représentation du Callovo-Oxfordien perturbé à proximité des ouvrages de stockage

L'excavation de la roche, la réalisation des ouvrages et la mise en stockage des colis de déchets engendrent des perturbations de l'argilite d'ordre thermique, hydraulique, mécanique et chimique dans le champ proche des ouvrages de stockage. Ces perturbations peuvent, dans certains cas, influencer sur les propriétés du Callovo-Oxfordien vis-à-vis du confinement des radionucléides dans le champ proche ou à l'échelle du stockage. Dans la plupart des cas, leur effet est maîtrisé par la mise en oeuvre de dispositions conceptuelles adaptées. Dans les circonstances où ce n'est pas le cas (par exemple, en cas de défaillance de conteneur), on représente leurs effets de manière conservative.

D'un point de vue thermique, l'élévation de température dans le milieu résultant de la mise en stockage des déchets exothermiques ne devrait pas engendrer, par conception, une température excédant 90 °C dans le Callovo-Oxfordien et dans les ouvrages. La température descend sous la valeur de 70 °C après 1 000 ans. À ces niveaux de température et pour ces durées, le Callovo-Oxfordien ne subirait aucune transformation minéralogique irréversible significative. Seuls les paramètres de transport et de rétention chimique évoluent avec le champ de température. Cela est pris en compte par le choix des valeurs (voir paragraphe 5.3.2.3).

D'un point de vue mécanique, l'extension et la géométrie de l'EDZ sont proportionnelles au rayon du diamètre excavé et dépendent de la profondeur et de l'orientation de l'ouvrage.

En cohérence avec la démarche exposée au paragraphe 5.3.1.2, le modèle de sûreté retenu est celui évalué à l'endroit le plus pénalisant sur la zone de transposition, c'est-à-dire à 630 mètres de profondeur, profondeur maximum possible pour un éventuel stockage au sein de la zone de transposition.

Le modèle est considéré conservatif, tant en terme d'extension (car évalué à partir des valeurs inférieures de résistances mécaniques obtenues sur échantillons de tailles centimétriques) que de performances hydrauliques [17].

La Figure 5.3-3 présente les extensions d'EDZ calculées à la profondeur du laboratoire de Meuse / Haute-Marne et à la profondeur maximale, pour les différents horizons géomécaniques. Le scellement de puits serait installé dans l'horizon A, et les galeries et alvéoles de stockage se trouveraient dans l'horizon C.

Zone géomécanique	Profondeur de référence (stockage à 500 m)		Profondeur maximale sur la zone de transposition (stockage à 630 m)	
	Ouvrages orientés parallèlement à σ_H (N 155°)	Ouvrages orientés : - parallèlement à σ_n (N 65°) (galeries) - verticaux (puits)	Ouvrages orientés parallèlement à σ_H (N 155°) (alvéoles de stockage, zones de scellement)	Ouvrages orientés : - parallèlement à σ_n (N 65°) (galeries) - verticaux (puits)
Zone A Exemple de la niche expérimentale du laboratoire de recherche Epaisseur \approx 40 m	0,1 R	0 à 0,3 R	0,3 R	0,2 à 0,7 R
Zone B Epaisseur \approx 15 m	0,3 R	0,1 à 0,5 R 0 à 0,1 R	0,5 R	0,3 à 1,0 R 0 à 0,2 R
Zone C Zone d'implantation d'un stockage Epaisseur \approx 40 m	0,5 R	0,3 à 0,7 R 0 à 0,1 R	0,7 R 0,1 R	0,5 à 1,2 R 0 à 0,3 R

Zone fracturée
 Zone microfissurée
 Argilites saines
 σ_H : contrainte horizontale majeure
 σ_h : contrainte horizontale mineure

Figure 5.3-3

Extension de l'EDZ en fonction de la profondeur et de l'orientation du stockage

La logique a consisté à retenir, pour les extensions de zone endommagée, celles correspondant à la position du stockage à 630 mètres, en tenant compte de l'orientation des ouvrages, c'est-à-dire :

- pour les alvéoles et pour les portions de galeries qui contiennent les scellements, une extension de 0,1 fois le rayon de l'ouvrage (0,1.R) pour la zone fracturée et 0,7.R pour la zone microfissurée. Dans les cas des alvéoles de déchets C, compte tenu de leur faible diamètre, cela revient à négliger la présence de la zone fracturée dont l'extension n'est pas significative ;
- pour les galeries courantes, une extension isotrope (par simplification) correspondant à 0,3.R pour la zone fracturée et 1,2.R pour la zone microfissurée ;
- pour la portion de puits qui accueille le scellement, on ne retient pas de zone fracturée (conformément à ce que permet de prévoir le modèle pour l'horizon A, et en accord avec les premières observations pratiquées dans le puits du laboratoire de Meuse / Haute-Marne). La zone microfissurée prévue par le modèle est quant à elle comprise entre 0,2.R et 0,7.R. Pour assurer une continuité avec les ouvrages en galerie et en base du puits, on a cependant fait le choix de retenir une valeur d'extension de 1,2.R, ce qui est conservatif car ce choix réduit les performances du scellement de puits.

D'un point de vue chimique, les principales sources de perturbations sont les matériaux cimentaires et les composants métalliques qui, lorsqu'ils se dégradent (ou se corrodent), peuvent engendrer une modification de la minéralogie du Callovo-Oxfordien et influencer sur les propriétés chimiques, hydrauliques et de transport.

La perturbation alcaline est un processus qui s'organise dans les argilites suivant deux fronts principaux depuis la paroi des ouvrages. Ils délimitent trois zones : une zone fortement reminéralisée présentant une chimie des eaux interstitielles proche de celle des bétons et une perméabilité intermédiaire entre celle du remblai et celle de la zone microfissurée, une zone peu perturbée caractérisée par une dissolution limitée des phases argileuses initiales et une chimie des eaux proche de celle des argilites, et les argilites saines [69]. L'ensemble des évaluations menées à ce jour sur l'extension de la perturbation alcaline à partir de codes couplés chimie / transport (PHREEQC), sur la base d'hypothèses « conservatives » ou « pénalisantes », indique des valeurs d'ordre décimétrique

pour la zone fortement reminéralisée à métrique pour la zone peu perturbée, pour des durées de plusieurs centaines de milliers d'années.

Par ailleurs, la perturbation éventuelle du Callovo-Oxfordien par les produits de corrosion est limitée à quelques centimètres.

L'extension de l'ensemble des perturbations chimiques est limitée au regard de l'épaisseur totale de Callovo-Oxfordien sain (50 mètres au minimum de part et d'autre des ouvrages) ; par ailleurs, elle n'excède pas l'épaisseur de zone fracturée qui est interceptée par les coupures hydrauliques des scellements. Dans le calcul d'ensemble, la zone perturbée chimiquement n'est donc pas représentée spécifiquement mais assimilée à la zone fracturée. L'effet des perturbations chimiques sur la zone fracturée est peu connu ; on suppose en référence, compte tenu des caractéristiques déjà conservatives retenues pour cette zone, que la perturbation alcaline ne les aggrave pas. Une étude de sensibilité spécifique permet de prendre en compte une situation plus défavorable (perméabilité de 10^{-6} m/s, aucune propriété géochimique).

Le Tableau 5.3-10 présente les valeurs de paramètres hydrauliques, de transport et de rétention dans les zones microfissurées et fracturée pour le calcul de référence. Comme dans le Callovo-Oxfordien (voir paragraphe 5.3.2.3), on prend en compte l'effet de la température sur la rétention chimique du calcium et du béryllium en appliquant un facteur correctif de 0,1 sur la valeur du coefficient de partage de ces éléments tant que l'élévation de température du milieu est supérieure à 20 °C Ainsi, deux valeurs de coefficient de retard sont définies et présentées dans le Tableau 5.3-10. De même, la sorption du césium est représentée (voir paragraphe 5.3.2.3) par une isotherme de Langmuir.

	Période [ans]	Zone microfissurée K = 5.10^{-11} m/s				Zone fracturée K = 5.10^{-9} m/s			
		$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]	$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]
¹⁰ Be	1 600 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	31 900	10^{-2}	0,2	5.10^{-10}	29 000	10^{-2}
¹⁰ Be (deltaT>20)	1 600 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	3 200	10^{-2}	0,2	5.10^{-10}	2 900	10^{-2}
¹⁴ C	5 730	0,05	5.10^{-12}	5,6	2,3	0,15	1.10^{-11}	2,5	2,3
³⁶ Cl	302 000	0,05	5.10^{-12}	1	soluble	0,15	1.10^{-11}	1	soluble
⁴¹ Ca	103 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	16	2,3	0,2	5.10^{-10}	15	2,3
⁴¹ Ca (deltaT>20)	103 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	3	2,3	0,2	5.10^{-10}	2,4	2,3
⁵⁹ Ni	75 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	2 050	5.10^{-2}	0,2	5.10^{-10}	1 800	5.10^{-2}
⁷⁹ Se	65 000	0,05	5.10^{-12}	1	5.10^{-7}	0,15	1.10^{-11}	1	5.10^{-7}
⁹³ Zr	1 530 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	12 800	2.10^{-5}	0,2	5.10^{-10}	12 000	2.10^{-5}
⁹³ Mo	3 500	0,05	5.10^{-12}	139	1.10^{-5}	0,15	1.10^{-11}	47	1.10^{-5}
^{93m} Nb	16,4	0,05	5.10^{-12}	53 400	2.10^{-4}	0,15	1.10^{-11}	18 000	2.10^{-4}
⁹⁴ Nb	20 300	0,05	5.10^{-12}	53 400	2.10^{-4}	0,15	1.10^{-11}	18 000	2.10^{-4}
⁹⁹ Tc	213 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	128 000	4.10^{-6}	0,2	5.10^{-10}	120 000	4.10^{-6}
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	8 950	4.10^{-4}	0,2	5.10^{-10}	8 100	4.10^{-4}
¹²⁶ Sn	100 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	179 000	1.10^{-5}	0,2	5.10^{-10}	160 000	1.10^{-5}
¹²⁹ I	15 700 000	0,05	5.10^{-12}	1	soluble	0,15	1.10^{-11}	1	soluble
^{166m} Ho	1 200	0,18	$2,5.10^{-10}$	639 000	1.10^{-4}	0,2	5.10^{-10}	580 000	1.10^{-4}
¹³⁵ Cs	2 300 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	Langmuir*	soluble	0,2	5.10^{-10}	Langmuir*	soluble

*Langmuir : $K_d = (1,8462.10^{-7}/(4,7552.10^{-7} + C_{eq}) - C_{eq})$; concentration en solution (mol/l)

Tableau 5.3-10

Valeurs des paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique dans les zones fracturées et microfissurées – calcul de référence

● **Alvéoles de déchets B**

Une fois relâchés par les colis de déchets, les radionucléides migrent dans le béton de l'alvéole pour atteindre le Callovo-Oxfordien ou le bouchon d'alvéole argileux en tête de galerie de stockage.

Le corps de l'alvéole en béton

La dégradation du béton des alvéoles est un processus lent, radial et convergent depuis le Callovo-Oxfordien vers le centre de l'alvéole compte tenu de l'efficacité des bouchons qui limitent l'arrivée d'eau par le système de galeries [67]. L'état de dégradation chimique totale de l'alvéole, estimé dans des conditions pénalisantes de flux d'eau, ne serait atteint qu'au bout de plusieurs dizaines de milliers d'années. L'élévation de température du béton induite par les déchets de coques et embouts compactés légèrement exothermiques a un effet limité sur la dégradation du béton (la phase thermique coïncidant avec une phase non ou très peu saturée).

En revanche, le volume de l'alvéole et les vides résiduels, mêmes faibles, ne permettent pas de garantir de faibles valeurs de perméabilité et de coefficient de diffusion. Par ailleurs, il subsiste encore des incertitudes sur l'impact de la corrosion des armatures métalliques du soutènement et sur l'évolution des sollicitations mécaniques des terrains à moyen et long terme. Ces deux phénomènes pourraient conduire à une fissuration ou une fracturation localisée du soutènement ou du revêtement. La compréhension actuelle de l'évolution de l'alvéole conduit à être prudent sur les performances hydrauliques et de transport de l'alvéole de déchets.

Ainsi, le béton de l'alvéole est considéré comme un environnement homogène n'assurant qu'un confinement chimique en limitant les flux de toxiques par les phénomènes de précipitation (fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage ») et de sorption (fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »). La perméabilité présente une valeur élevée de 10^{-6} m/s. Les valeurs de coefficient de diffusion et de porosité accessible à la diffusion sont respectivement de 6.10^{-10} m²/s et de 30 %. Les valeurs des paramètres de rétention chimique sont fournies dans le Tableau 5.3-5. Ces valeurs sont retenues pour le béton des alvéoles de tous les déchets B, hormis pour les colis types de déchets pouvant relâcher entre autres, des produits de dégradation celluloseux. Ces colis sont inclus dans ceux regroupés sous le vocable de « autres déchets B » dans le Tableau 5.3-1. Pour ces derniers, on considère des valeurs pénalisantes de rétention chimique de manière à prendre en compte les incertitudes associées à l'effet potentiellement préjudiciable des produits de dégradation sur les capacités de rétention du béton.

Une étude de sensibilité est réalisée en considérant des paramètres de rétention chimique conservatifs dans le corps en béton de l'alvéole de déchets B. Cette étude est menée à titre illustratif pour les colis types stockés dans les alvéoles B1x ; elle est combinée à la sensibilité aux paramètres de transport et de rétention chimique dans la formation hôte (voir paragraphe 5.3.2.3).

Le scellement d'alvéole

Le scellement d'alvéole est représenté comme un milieu poreux homogène continu. Cela résulte à la fois de sa resaturation rapide, qui comble les vides entre les briques de bentonite, et de l'extension limitée des perturbations chimiques (qui peuvent s'étendre sur quelques centimètres – pour la perturbation fer-argile - et jusqu'à quelques dizaines de centimètres – pour la perturbation alcaline dans la bentonite – mais qui ne remettent pas en cause le dimensionnement du scellement). On considère dans le calcul de référence une migration des radionucléides dans le scellement d'alvéole par diffusion/convection, et un confinement chimique par les phénomènes de sorption et de précipitation (voir Figure 5.3-4). Compte tenu du niveau de connaissance atteint, les valeurs des paramètres de transport et de rétention chimiques sont considérées comme phénoménologiques dans le calcul de référence. Elles sont présentées dans le Tableau 5.3-11. Comme dans le Callovo-Oxfordien (voir paragraphe 5.3.2.3), on prend en compte l'effet de la température sur la rétention chimique du calcium et du béryllium en appliquant un facteur correctif de 0,1 sur la valeur du coefficient de partage de ces éléments tant que l'élévation de température du milieu est supérieure à 20 °C [21]. Ainsi, deux valeurs de coefficient de retard sont définies et présentées dans le Tableau 5.3-11.

Une étude de sensibilité est réalisée en considérant des paramètres conservatifs de transport et de rétention géochimique dans le bouchon en bentonite. Cette étude est couplée à la sensibilité aux paramètres de transport et de rétention chimiques dans le corps de l'alvéole en béton et dans la formation hôte (voir paragraphe 5.3.2.3).

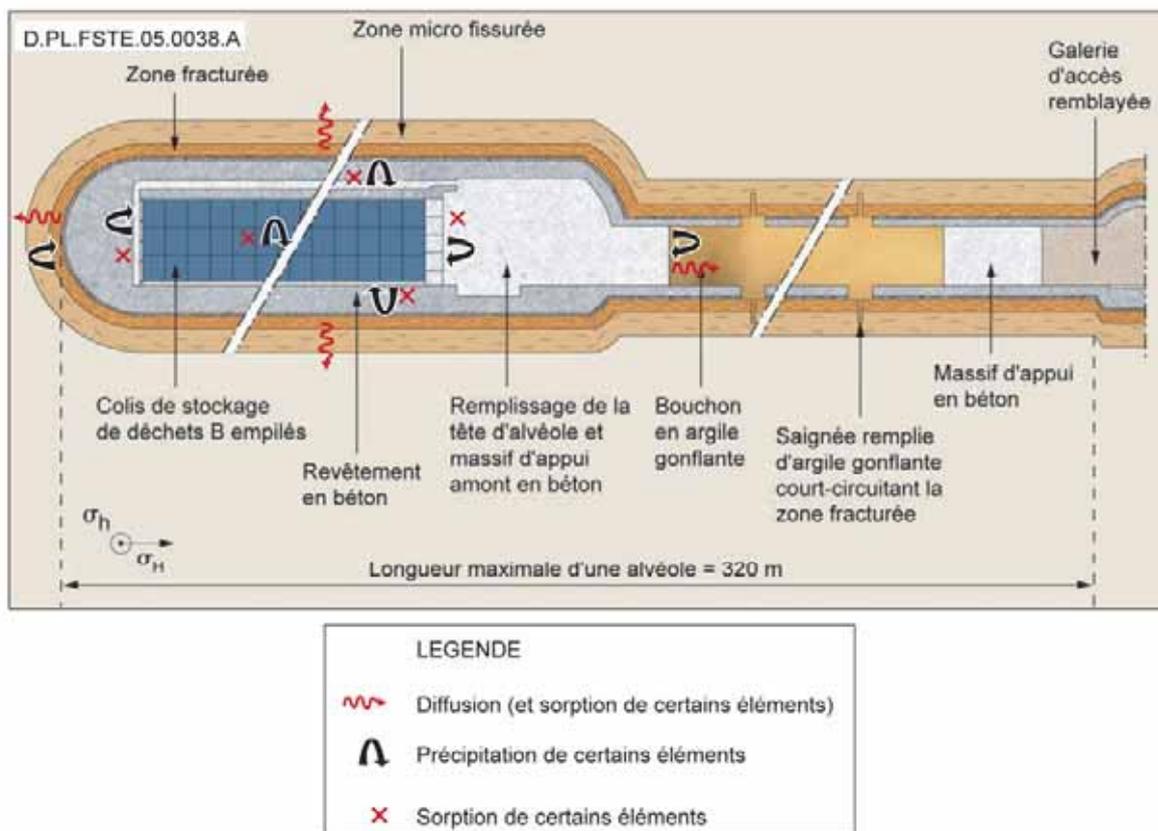


Figure 5.3-4 Représentation des alvéoles de déchets B et des caractéristiques de confinement mobilisées

Pour la perméabilité de la bentonite, la valeur retenue correspond à la perméabilité équivalente d'un scellement à base d'argile issue de l'essai TSX, réalisé à l'échelle 1 et mené en laboratoire souterrain au Canada [43]. La perméabilité équivalente calculée à partir des flux d'eau circulant dans la galerie et des gradients de charges imposés est de 10^{-11} m/s. Différents tests indiquent néanmoins que le chemin préférentiel se situe à l'interface du scellement et de la roche, et que le corps du scellement présente en fait des propriétés meilleures. Il est à noter que les valeurs présentées dans la littérature ou obtenues expérimentalement à d'autres densités sont généralement inférieures à 10^{-13} m/s.

Par prudence, l'Andra a cependant retenu pour la perméabilité du noyau de scellement la valeur de 10^{-11} m/s, ce qui est conservatif puisque cela consiste à assimiler la perméabilité du matériau à la perméabilité équivalente du dispositif de scellement, interfaces comprises. Ce choix de représentation conduit à une performance globale du scellement inférieure à ce qui paraît atteignable compte tenu du retour d'expérience de l'expérimentation TSX.

$K = 1.10^{-11}$ m/s					
	Période [ans]	$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]
¹⁰ Be	1 600 000	0,36	5.10^{-10}	973	10^{-2}
¹⁰ Be (deltaT>20)	1 600 000	0,36	5.10^{-10}	98	10^{-2}
¹⁴ C	5 730	0,05	5.10^{-12}	1	2,3
³⁶ Cl	302 000	0,05	5.10^{-12}	1	soluble
⁴¹ Ca	103 000	0,36	5.10^{-10}	6	2,3
⁴¹ Ca (deltaT>20)	103 000	0,36	5.10^{-10}	1,5	2,3
⁵⁹ Ni	75 000	0,36	5.10^{-10}	2 430	5.10^{-2}
⁷⁹ Se	65 000	0,05	5.10^{-12}	1	5.10^{-7}
⁹³ Zr	1 530 000	0,36	5.10^{-10}	486 000	2.10^{-5}
⁹³ Mo	3 500	0,05	5.10^{-12}	1	1.10^{-5}
^{93m} Nb	16,4	0,05	5.10^{-12}	350 000	2.10^{-4}
⁹⁴ Nb	20 300	0,05	5.10^{-12}	350 000	2.10^{-4}
⁹⁹ Tc	213 000	0,36	5.10^{-10}	146 000	4.10^{-6}
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	0,36	5.10^{-10}	4 380	4.10^{-4}
¹²⁶ Sn	100 000	0,36	5.10^{-10}	53 500	1.10^{-5}
¹²⁹ I	15 700 000	0,05	5.10^{-12}	1	soluble
^{166m} Ho	1 200	0,36	5.10^{-10}	58 300	1.10^{-4}
¹³⁵ Cs	2 300 000	0,36	5.10^{-10}	487	soluble
¹³⁵ Cs (deltaT>20)	2 300 000	0,36	5.10^{-10}	50	soluble

Tableau 5.3-11 Valeurs des paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique dans les ouvrages à base d'argile gonflante [70] – calcul de référence

Par ailleurs, les scellements sont supposés n'intercepter que la zone fracturée et ne pas se prolonger dans la zone microfissurée. Cette représentation est conservatrice au regard de la profondeur d'ancrage et du nombre de coupures hydrauliques envisageables. Compte tenu de la disparité des échelles (saignées de 30 cm au regard des centaines de mètres des galeries), le scellement a été modélisé par un noyau, et une coupure hydraulique équivalente représentée sur toute la longueur du noyau comme illustré sur la Figure 5.3-5.

On notera que l'ensemble des choix conservatifs (perméabilité élevée pour la bentonite, limitation des longueurs d'ancrage) conduit in fine à représenter dans le modèle des scellements bien moins performants qu'envisagé en dimensionnement. Celui-ci vise une perméabilité équivalente de 10^{-10} m/s. L'ensemble des résultats acquis à ce jour sur la faisabilité des scellements montre qu'un tel objectif est réaliste [41]. La perméabilité équivalente de l'ancrage représentée dans le calcul ne vaut pour sa part que 10^{-9} m/s⁶⁵, ce qui souligne le caractère pessimiste du calcul. Par ailleurs, on retient le coefficient de diffusion du matériau qui présente la valeur la plus élevée.

Le reste du scellement (massif d'appui et soutènement) est représenté comme le remblai des galeries courantes.

⁶⁵ Elle correspond à la moyenne harmonique des perméabilités des milieux rencontrés par l'eau dans son cheminement, pondérée par les longueurs parcourues : la zone micro-fissurée, le revêtement et l'argile gonflante mise en place au niveau des saignées.

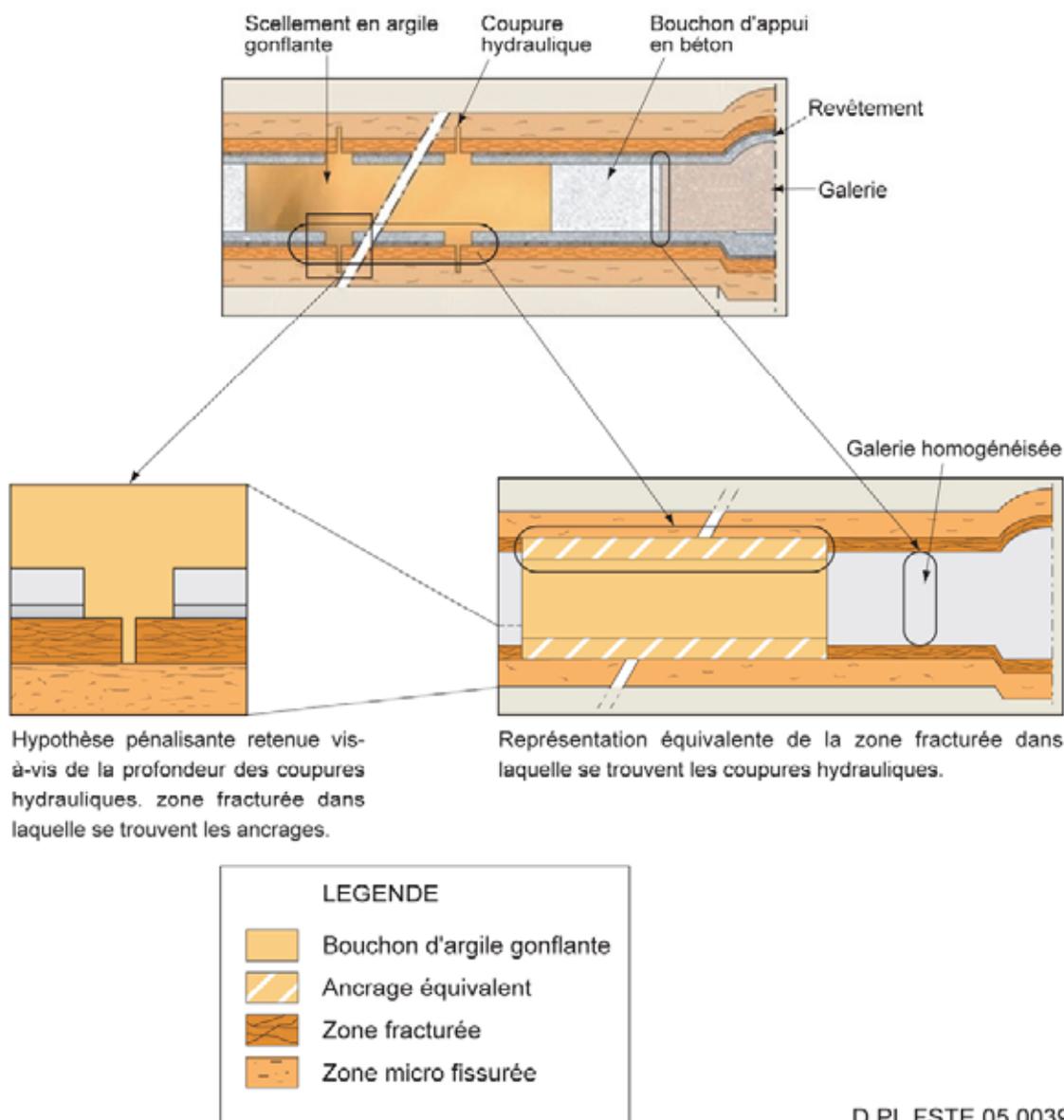


Figure 5.3-5

Représentation équivalente des bouchons d'alvéoles de déchets B et des scellements

● **Alvéoles de déchets C**

Une fois relâchés par les colis de déchets C, les radionucléides migrent dans la zone fracturée autour des colis ou le bouchon argileux jusqu'au Callovo-Oxfordien ou la galerie de stockage contiguë au bouchon.

La représentation du bouchon d'alvéole C est similaire à celle du scellement d'alvéole B, hormis que celui-ci n'est pas ancré du fait de l'absence de zone fracturée après creusement. Le modèle donne pour celle-ci une extension très faible ou nulle, elle n'est pas représentée.

L'influence de l'évolution du champ de température dans le champ proche des alvéoles sur les paramètres de transport et de rétention chimique est prise en compte dans la mesure où elle influe significativement à l'échelle de l'alvéole ; les modalités de traitement sont similaires à celles retenues dans le Callovo-Oxfordien (voir paragraphe 5.3.2.3). Les valeurs des paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique retenues sont similaires à celles de l'argile gonflante des scellements d'alvéoles de déchets B ; elles sont présentées dans le Tableau 5.3-11.

Une étude de sensibilité est réalisée en considérant des paramètres de transport et de rétention géochimique conservatifs dans le bouchon en bentonite. Cette étude est couplée à la sensibilité aux paramètres de transport et de rétention chimique dans la formation hôte (voir paragraphe 5.3.2.3).

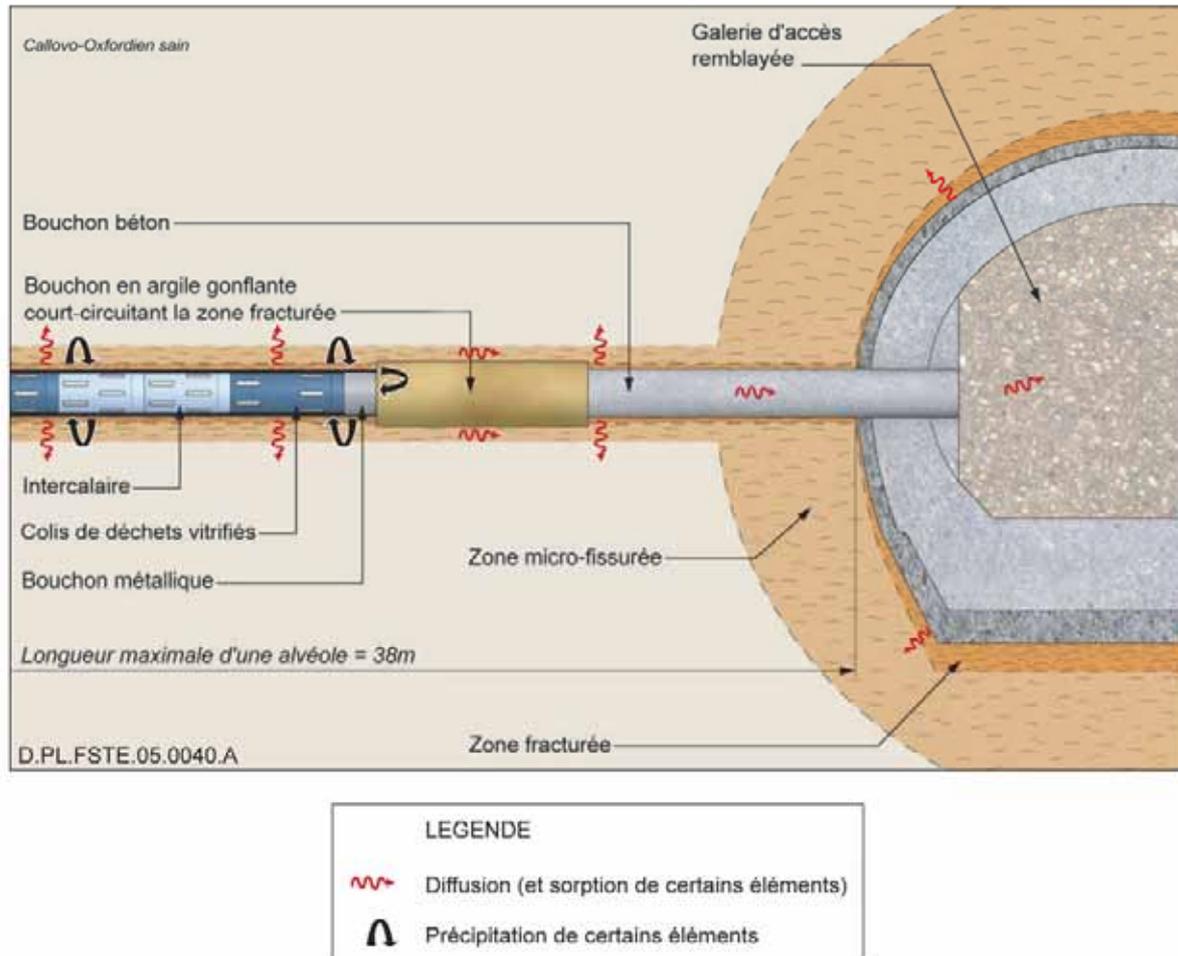


Figure 5.3-6 Représentation des alvéoles de déchets C – Propriétés de confinement mobilisées

Par ailleurs, les bouchons des alvéoles de déchets C sont en très grand nombre. Comme pour les colis, il n'est pas possible d'exclure des problèmes de contrôle qualité pouvant entraîner une non détection d'un défaut initial de ces bouchons, entraînant un problème au niveau de l'interface bouchon/argilite. Dans la même logique que celle suivie pour la défaillance initiale des (sur)conteneurs, il est retenu d'étudier un cas de défaillance de bouchon d'alvéole, correspondant à un taux d'environ un pour mille. Ce taux conduit à la défaillance initiale de :

- un bouchon d'alvéole de déchets C1,
- quatre bouchons d'alvéole de déchets C2,
- deux bouchons d'alvéole de déchets C3,
- trois bouchons d'alvéole de déchets C4.

Les bouchons défaillants sont répartis de façon homogène au sein de chacun des modules, ce qui revient en fait à considérer un bouchon défaillant isolé. Il s'agit ici de vérifier que cette défaillance ponctuelle n'a pas d'influence sur le transport.

● **Alvéoles de combustibles usés**

Une fois relâchés par les colis de combustibles usés, les radionucléides migrent dans le corps de la barrière ouvragée ou le bouchon argileux jusqu'au Callovo-Oxfordien ou la galerie de stockage contiguë au bouchon (voir Figure 5.3-7).

La représentation des ouvrages et du transfert à l'intérieur est similaire à celle des alvéoles de déchets C. Les effets de la température sont pris en compte à l'identique.

Compte tenu du niveau de connaissance atteint sur la barrière ouvragée argileuse (corps éventuel et bouchon), les valeurs des paramètres sont considérées comme phénoménologiques dans le calcul de référence, hormis pour la perméabilité, pour laquelle la valeur retenue, jugée conservatrice, est cohérente avec celle considérée pour les scellements d'alvéoles de déchets B. Les valeurs sont présentées dans le Tableau 5.3-11.

Une étude de sensibilité est réalisée en considérant des paramètres de transport et de rétention géochimique conservatifs dans le corps et le bouchon en bentonite de l'alvéole. Cette étude est couplée à la sensibilité aux paramètres de transport et de rétention chimiques dans la formation hôte (voir paragraphe 5.3.2.3).

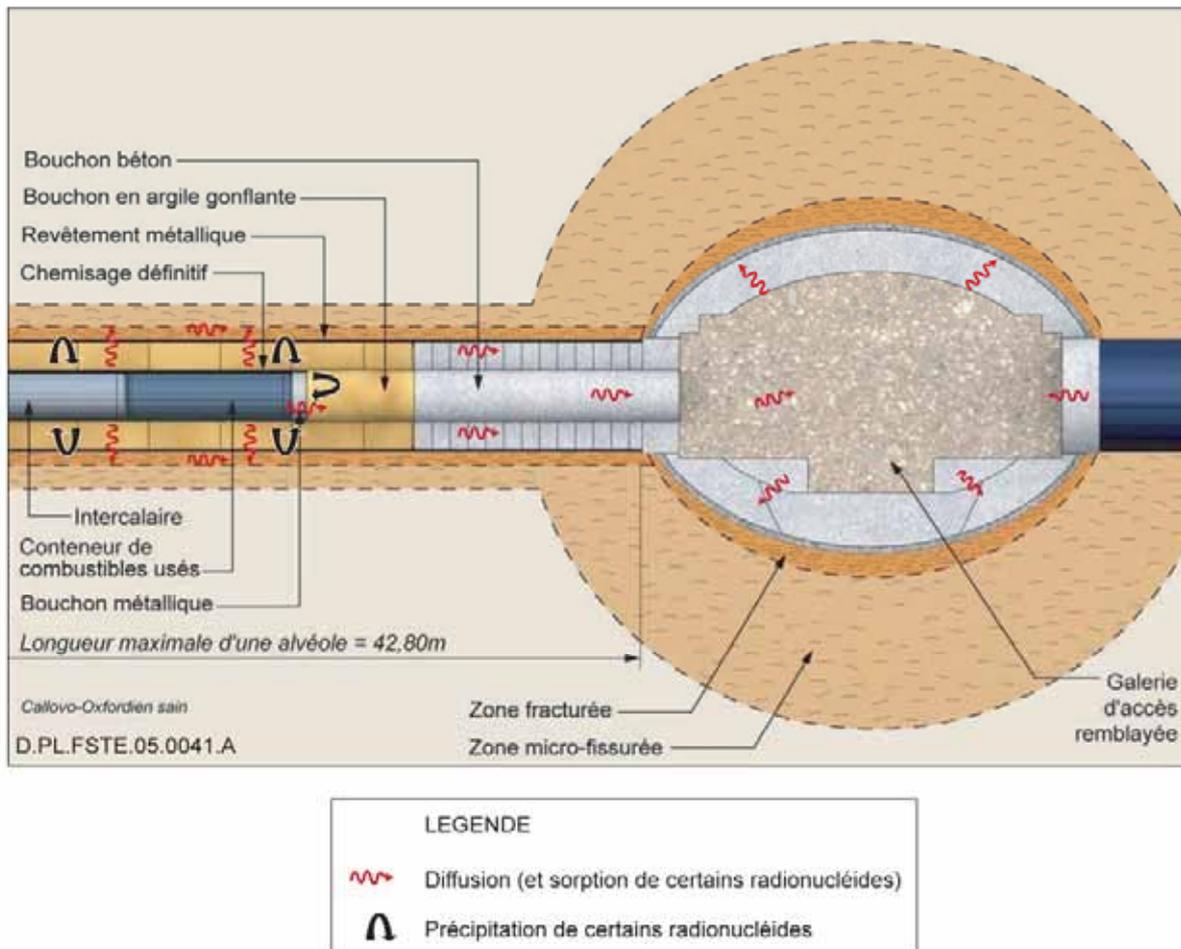


Figure 5.3-7

Représentation des alvéoles de combustibles usés – Propriétés de confinement mobilisées

● Scellemets et remblais

Après avoir migré dans les bouchons d'alvéoles ou l'EDZ associée, une fraction des radionucléides va atteindre les galeries remblayées, transiter dans ces dernières avant de migrer dans le Callovo-Oxfordien ou dans un scellement de galerie.

Scellemets de galeries et de puits

La représentation des scellemets est similaire à celle des scellemets d'alvéoles de déchets B. Par ailleurs, leur environnement chimique, mécanique et hydraulique est également comparable. Pour les zones de déchets exothermiques, l'élévation de température n'apparaît pas avoir d'influence irréversible significative sur la minéralogie compte tenu des dispositions de conception qui limitent la température à 90 °C dans le stockage. Dans ces conditions, le modèle retenu pour la représentation du scellement, du transport et de la rétention chimique des toxiques dans celui-ci s'apparente à celui des scellemets d'alvéoles B ; en particulier il considère des scellemets bien moins performants (en termes de longueur de coupure hydraulique, de perméabilité de la bentonite...) que ce qui paraît atteignable au vu des études d'ingénierie.

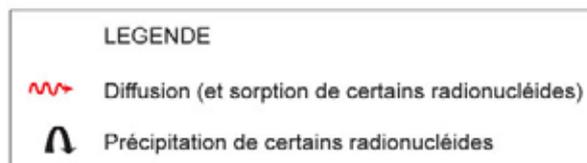
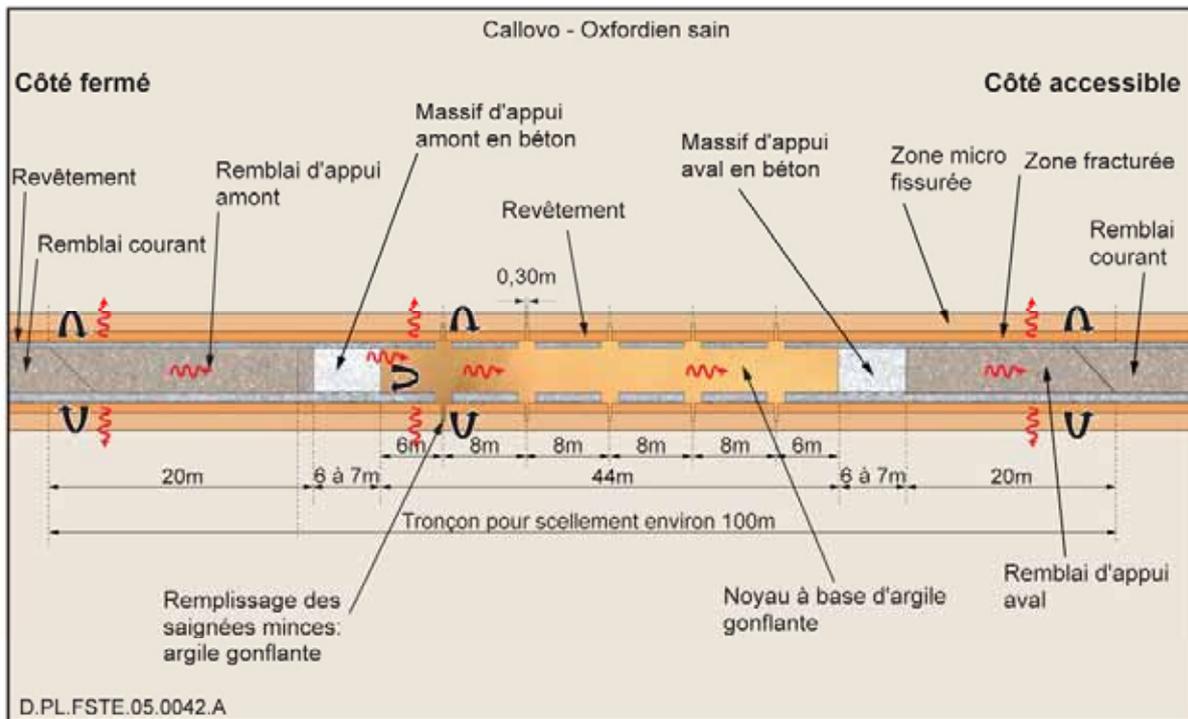


Figure 5.3-8

Représentation des scellemets et caractéristiques de confinement mobilisées

Les modèles de transport et de rétention chimique dans les scellemets des puits sont similaires à ceux retenus pour les scellemets de galeries. Néanmoins, ces derniers étant implantés dans la zone géomécanique A qui présente de meilleures propriétés de résistance mécanique, il n'y a pas de zone fracturée autour du scellement. L'absence de zone fracturée permet ainsi de s'affranchir de la réalisation de coupures hydrauliques.

Galeries remblayées

Les galeries remblayées sont constituées d'une part du soutènement et du revêtement qui restent en place en phase de post-fermeture et d'autre part du remblai dont la fonction principale est la tenue mécanique.

Comme pour les alvéoles de déchets B, l'impact de la corrosion des armatures du soutènement et du revêtement sur leurs performances hydrauliques présente encore des incertitudes. Par ailleurs, la démonstration de la mise en place d'un remblai de faible perméabilité a fait l'objet d'expérimentations conclusives, mais demeure incertaine à l'échelle du stockage entier. Pour ces raisons, il est retenu une approche globale pénalisante pour les valeurs des performances hydrauliques et de transport du système « soutènement, revêtement et remblai ». La perméabilité équivalente retenue est de $3 \cdot 10^{-7}$ m/s, voir Figure 5.3-9. La valeur du coefficient de diffusion est de 10^{-9} m²/s (coefficient pénalisant, correspondant à la diffusion d'une particule d'eau dans de l'eau) ; elle est identique à celle retenue pour le revêtement, le soutènement et le remblai.

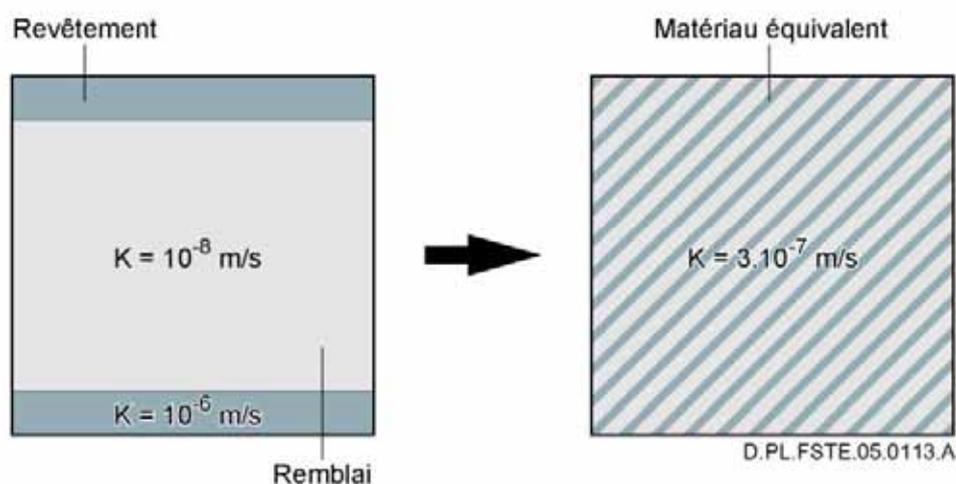


Figure 5.3-9 Représentation équivalente des galeries

Compte tenu qu'aucune fonction n'est attendue du remblai vis-à-vis du retard et de l'atténuation de la migration des radionucléides (sa fonction est celle de soutien mécanique à long terme), le choix pénalisant est fait de ne pas retenir de propriétés géochimiques de rétention dans les galeries remblayées.

5.3.2.3 Représentation de la formation hôte

Un élément particulièrement sensible de l'évaluation est le modèle représentant la formation hôte. Il est fondé sur :

- la compréhension de l'histoire du Bassin Parisien, et des événements géologiques qui ont pu affecter la formation à l'échelle régionale. La compréhension que l'on a de cette histoire détermine les grandes caractéristiques du milieu ;
- les campagnes de mesures par forage de 1999, par sismique réflexion 2D et 3D menées jusqu'en 2000, qui ont conduit à la réalisation d'un premier modèle hydrogéologique du secteur ;
- le retraitement de la sismique 3D, les campagnes de forage de secteur destinées notamment à acquérir des données de calage complémentaires, qui ont conduit à réviser le modèle pour le présent dossier ;
- les campagnes de forages de reconnaissance de la formation conduites en 2003-2004.

Les caractéristiques du Callovo-Oxfordien sont représentées d'une manière qui rend compte au mieux, mais sans les surestimer, de ses propriétés de confinement. On prend en compte des simplifications du modèle phénoménologique de la formation hôte, afin de rendre compte de ses propriétés à l'échelle du secteur.

Au regard des données acquises sur des échantillons de forages provenant de différents lithofaciès du Callovo-Oxfordien, il apparaît que sa faible variabilité verticale n'a pas d'incidence significative sur le transport des éléments à l'échelle du Callovo-Oxfordien. Ce dernier est donc représenté par un milieu poreux homogène d'épaisseur constante correspondant, dans la logique exposée au paragraphe 5.3.1.1, à l'épaisseur minimale rencontrée sur la zone de transposition (130 mètres). Le stockage est supposé situé au milieu de la couche (soit 65 mètres sous le toit de la formation hôte).

L'effet de l'augmentation de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien au nord-ouest de la zone de transposition est évalué par le biais d'une étude de sensibilité considérant un épaissement de la formation hôte de 10 mètres environ de part et d'autre du stockage (le stockage est alors supposé situé à 75 mètres sous le toit de la formation hôte).

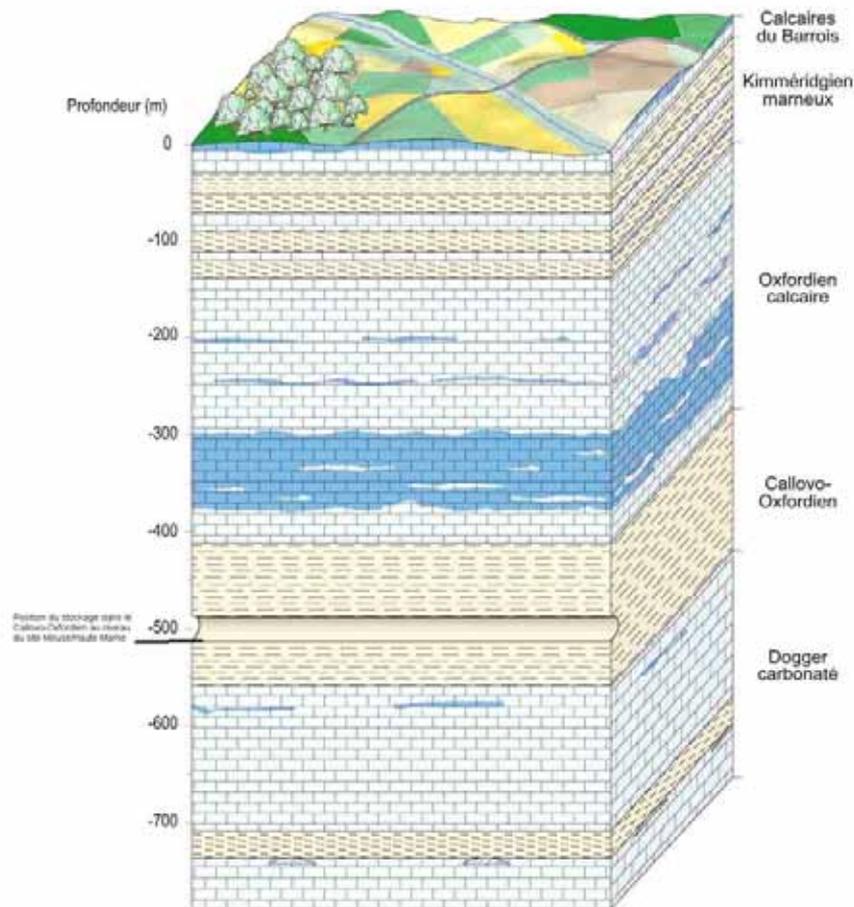


Figure 5.3-10 Formations géologiques au niveau du site Meuse / Haute Marne et position du stockage au sein du Callovo-Oxfordien

Le comportement des éléments dans le Callovo-Oxfordien est représenté par (voir Figure 5.3-11) :

- un transport par diffusion / convection. Le phénomène d'exclusion anionique est retenu pour la diffusion. La vraisemblance d'un transport d'éléments sous forme colloïdale (particules dont la taille est comprise entre 1 nm et 10^4 nm) a fait l'objet d'études qui ont conclu que ceux-ci pourraient se former mais que les faibles dimensions de pores et les différents phénomènes d'interaction des particules avec la matrice solide des argilites devraient limiter le flux potentiel à une valeur insignifiante. Le transport sous forme colloïdale est par conséquent négligé en SEN ; ce point est discuté plus avant dans le chapitre 6, au paragraphe 6.2.10 ;
- une rétention chimique des éléments par les phénomènes de sorption et de précipitation. La sorption des éléments est représentée par un coefficient de retard. Celui-ci est calculé à partir du coefficient de partage évalué expérimentalement ou établi par analogie avec d'autres éléments⁶⁶.

⁶⁶ Dans le cas particulier du césium, les résultats expérimentaux mettent en évidence que son niveau de rétention dépend étroitement de sa concentration en solution [71]. La valeur de son coefficient de partage (K_d) varie pour cette raison de plusieurs ordres de grandeurs. Ce comportement pourrait s'expliquer par l'existence de plusieurs types de sites d'échange sur les surfaces argileuses. Pour prendre en compte ce phénomène, la sorption du césium a été représentée par une loi dépendant en particulier de sa concentration en solution, établie à partir des résultats expérimentaux (dite « isotherme de Langmuir »).

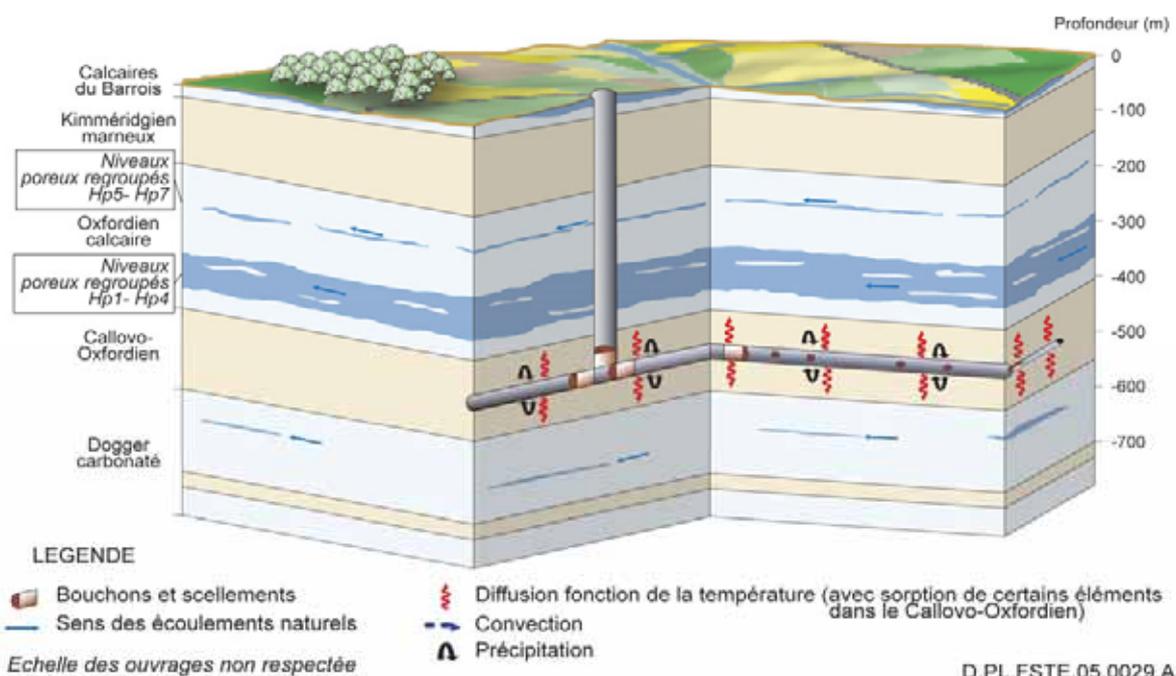


Figure 5.3-11 Phénomènes de transport et de rétention prépondérants dans le Callovo-Oxfordien considérés dans le SEN

● Valeurs nominales des paramètres

Les valeurs de coefficients de diffusion effectif (D_e) et de porosité apparente (ω_{app}) ont été mesurées à partir d'essais de diffusion. Les valeurs retenues pour le calcul de référence sont des « valeurs phénoménologiques », la cohérence de l'ensemble des mesures étant bonne.

- Pour les anions, la valeur retenue correspond à la moyenne des valeurs de coefficient de diffusion effectif et de porosité accessible à la diffusion évaluées à une force ionique de 0,1M, soit, en l'absence de l'effet de la température, $D_{e\text{anions}} = 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ et $\omega_{\text{anions}} = 5 \%$.
- Pour les cations, la valeur retenue correspond à la moyenne des valeurs de coefficient de diffusion effectif mesurées pour le césium et une porosité accessible à la diffusion correspondant à la porosité totale, soit, en l'absence de l'effet de la température, $D_{e\text{cations}} = 2,5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ et $\omega_{\text{cations}} = 18 \%$.

Les valeurs de perméabilité interprétées in situ à partir de relevés de pression obtenus sur de longues périodes de temps ainsi que celles mesurées sur échantillons sains conduisent à des valeurs de perméabilité verticale comprises entre 10^{-14} m/s et 10^{-13} m/s . La stratification horizontale des argilites laisse envisager une possible anisotropie de perméabilité qui n'a cependant pas pu être mise en évidence par les différentes analyses réalisées. Les valeurs de perméabilité s'inscrivant dans la gamme de valeur présentée ci-dessus, le ratio d'anisotropie resterait inférieur à 10. Ces différents résultats conduisent à retenir pour le calcul de référence une valeur de 5.10^{-14} m/s pour la perméabilité verticale et 5.10^{-13} m/s pour la perméabilité horizontale. Ces valeurs sont « phénoménologiques », le ratio d'anisotropie étant cependant vraisemblablement surestimé dans un sens défavorable pour la perméabilité horizontale. La porosité cinématique retenue est de 9 % pour les anions et les cations.

Le Tableau 5.3-12 synthétise les principales données de transport et de rétention chimique retenues dans le calcul de référence pour les radionucléides étudiés.

$K_h = 5.10^{-13}$ m/s $K_v = 5.10^{-14}$ m/s					
	Période [ans]	$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]
¹⁰ Be	1 600 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	31 900	10^{-2}
¹⁰ Be (deltaT>20)	1 600 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	3 200	10^{-2}
¹⁴ C	5 730	0,05	5.10^{-12}	5,6	2,3
³⁶ Cl	302 000	0,05	5.10^{-12}	1	soluble
⁴¹ Ca	103 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	16	2,3
⁴¹ Ca (deltaT>20)	103 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	2,5	2,3
⁵⁹ Ni	75 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	2 050	5.10^{-2}
⁷⁹ Se	65 000	0,05	5.10^{-12}	1	5.10^{-7}
⁹³ Zr	1 530 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	12 800	2.10^{-5}
⁹³ Mo	3 500	0,05	5.10^{-12}	139	1.10^{-5}
^{93m} Nb	16,4	0,05	5.10^{-12}	53 400	2.10^{-4}
⁹⁴ Nb	20 300	0,05	5.10^{-12}	53 400	2.10^{-4}
⁹⁹ Tc	213 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	128 000	4.10^{-6}
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	8 950	4.10^{-4}
¹²⁶ Sn	100 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	179 000	1.10^{-5}
¹²⁹ I	15 700 000	0,05	5.10^{-12}	1	soluble
^{166m} Ho	1 200	0,18	$2,5.10^{-10}$	639 000	1.10^{-4}
¹³⁵ Cs	2 300 000	0,18	$2,5.10^{-10}$	Langmuir*	soluble
		*Langmuir : $K_d = (1,8462.10^{-7}) / (4,7552.10^{-7} + C_{eq})$ Ceq : concentration en solution (mol/l)			

Tableau 5.3-12 Valeurs des paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique dans le Callovo-Oxfordien – calcul de référence

● Prise en compte des effets de la température

Au niveau des zones de déchets exothermiques, les radionucléides, en particulier ceux relâchés par les colis défaillants (voir paragraphe 5.3.2.1), peuvent migrer dans un milieu qui présente une forte charge thermique et un fort gradient thermique. Les modèles ainsi que les paramètres de transport et de rétention chimique peuvent en être modifiés.

Dans ces conditions, on modélise le transport sous l'effet du gradient de température (effet Soret) dès lors que celui-ci est important. On s'est fondé pour cela sur un modèle d'évolution de la température dans le stockage établi sur une base conservatrice en deux dimensions, qui sous-estime la capacité du milieu à évacuer la chaleur.

On prend en compte l'effet de la température sur la valeur du coefficient de diffusion. Pour ce faire, le Callovo-Oxfordien a été scindé verticalement en trois « zones thermiques », la zone médiane comprenant elle-même une sous-unité représentant les ouvrages de stockage et l'EDZ associée (voir Figure 5.3-12). Dans chacune de ces unités, il est évalué un facteur correctif du coefficient de diffusion effectif évalué à 20 °C, en fonction du temps (la température dépendant elle-même du temps). La Figure 5.3-12 illustre l'évolution dans le temps du facteur correctif des combustibles usés CU1. Les facteurs correctifs sont ensuite présentés pour les autres colis types à la Figure 5.3-13.

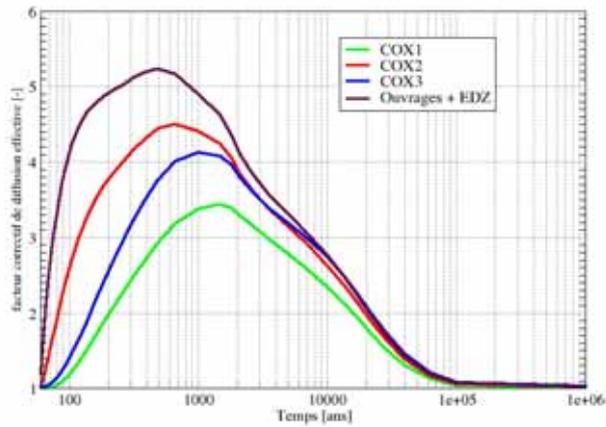


Figure 5.3-12 Facteur correctif appliqué au coefficient de diffusion effectif à 20 °C pour la prise en compte de la température – combustibles usés CU1 (COX = Callovo-Oxfordien)

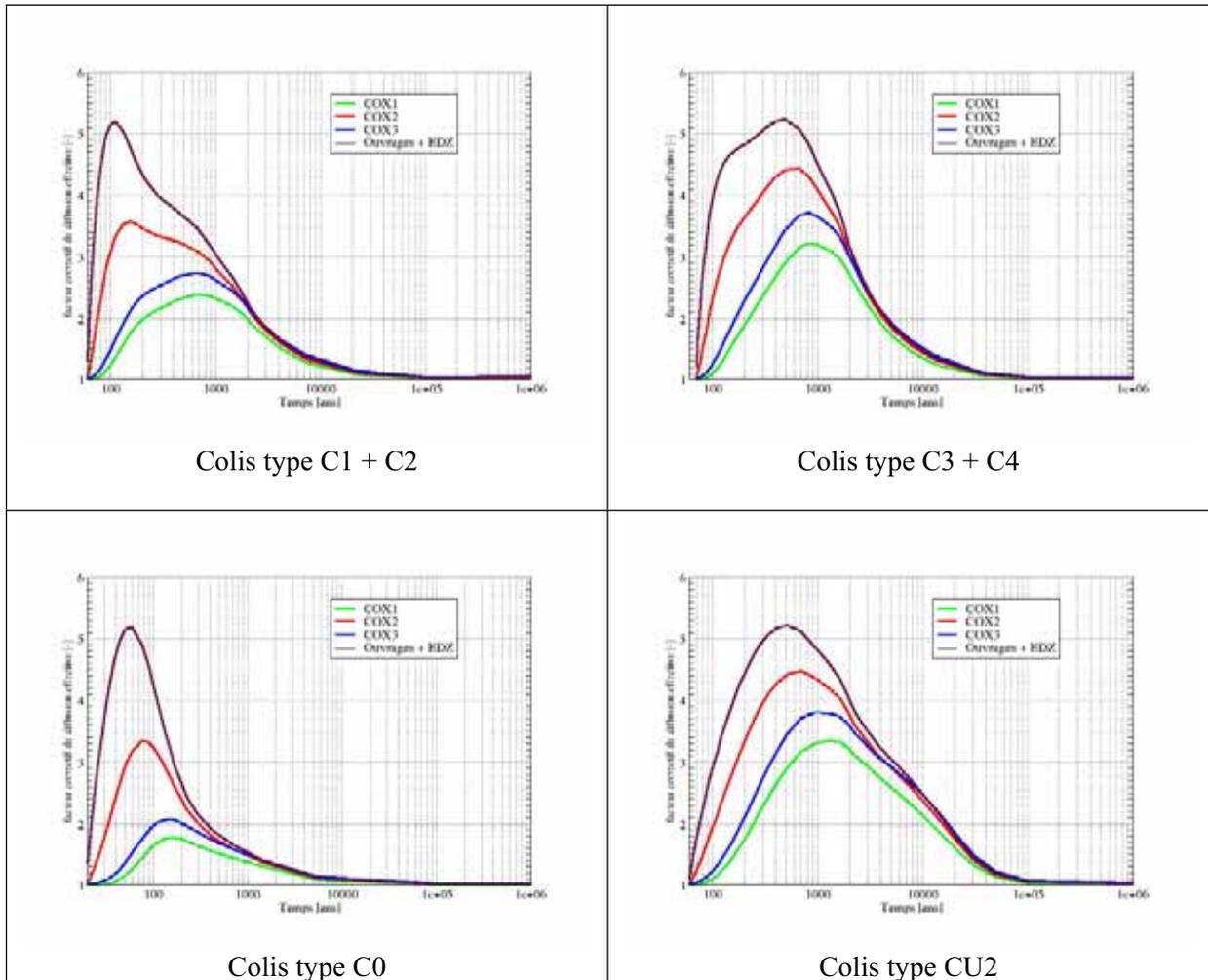


Figure 5.3-13 Facteur correctif appliqué au coefficient de diffusion effectif à 20 °C pour la prise en compte de la température – combustibles usés CU2 et déchets C vitrifiés

Par souci de simplification des calculs et dans la mesure où l'on s'attend à ce que le transport soit principalement diffusif, l'influence de la température sur la valeur de perméabilité n'est pas retenue pour le schéma de calcul global du scénario d'évolution normale.

L'effet de la température sur la solubilité des éléments est difficile à appréhender ; il semble qu'elle puisse jouer dans un sens favorable ou défavorable selon les éléments étudiés. À l'international, il n'existe pas de jeux de données thermodynamiques cohérentes et suffisantes pour rendre compte de l'influence de la température pour tous les éléments étudiés. En outre, les calculs de spéciation mettent en évidence que l'influence de la température sur la solubilité des éléments étudiés est généralement négligeable devant la sensibilité aux paramètres de composition de l'eau (pH, pCO₂, Eh) [71]. Il n'est donc pas retenu de facteur correctif pour représenter l'effet de la température sur la solubilité des éléments.

Les études concernant l'adsorption des éléments sur les matériaux argileux en fonction de la température sont également récentes. Elles comportent des difficultés associées d'une part à la représentation des sites d'adsorption et leur affinité vis-à-vis des radionucléides présents en très faible quantité, d'autre part à la compréhension des équilibres de dissolution/précipitation en interférence avec les équilibres aux surfaces [71]. Comme pour la solubilité, l'effet de la température pourrait jouer, selon les éléments, dans un sens favorable ou défavorable. Il semble que l'adsorption de la majorité des cations, et des actinides, augmente avec la température. Elle tendrait en revanche à diminuer pour le césium. La démarche a donc consisté à retenir un facteur correctif réversible du coefficient de partage de 0,1 pour le césium et par analogie pour le béryllium ainsi que le calcium, tant que l'élévation de température du milieu est supérieure à 20 °C. Les durées de retour à un différentiel de température inférieur à 20 °C par rapport à la température initiale, durées à partir desquelles on cesse de prendre en compte les effets de la température, sont présentées dans le Tableau 5.3-13. On rappelle qu'elles sont issues d'un modèle 2D conservatif. Le découpage du Callovo-Oxfordien en trois zones, tel que considéré pour le calcul du facteur correctif du coefficient de diffusion est conservé ; néanmoins, au-delà d'une certaine date, la température dans le Callovo-Oxfordien devient quasi-homogène et les dates de retour à un différentiel de température inférieur à 20 °C sont identiques pour les trois « zones thermiques ».

Date où l'élévation de température redevient inférieure à 20 °C				
C2	C4	CU1	CU2	C0
3 500 ans	5 000 ans	15 000 ans	15 000 ans	1 000 ans

Tableau 5.3-13 *Date à laquelle l'élévation de température devient inférieure à 20 °C – alvéole de déchets C, de combustibles usés CU1 et CU2 (modèle thermique conservatif)*

● Valeurs retenues dans les études de sensibilité

Afin de couvrir plus largement les incertitudes, des valeurs conservatives ont été définies pour les paramètres qui sont retenus en référence avec des valeurs « phénoménologiques ». Il s'agit des valeurs les plus défavorables parmi celles mesurées, une fois éliminées d'éventuelles valeurs aberrantes :

- une première étude de sensibilité a été réalisée avec des valeurs conservatives de perméabilité horizontale et verticale, respectivement $5 \cdot 10^{-12}$ m/s et $5 \cdot 10^{-13}$ m/s ;
- une deuxième étude de sensibilité a été réalisée sur les paramètres de transports et géochimiques dans la formation hôte, notamment sur :
 - ✓ les valeurs de coefficients de diffusion effectif et de porosité. Les couples de valeurs (D_e , ω) sont respectivement de (10^{-11} m²/s ; 4 %) pour les anions ($5 \cdot 10^{-10}$ m²/s ; 21 %) pour les cations ;
 - ✓ les valeurs de coefficients de retard et de limites de solubilité conservatives intégrant notamment les incertitudes associées à la composition de l'eau de pore. En l'absence de données conservatives pour le coefficient de partage (Kd) de certains radionucléides, une

approche arbitraire a consisté à retenir des valeurs pénalisantes en ramenant à zéro les valeurs phénoménologiques faibles ou en appliquant un facteur correctif de 0,1 à la valeur phénoménologique de coefficient de retard lorsqu'elle est significative mais incertaine [71] ;

Cette étude est combinée avec la sensibilité aux paramètres de transport et de rétention chimique dans l'argile et le béton.

Par ailleurs, les dernières études menées sur la rétention des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien indiqueraient que l'iode pourrait présenter une rétention chimique induisant un retard au transport. L'interprétation de ces résultats et des phénomènes possibles à l'origine de cette rétention est d'autant plus difficile que certains résultats sont contradictoires. De ce fait, il est retenu pour le calcul de référence une valeur nulle de coefficient de partage. Une étude de sensibilité est néanmoins réalisée pour évaluer le gain possible sur le débit d'activité en sortie de Callovo-Oxfordien associé à une légère sorption de l'iode ($K_d = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ induisant un retard de l'ordre de 50 dans le Callovo-Oxfordien).

Enfin, le calcul de la température dans les ouvrages et le Callovo-Oxfordien, qui conditionne les valeurs de coefficient de diffusion et de coefficient de retard, est conservatif car les modèles utilisés ont été réalisés en deux dimensions, et surestiment donc le champ thermique et n'intègrent pas de dissipation d'énergie au sein du stockage. Aussi, une étude de sensibilité est réalisée à partir de calculs thermiques plus réalistes effectués en 3D, qui prennent en compte plus finement les différents composants du stockage. L'élévation de température calculée dans le stockage est alors moins importante.

Ces études de sensibilité permettent de prendre en compte les incertitudes résiduelles sur la représentation de la formation du Callovo-Oxfordien en champ lointain. On trouvera au chapitre 6 une discussion plus détaillée de ces incertitudes, permettant de mettre en perspective les choix de modélisation effectués et les études de sensibilité, au regard de chacune d'entre elles.

5.3.2.4 Représentation des formations encaissantes

Le modèle « de sûreté » des formations encaissantes est simplifié par rapport à la connaissance phénoménologique acquise sur leur structure d'ensemble. Ceci s'explique par le fait que :

- les formations encaissantes ne font pas partie du système de stockage, au sens où ce ne sont pas des éléments auxquels le concepteur attribue une fonction de sûreté (voir chapitre 3). Il n'en demeure pas moins que ces formations jouent un rôle dans l'évaluation d'impact, puisqu'elles interviennent dans le cheminement des radionucléides jusqu'à la biosphère, donc dans la conversion des propriétés de confinement de la formation hôte en dose à l'exutoire. L'objectif premier de leur représentation dans le modèle de sûreté est donc le calcul de l'impact, dans des conditions qui ne sous-estiment pas celui-ci. On se doit également de ne pas procéder à une surestimation trop grossière ;
- les formations, particulièrement sus-jacentes à la formation hôte, présentent une structure globalement plus complexe que celle du Callovo-Oxfordien et une plus grande variabilité latérale. Le « modèle de sûreté » choisit d'en présenter une vision stylisée, représentative des directions d'écoulements à l'échelle du site.

Les formations sus-jacentes sont de plus soumises à l'érosion. La prise en compte de leurs évolutions se fait à travers un modèle géoprospectif. Les études montrent que l'évolution globale des encaissants sur le million d'années se traduit par une disparition des écoulements régionaux au profit d'exutoires locaux, et par un rapprochement des exutoires vers la zone du laboratoire de Meuse / Haute-Marne.

Le choix de la date à retenir pour fixer le modèle hydrogéologique des encaissants en vue du calcul est un sujet délicat. A priori, il conviendrait de retenir un modèle correspondant à la date de percée des radionucléides hors de la formation hôte. Cette solution se heurte à plusieurs difficultés :

- cette période peut être différente en fonction des éléments considérés, tous n'ayant pas la même mobilité au sein du Callovo-Oxfordien. Elle peut également être différente selon les zones de stockage considérées ;

- les éléments atteignent les encaissants avec une certaine dispersion dans le temps, en fonction du retard qu'ils ont subi au cours de leur trajet. Or, un modèle dynamique des encaissants, couplé avec le transport des radionucléides, est très complexe à réaliser. Il pourrait de plus s'avérer peu robuste aux incertitudes sur les temps de transfert ;
- le calcul n'entend pas être prédictif quant à la période d'émergence des éléments. Il est conduit dans des conditions simplifiées, le but étant d'aboutir à une majoration de l'impact et non à une prédiction de celui-ci. Les temps d'émergence hors de la formation hôte tels que calculés sont de bons indicateurs des périodes de temps concernées, mais n'ont pas de valeur prédictive.

Dans de telles conditions, et compte tenu que l'évolution d'aujourd'hui à un million d'années est relativement régulière, il a été retenu de tester le modèle à un million d'années et le modèle actuel tour à tour, plutôt que de se caler sur une date intermédiaire toujours sujette à caution. Considérer les deux cas extrêmes fournit un bon encadrement de toute situation intermédiaire. Du point de vue de la comparaison au seuil de 0,25 mSv/an, celle-ci est effectuée aussi bien sur le modèle actuel que sur le modèle prospectif.

Les gradients de charges dans le Callovo-Oxfordien sont imposés par les formations encaissantes. En cohérence avec le choix fait pour les encaissants, il est considéré, pour modéliser le transfert des radionucléides jusqu'aux encaissants sus-jacents, un gradient de charge vertical ascendant conservatif et constant sur toute la zone de transposition de 0,4 m/m pour le modèle à 1 million d'années et de 0,2 m/m pour le modèle à l'actuel. Pour modéliser le transfert des radionucléides jusqu'au Dogger, un gradient vertical descendant de 0,2 m/m a été retenu.

La représentation simplifiée des encaissants adoptée pour les calculs de sûreté a consisté à regrouper des couches présentant a priori des performances hydrauliques et de transport proches. Les couches sont modélisées avec des épaisseurs constantes égales à celles rencontrées au niveau du site de Meuse / Haute-Marne. Aucune performance géochimique et de transport pouvant induire un retard au transport ne leur est attribuée ; leurs coefficients de diffusion sont élevés. La représentation détaillée est la suivante (voir Figure 5.3-14) [72].

- Le Dogger, encaissant sous-jacent, est représenté comme une couche de faible perméabilité d'épaisseur constante (de l'ordre de 150 mètres). Dans cette couche, un niveau poreux plus perméable et de faible épaisseur (environ 5 mètres) est représenté 20 mètres environ sous le mur du Callovo-Oxfordien pour prendre en compte les faibles venues d'eau observées au niveau du Bathonien (venues d'eau qui ne semblent toutefois pas s'organiser spatialement sur une échelle plurikilométrique) ;
- L'Oxfordien carbonaté est représenté de la base au sommet par :
 - ✓ un premier ensemble peu perméable de 60 mètres (correspondant aux faciès C3a-C3b) ;
 - ✓ un niveau poreux de 50 mètres d'épaisseur regroupant les quatre horizons poreux inférieurs (Hp1 – Hp4) de perméabilité plus importante ;
 - ✓ un ensemble de 140 mètres représentant les calcaires compacts des inter-poreux ;
 - ✓ un second niveau poreux de 5 mètres d'épaisseur de perméabilité élevée regroupant les trois horizons poreux supérieurs (Hp5 à Hp7) ; ces derniers sont plus individualisés selon la verticale. Ils sont représentés groupés au niveau de Hp7 ;
 - ✓ un ensemble de 25 mètres d'épaisseur représentant des calcaires compacts.
- Le Kimméridgien est représenté par une couche unique de faible perméabilité de 110 mètres d'épaisseur.
- Les calcaires du Barrois sont représentés en deux couches :
 - ✓ un ensemble inférieur de 30 mètres au sein duquel aucune manifestation karstique n'est observée ;
 - ✓ un ensemble supérieur dont l'épaisseur varie en fonction de la topographie, mais qui est d'une centaine de mètres d'épaisseur au maximum, représentant les niveaux potentiellement karstiques de la formation.

Les propriétés géochimiques des encaissants (sorption, précipitation) sont négligées, en cohérence avec le fait qu'ils n'ont pas de fonction de sûreté. On considère également qu'ils ne limitent pas la diffusion, en retenant un coefficient pénalisant (équivalent à celui d'une particule d'eau diffusant dans de l'eau).

Ces choix de représentation conduisent à augmenter la diffusion dans les encaissants. Ils sont donc pénalisants vis-à-vis d'un exutoire qui serait alimenté en radionucléides par une voie de transfert diffusif. On verra qu'un tel exutoire est retenu dans le calcul, au niveau des calcaires du Barrois et du Kimméridgien. Vis-à-vis d'autres exutoires, alimentés par un transfert convectif, l'influence des choix de représentation est plus incertaine. En favorisant la diffusion, on pourrait minorer légèrement l'impact des radionucléides transitant par convection, ceux-ci étant « détournés » de leur cheminement convectif par une diffusion facilitée. Une étude de sensibilité est donc réalisée pour s'assurer que ce phénomène n'était pas quantitativement important. Cette étude prend en compte des valeurs de coefficient de diffusion plus faibles que celles prises en référence dans les couches pour lesquelles il apparaît raisonnable de faire un tel choix, c'est-à-dire les moins perméables, la couche C3a de l'Oxfordien et le Kimméridgien.

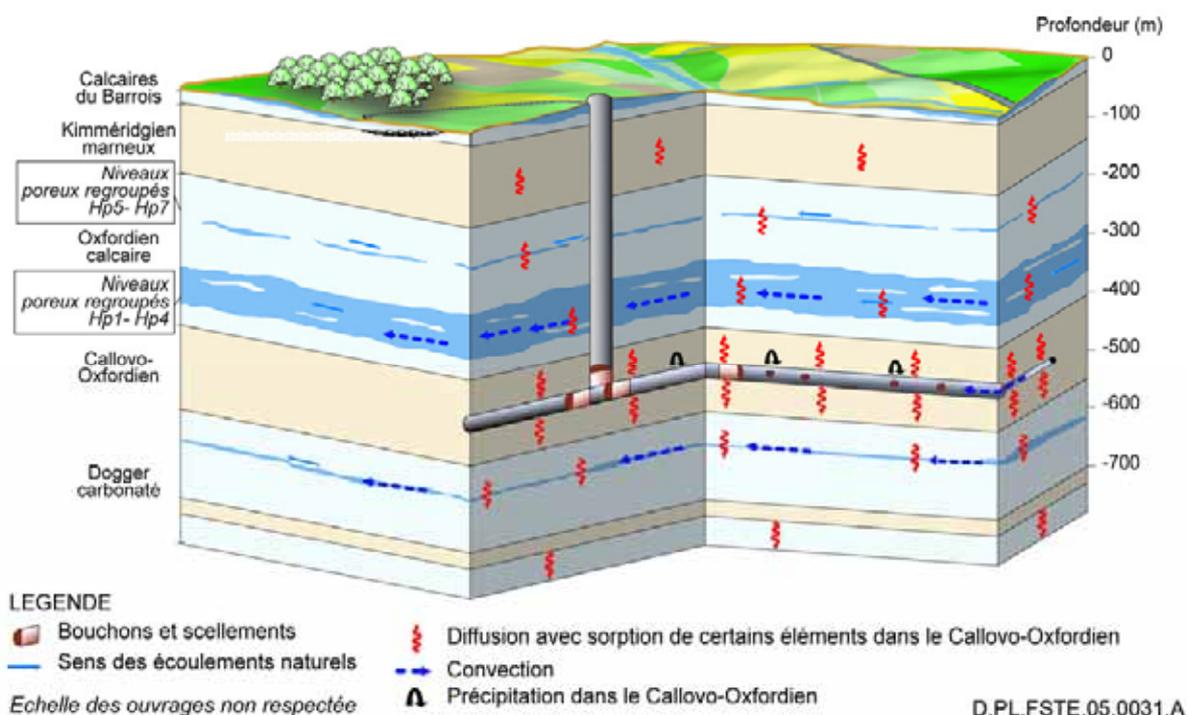


Figure 5.3-14 Représentation des encaissants et de propriétés de confinement mobilisées

5.3.2.5 Choix des exutoires

● Principes de sélection des exutoires

Les exutoires sont représentés par des pompages d'exploitation d'eau au niveau desquels un individu du groupe critique collecte de l'eau contaminée en radionucléides pour ses besoins en eau de boisson ou son exploitation agricole. Le choix de la localisation des exutoires au sein de chaque modèle hydrogéologique obéit quant à lui à une logique qui consiste :

- à privilégier les exutoires au plus près du site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne (localisation par défaut du stockage, retenue à titre conventionnel) sur des zones où le débit d'eau est suffisant pour envisager un pompage d'exploitation d'eau, même improbable ;

- à choisir de préférence, au niveau de chacune de ces zones, des pompages dans le premier aquifère ou horizon poreux rencontré, y compris si celui-ci est relativement profond, à savoir :
 - ✓ en premier lieu, les aquifères superficiels au niveau des couches à l’affleurement (Barrois notamment) ou des cours d’eau, étant entendu qu’on ne prend pas en compte le débit de dilution associé à leur propre débit d’eau (on considère un pompage près du cours d’eau, et non pas dans le cours d’eau, qui serait plus vraisemblable mais moins pénalisant) ;
 - ✓ ou à défaut, dans le premier horizon poreux rencontré ; dans certains cas, et notamment pour le modèle hydraulique à un million d’années où les fonds de vallées ont été creusés par l’érosion sur l’épaisseur totale du Kimméridgien, le niveau poreux supérieur de l’Oxfordien calcaire (Hp5-Hp7) peut être affleurant dans certaines zones ;

Cette démarche est cohérente, bien que plus pénalisante, avec celle de la RFS.III.2.f qui précise que « *les exutoires seront constitués par les cours d'eau et des pompages peu profonds d'alimentation en eau* ». L’Andra a cependant choisi de ne pas retenir les cours d’eau eux-mêmes dans lesquels l’activité des radionucléides est plus diluée.

● **Sélection des exutoires sur la base du modèle hydrogéologique de secteur**

Cette logique de sélection d’exutoires est appliquée à chacun des deux modèles hydrogéologiques qui ont été établis pour le dossier 2005, celui à un million d’années et l’actuel. On commence par le modèle à un million d’années.

Modèle « à un million d’années »

Le modèle hydraulique établi à partir des champs de charges à un million d’années laisse apparaître plusieurs zones d’exutoires, pour un stockage situé arbitrairement à l’emplacement du laboratoire souterrain (voir Figure 5.3-15) :

Pour ce qui est du modèle hydraulique dans les encaissants sus-jacents, on identifie trois zones d’exutoires potentiels [72] :

- un exutoire positionné dans la vallée de l’Ornain. L’exutoire est assimilé à une source ou un pompage dans l’intervalle poreux représentant Hp5-Hp7, montrant à cet endroit des propriétés favorables à une exploitation (amélioration de la perméabilité liée à la mise à l’affleurement) ;
- un exutoire au niveau des failles de la Marne/Poissons, positionné légèrement à l’ouest de cette zone (débutant approximativement à la vallée de la Saulx). On a pris en compte les résultats obtenus sur le forage EST 321, où une venue d’eau a été observée dans l’Oxfordien. Le modèle prend en compte à cet endroit, et sur l’ensemble de la direction parallèle à la faille de la Marne, l’existence d’une « zone de fracturation diffuse », à ce jour purement hypothétique, dont la perméabilité est volontairement considérée comme très dégradée. Cette zone est supposée commencer juste en aval du forage EST 351, où les venues d’eau observées ont été faibles. Elle se situe hors de la zone de transposition. Un exutoire est placé juste à l’entrée de la zone de fracturation diffuse, de manière à ne pas avoir à tenir compte des transferts au-delà. Pour des raisons liées à la modélisation numérique (voir encadré 5), on a adopté une approche pénalisante, consistant à « rabattre » toute la masse de radionucléides circulant dans les encaissants supérieurs et arrivant vers la zone de fracturation diffuse vers un pompage d’eau conventionnel ;
- un exutoire par pompage dans les calcaires du Barrois. Pour ce dernier, les caractéristiques à prendre en compte dépendent notamment de la position exacte du panache par rapport à la position des faciès susceptibles de fournir une ressource en eau ;
- pour ce qui est du modèle hydraulique dans le Dogger, aucun exutoire réaliste ne peut être déterminé dans la zone d’étude. On a retenu de placer un exutoire au même niveau que l’exutoire Saulx, et de forcer les écoulements dans la direction de cet exutoire proche du site. Les caractéristiques du Dogger limitent cependant fortement l’expression de cet exutoire : on verra que seulement 0,03 % de la masse sortant du mur du Dogger l’atteint, le reste migrant par diffusion vers le bas du Dogger.

On notera que le choix de retenir des exutoires proches du site permet de limiter l'influence du modèle hydrogéologique sur le calcul d'impact. En particulier, l'exutoire dans l'hypothétique zone de fracturation diffuse est à cinq kilomètres du site et à deux kilomètres de l'extrémité du stockage la plus proche, et permet de s'affranchir de toutes les incertitudes relatives à la proximité des failles de la Marne.

Modèle « à l'actuel »

Pour ce modèle, les trajectoires et l'exutoire dans le Dogger sont choisis à l'identique, et s'avèrent tout aussi conventionnels que dans le cas du modèle à 1 million d'années. En revanche, les champs de charges actuels induisent des trajectoires différentes dans les encaissants sus-jacents. Il n'apparaît pas de trajectoires dirigées vers la vallée de l'Ormain, mais en revanche une partie du flux se dirige vers le Nord – Nord Ouest. Ces trajectoires sont en partie « régionales », c'est à dire qu'elles ne rencontrent aucune zone dans laquelle un exutoire peut être défini selon la logique précédente (pas d'exutoires naturels, pas de zone de failles identifiées). Une autre partie rejoint le confluent de la Marne et du Rongeant, en traversant la zone de fracturation diffuse. On retient donc les exutoires suivants (voir Figure 5.3-16):

- un exutoire au niveau de la « zone de fracturation diffuse », à proximité de la Saulx défini de la même manière que dans le modèle à un million d'années ;
- plus au Nord Ouest, un deuxième exutoire au niveau de la zone de fracturation diffuse, interceptant sur toute la hauteur des encaissants l'ensemble des trajectoires se dirigeant vers la Marne (en supposant la présence d'un pompage à cet endroit). On notera que cet exutoire est conventionnel, puisque rien n'inciterait a priori un individu à placer un puits à cet endroit ;
- un exutoire par pompage dans les calcaires du Barrois ou le Kimméridgien marneux à l'affleurement, cohérent avec celui retenu dans le modèle à 1 million d'années.

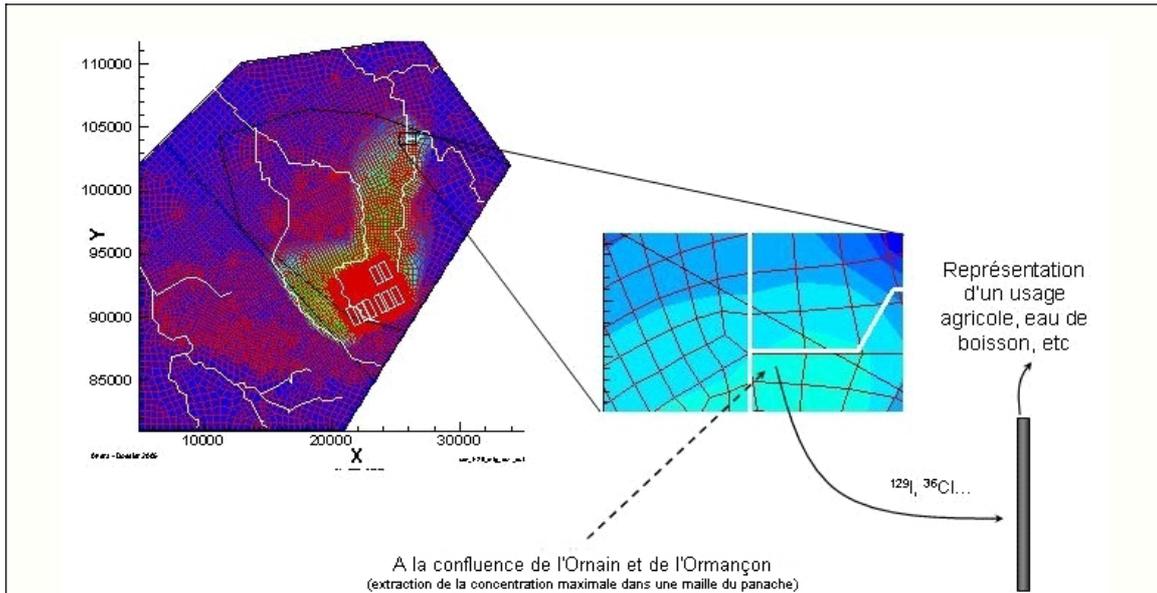
Encadré 5 Du modèle hydrogéologique vers le calcul d'impact

La plateforme Alliances représente les formations encaissantes au moyen d'un maillage en trois dimensions. Les calculs de transport permettent de déterminer le flux de quantité de matière (pour chaque radionucléide) entrant et sortant d'une maille, les flux d'eau entrant et sortant, et la concentration en radionucléides au niveau de la maille. Le modèle assure en particulier la conservation de la matière, en s'assurant que les flux entrant et sortant de chaque maille sont bien égaux.

Le modèle de biosphère nécessite quant à lui, pour calculer les transferts jusqu'à l'individu critique, que l'on connaisse la concentration en radionucléides dans l'eau qui est utilisée par la population pour son usage domestique ou agricole. Ce mode de calcul permet de se dispenser d'hypothèses sur la taille du groupe critique : la quantité totale de radionucléides « disponible » dans l'eau des formations encaissantes, et la manière dont elle se répartit entre les différents individus potentiellement exposés, n'interviennent pas. Les individus sont tous soumis à une concentration uniforme, soit directement dans leur eau de boisson, soit au travers des aliments contaminés qu'ils peuvent consommer.

Le lien entre les deux modèles est assuré en supposant que la concentration en radionucléides de l'eau utilisée par le groupe d'individus critiques est la concentration calculée dans les formations encaissantes, à l'emplacement où on a convenu de positionner un exutoire. On choisit la maille de concentration maximale dans une zone donnée (voir figure ci-dessous).

On néglige dans une telle approche l'influence que le pompage peut avoir sur les écoulements dans la nappe, et la dilution de la radioactivité que cela pourrait induire. La concentration en radionucléides dans l'eau pompée est supposée influencée uniquement par le modèle hydrogéologique et le transport dans les encaissants, et non par le débit de pompage.



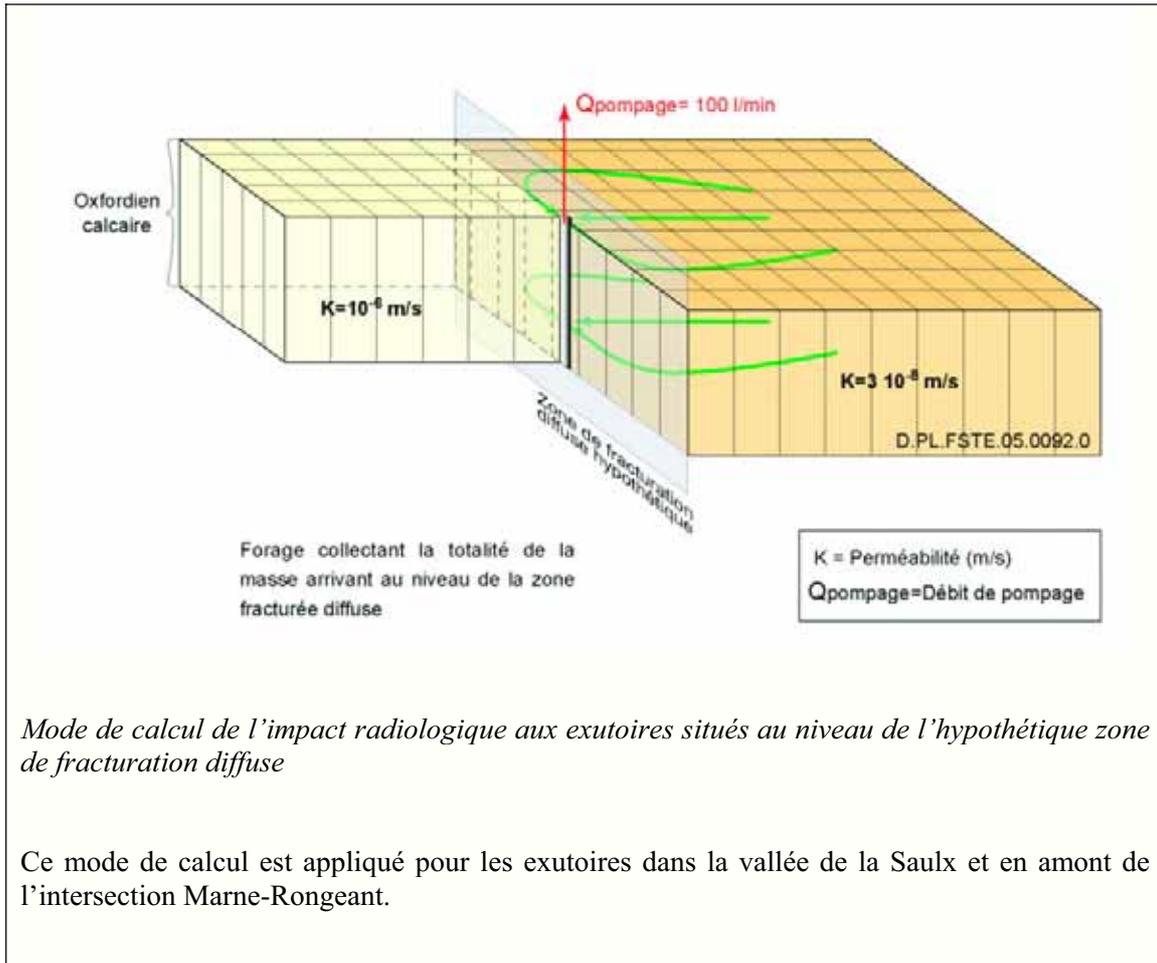
Mode de calcul de l'impact radiologique à l'exutoire Ornain

Ce mode de calcul pose cependant une difficulté particulière dans le cas des exutoires placés en amont de la zone dite « de fracturation diffuse ». De manière pénalisante, cette zone a été représentée par un changement brutal de perméabilité. En entrant dans la zone par l'Est, le modèle modifie la perméabilité, passant de celle observée pour l'Oxfordien ($3 \cdot 10^{-8}$ m/s) à une valeur très élevée de 10^{-6} m/s. Ce choix induit une discontinuité dans les valeurs de concentrations en radionucléides. En amont hydraulique de la zone, la concentration est plus forte, mais elle correspond à un endroit où les débits d'eau ne se prêtent pas à un pompage. En aval de la zone, la concentration chute, car elle est diluée dans les circulations d'eau de la zone de forte perméabilité. Le choix de positionner l'exutoire à cet endroit serait critiquable, car la dose évaluée y serait très faible du fait de la dilution apportée par le modèle.

Pour ces exutoires particuliers, l'Andra a par conséquent fait un choix de modélisation pénalisant, permettant d'évaluer un majorant de l'impact par une autre méthode. La concentration étant un paramètre instable numériquement, on a retenu de s'appuyer plutôt sur le débit de quantité de radionucléides entrant dans la zone de fracturation diffuse, qui se conserve en traversant la discontinuité de perméabilité. L'ensemble de ce débit, sur toute la hauteur des formations encaissantes, est supposé capté par un exutoire positionné à un endroit quelconque dans le voisinage de la zone. Pour convertir cette quantité de matière en concentration, pour les calculs dans la biosphère, il faut la diviser par un débit de pompage. On a retenu un débit de 100 litres par minutes, pérenne dans le temps, qui correspond :

- à la gamme de débits observée, sur une période courte, dans le forage EST 321 ;
- à une valeur basse au regard des débits correspondant à des pompages d'alimentation d'eau potable à une telle profondeur. Les pompages existants, dans des formations similaires, ont été recensés dans les départements de la Meuse et de la Haute-Marne à partir de la banque des données du sous-sol du Bureau de Recherches Géologiques et Minières et des dossiers communaux, afin de s'assurer que le débit retenu pour le calcul était bien une valeur faible [59].

Cette approche est très pénalisante, dans la mesure où elle revient à « rabattre » dans un puits toute la contamination circulant dans les encaissants. Celle-ci est répartie, dans le modèle hydrogéologique, sur une zone de plus d'un kilomètre de long. Aucun puits, particulièrement avec un débit aussi faible, ne paraît capable d'avoir une telle influence sur les écoulements.



Le Tableau 5.3-14 présente une synthèse des exutoires potentiels retenus pour les modèles hydrauliques à 1 million d'années et à l'actuel. La Figure 5.3-15 et la Figure 5.3-16 donnent les trajectoires des écoulements et les exutoires potentiels au niveau du site.

Modèle hydraulique établi à 1 million d'années	Modèle hydraulique représentatif des champs de charges à l'actuel
Exutoire « Saulx » au niveau de la zone de fracturation diffuse	
Pompage dans la vallée de la Saulx interceptant l'ensemble du débit de radionucléides arrivant dans la zone de fracturation diffuse, et associé à un débit de pompage de 100 litres / minutes	
Exutoire « Ornain »	Sans objet
Pompage dans la vallée de l'Ornain, dans l'intervalle poreux représentant Hp5-7 à l'endroit où la concentration est maximale	
Sans objet	Exutoire « interception des trajectoires vers la Marne »
	Pompage interceptant l'ensemble du débit de radionucléides arrivant dans la zone de fracturation diffuse, et associé à un débit de pompage de 100 litres / minutes
Exutoire « Barrois » ou « Kimméridgien »	Exutoire « Barrois »
Pompage dans les calcaires du Barrois ou dans le Kimméridgien affleurant à l'endroit où la concentration est maximale	Pompage dans les calcaires du Barrois à l'endroit où la concentration est maximale

Tableau 5.3-14

Synthèse des exutoires potentiels retenus pour les modèles hydrauliques à 1 million d'années et à l'actuel

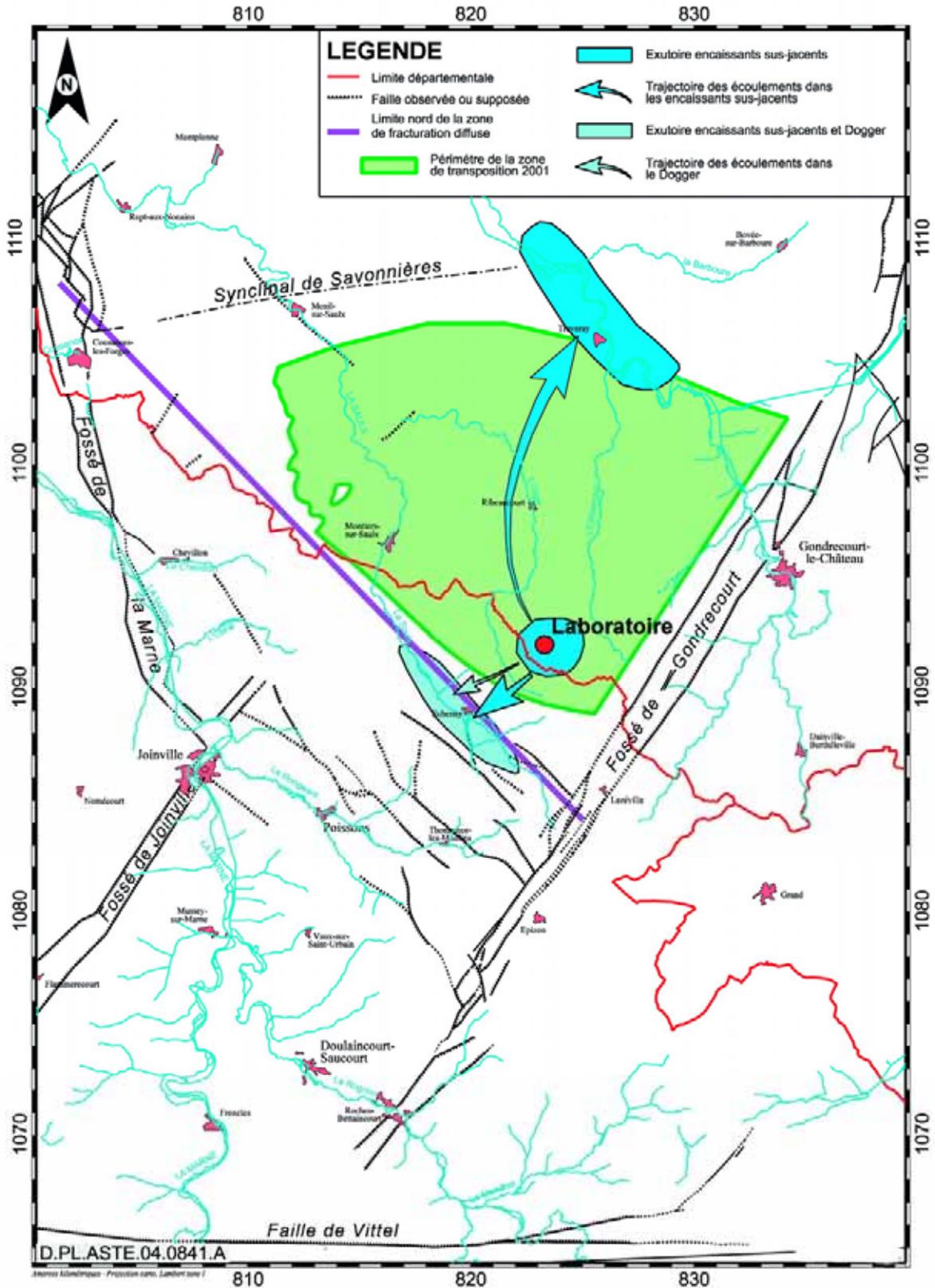


Figure 5.3-15 Trajectoires des écoulements et exutoires potentiels au niveau du site – modèle hydraulique à 1 million d’années

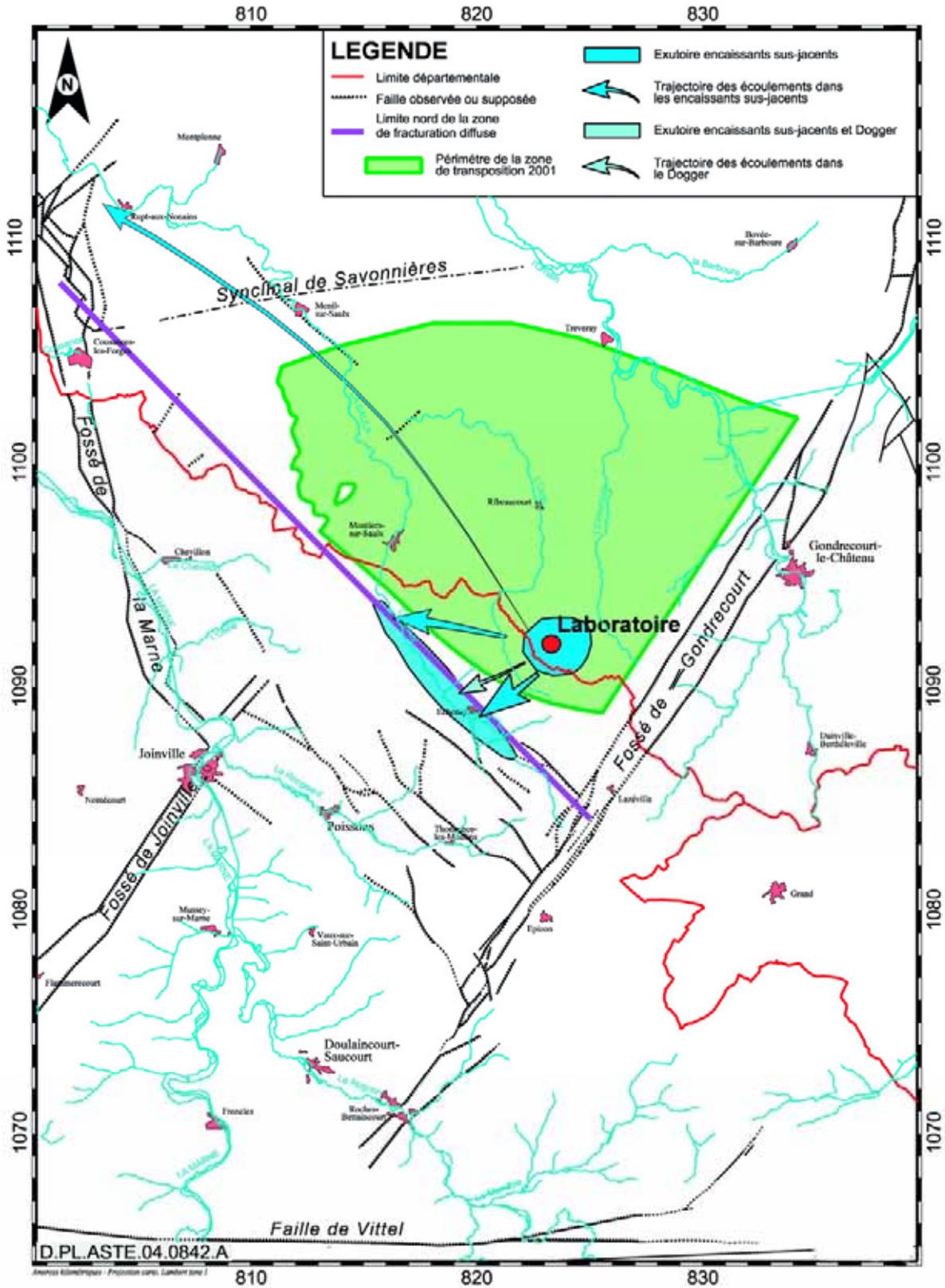


Figure 5.3-16 Trajectoires des écoulements et exutoires potentiels au niveau du site – modèle hydraulique à l’actuel

5.3.2.6 Représentation de la biosphère

La biosphère est définie comme la partie de l'environnement facilement accessible aux activités de l'homme et susceptible d'être une voie de transfert des radionucléides (et des toxiques chimiques le cas échéant) jusqu'à des individus potentiellement exposés. Sa modélisation est fondée, d'une part, sur la connaissance du comportement des éléments chimiques dans l'environnement, et d'autre part, sur les habitudes de vie des populations dans la région concernée. Elle permet le calcul des doses à l'Homme que peuvent engendrer les différentes voies d'atteinte (exposition externe, inhalation, ingestion).

● Le choix du groupe critique

Cette démarche suppose de définir un groupe de référence, dont les habitudes de vie, pertinentes vis-à-vis du site, l'exposent à la contamination contenue dans les aquifères. Ces groupes sont définis par leur âge, leur mode de vie et leurs habitudes alimentaires. La prévision des modes de vie à échéance de plusieurs centaines de milliers d'années n'est pas envisageable. La RFS III.2.f recommande par conséquent, dans la ligne des recommandations de la CIPR 81, de se fonder sur les habitudes actuelles des populations. Néanmoins, pour couvrir les incertitudes et la variabilité des modes de vie possibles, on choisit *a priori* de retenir le groupe susceptible d'être soumis à la plus forte exposition (notion de groupe « critique »). Pour cela, on retient un groupe d'agriculteurs vivant pour l'essentiel de ses propres productions et buvant l'eau de son propre puits : eau de boisson, irrigation d'un jardin potager, abreuvement et élevage des animaux à partir de sa propre production de céréales [73]. En effet, un tel groupe est celui qui est soumis au plus grand nombre de voie d'atteintes des radionucléides présents dans l'eau. Les consommations alimentaires sont issues des enquêtes de l'INSEE [74]. On trouvera au chapitre 6, une analyse des principales incertitudes portant sur la définition de ce groupe critique, envisageant notamment d'autres types de groupes de référence et d'autres habitudes alimentaires, y compris l'autarcie complète. On verra que ces incertitudes ne remettent pas en cause le calcul de dose présenté dans le présent chapitre.

La ressource en eau qui alimente le groupe critique provient d'un puits. Dans le cas où il utiliserait l'eau d'une rivière (par exemple la Saulx), une éventuelle inondation des prairies pourrait induire une voie d'exposition supplémentaire dans certains scénarios faisant intervenir les animaux d'élevage (par contamination de leur fourrage). En revanche, les radionucléides seraient beaucoup plus dilués dans un tel exutoire. Le choix d'un exutoire artificiel de type « puits » est donc bien conservatif.

On notera par ailleurs que la taille du groupe critique et de l'exploitation agricole associée n'interviennent pas dans le calcul. En effet, les individus sont supposés utiliser l'eau contaminée du puits pour l'eau de boisson, l'abreuvement des animaux, pour irriguer leur potager et des cultures sans jamais épuiser la ressource. La concentration en radionucléides dans l'eau de l'exutoire est supposée constante, quel que soit le nombre de personnes qui utilisent le puits, le panache de radionucléides issu du stockage « réalimentant » le puits à concurrence. Cette approche conservatrice permet de ne pas se préoccuper de la taille du groupe exposé.

On notera que le groupe critique est composé d'adultes. L'Andra a également testé la possibilité que des enfants ou des nourrissons soient exposés. Bien que les individus jeunes soient plus sensibles aux effets du rayonnement, leurs consommations alimentaires sont moindres, et il s'avère que retenir un adulte est un choix globalement majorant [75].

Le groupe critique vit dans un climat tempéré, équivalent à celui qui prévaut aujourd'hui. On a vu précédemment que les évolutions climatiques à venir seraient marquées par des alternances de périodes tempérées et de périodes froides, voire glaciaires. Les périodes glaciaires devraient *a priori* être moins pénalisantes du point de vue du groupe critique : le climat froid incite les populations au nomadisme et à quitter les vallées pour s'installer sur des plateaux augmentant ainsi la dilution et diminuant les durées d'exposition. Cela éloignerait de fait les populations de la zone de la vallée de la Saulx ou de l'Ornain. À titre de prudence, l'Andra a néanmoins étudié les groupes vivant de manière transitoire dans l'environnement du stockage, en conditions froides [73]. De tels groupes s'avèrent

moins pénalisants en terme de dose qu'un groupe d'agriculteurs sédentaires. Celui-ci est donc en définitive un choix majorant, que le climat soit froid ou tempéré.

● Le transfert depuis l'aquifère jusqu'au groupe critique

Les voies de transfert jusqu'à la biosphère sont représentées sur la Figure 5.3-17. Elles prennent en compte les différentes voies d'exposition potentielles. Le calcul depuis l'exutoire jusqu'à l'individu critique est effectué selon deux modalités différentes :

- pour la plupart des radionucléides, on utilise un modèle dit « par compartiments » [75], qui consiste à définir des facteurs de transfert d'un compartiment vers le suivant (par exemple, de l'eau du puits vers les plantes par irrigation, des plantes vers l'homme par consommation) ;
- dans des cas particuliers, dont le chlore 36, on tient compte du fait que l'élément stable est présent en quantités pondérales dans l'environnement. Du fait des échanges constants en chlore entre les différents compartiments de la biosphère, un équilibre s'établit. Un rapport isotopique entre le chlore radioactif et la totalité du chlore présent s'établit d'un compartiment à l'autre.

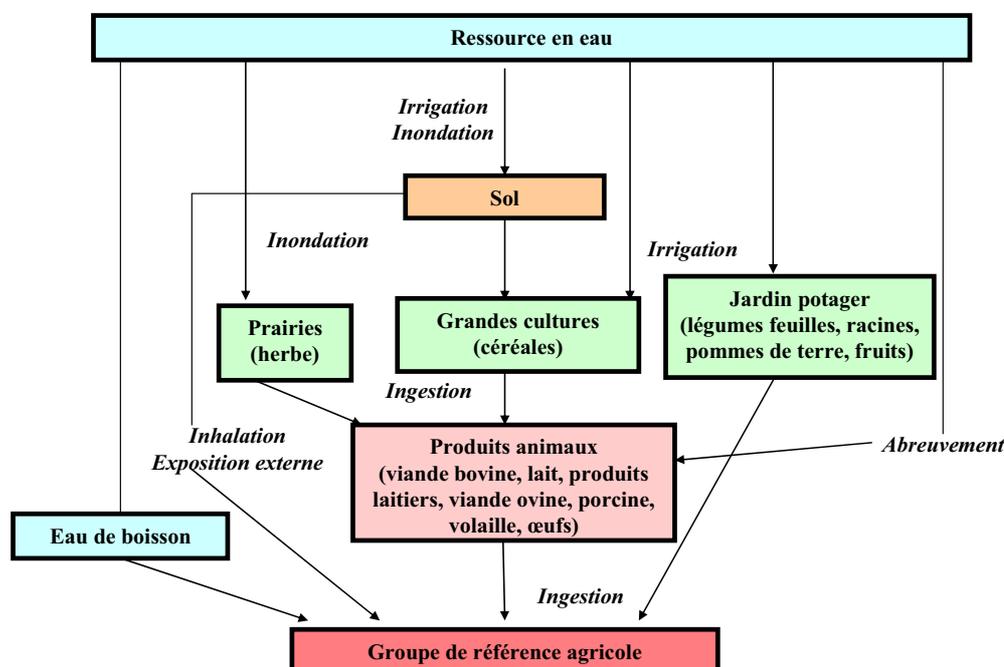


Figure 5.3-17 Voies de transfert prises en compte dans le modèle de biosphère

Le calcul de transfert est effectué au moyen du code de calcul Aquabios. Celui-ci a été testé et qualifié, et comparé à d'autres codes, montrant la bonne convergence des résultats [76, 77, 78]. La définition des facteurs de transfert est issue de la méthodologie développée dans le cadre de l'exercice international BIOMASS organisé par l'AIEA. Les valeurs retenues sont régulièrement comparées au niveau international (exercices BIOPROTA et EMRAS [79]). Elles ont fait l'objet d'études de sensibilité, qui ont permis de cerner les ordres de grandeur d'incertitudes pour les paramètres importants. Ces études sont présentées au chapitre 6, dans le paragraphe 6.2.3.

Les facteurs de conversion retenus pour les calculs de sûreté sont présentés dans le Tableau 5.3-15.

Radionucléides	Période [ans]	Facteurs de conversion « Communauté agricole » (Sv/an)/(Bq/l)	Facteurs de conversion « Eau de boisson » (Sv/an)/(Bq/l)
¹⁰ Be	1 600 000	$9,75.10^{-7}$	$4,84.10^{-7}$
¹⁴ C	5 730	$4,70.10^{-7}$	$2,55.10^{-7}$
⁴¹ Ca	103 000	$9,68.10^{-8}$	$8,36.10^{-8}$
³⁶ Cl	302 000	$4,20.10^{-6}$	$4,09.10^{-7}$
⁵⁹ Ni	75 000	$3,88.10^{-7}$	$2,77.10^{-8}$
¹³⁵ Cs	2 300 000	$1,67.10^{-5}$	$8,80.10^{-7}$
⁹³ Zr	1 530 000	$8,41.10^{-7}$	$4,84.10^{-7}$
⁹³ Nb	16,4	$5,70.10^{-8}$	$5,28.10^{-8}$
⁹³ Mo	3 500	$3,93.10^{-6}$	$1,36.10^{-6}$
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	$3,33.10^{-8}$	$1,63.10^{-8}$
¹⁶⁶ Ho	1 200	$6,04.10^{-5}$	$8,80.10^{-7}$
¹²⁹ I	15 700 000	$5,96.10^{-5}$	$4,84.10^{-5}$
⁹⁴ Nb	20 300	$6,68.10^{-5}$	$5,28.10^{-8}$
⁷⁹ Se	65 000	$1,04.10^{-5}$	$1,28.10^{-6}$
¹²⁶ Sn	100 000	$5,53.10^{-5}$	$2,07.10^{-6}$
⁹⁹ Tc	213 000	$3,53.10^{-7}$	$2,82.10^{-7}$

Tableau 5.3-15

SEN – Valeurs des facteurs de conversion retenus pour la communauté agricole ou la consommation d'eau de boisson – biosphère tempérée

5.4 Evaluation quantitative du SEN

5.4.1 Contexte

La démarche d'analyse des résultats ne consiste pas uniquement à comparer la dose à l'exutoire à la contrainte de 0,25 mSv/an. Elle s'appuie également sur l'analyse de plusieurs indicateurs intermédiaires qui permettent de :

- comprendre le fonctionnement individuel de chacun des composants vis-à-vis des transferts et d'évaluer leurs performances au regard des fonctions qui leur sont allouées (en particulier quelles sont leurs capacités à atténuer et retarder la migration des radionucléides) ;
- s'affranchir de certaines incertitudes. Par exemple, un 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.

Après avoir présenté les résultats associés aux performances des fonctions de sûreté et à l'impact du calcul de référence, on exposera les résultats des études de sensibilité. L'ensemble de ces calculs [64] a été réalisé au moyen de la plateforme Alliances, qui a été sommairement présentée au paragraphe 1.5.2.1 du chapitre 1. L'Encadré 6 donne une vision plus détaillée.

Encadré 6

Architecture de modélisation

L'Andra a engagé en 2000 une réflexion en vue de préparer les moyens de simulation nécessaires à la modélisation du stockage et la réalisation des calculs de sûreté dans le cadre de son dossier d'évaluation. Ainsi est né le projet Alliances, projet commun à l'Andra, le CEA auquel s'est joint ultérieurement l'EDF, de développement d'une plateforme de simulation qui autorise en particulier :

- le choix et le couplage des différents composants numériques,
- la simulation de phénomènes multi-physiques (hydraulique, transport, chimie, mécanique...) et multi échelles (colis, alvéole, stockage, milieu géologique),
- l'analyse de sensibilité et le traitement des incertitudes,
- la gestion des études et leur traçabilité.

On a ainsi bâti un environnement de simulation performant et convivial qui, en outre, assure la modularité et l'évolutivité de l'environnement logiciel. Alliances permet à l'utilisateur, à l'intérieur d'un même environnement, d'intégrer des codes de calculs venant d'origines diverses et de coupler les différentes phases de calculs.

La structure d'Alliances est centrée sur un modèle de données commun, format pivot de communication entre tous les modules de calcul. Ce modèle de données contient les valeurs caractéristiques (géométriques, physiques et numériques) utilisées pour la modélisation et la simulation. Il associe les propriétés physiques aux caractéristiques géométriques du domaine d'étude.

Pour un même modèle physique (module), l'ingénieur peut mettre en œuvre plusieurs codes de calculs (composants) d'origines diverses, les combiner pour enchaîner différentes phases de calcul et réaliser des couplages, et ce pour une base de données indépendantes des composants utilisés.

La démarche de développement s'appuie sur la description des phénomènes régissant le comportement des constituants du stockage aux différentes phases de sa vie. Ces modèles sont le reflet des besoins en terme de modélisation et de simulation. L'ensemble des modèles doit recouvrir toutes les situations analysées.

A un modèle de référence sont associés :

- des phénomènes physiques (hydraulique, thermique, mécanique) avec leurs équations ;
- les couplages entre les phénomènes ;
- les caractéristiques spatiales et temporelles du modèle ;
- les codes de calculs susceptibles de répondre aux besoins de modélisation et simulation ;
- des cas de référence correspondant à la mise en œuvre dans la plate-forme Alliances en fonction d'un objectif (performance, sûreté).

L'analyse des modèles de référence permet de :

- caractériser, puis sélectionner les codes de calculs ;
- définir et réaliser les couplages ;
- définir les cas de qualification et de validation des modules Alliances mis en œuvre.

Pour chaque modèle, plusieurs composants numériques peuvent être sélectionnés afin de renforcer par des études comparatives (benchmark) la fiabilité des études réalisées par l'Andra.

Les capacités de modélisation de la version 1 d'Alliances sont présentées dans le tableau ci-dessous.

<i>Modèles</i>	<i>Composants</i>		<i>Exemples d'application</i>
Hydraulique - saturée - insaturée - transitoire	Castem Porflow Traces		- écoulement dans des milieux poreux - resaturation des alvéoles de stockage
Transport - simple - étendu	Castem Porflow Traces		- transport de contaminant (toxiques chimiques ou radio éléments)
Chimie - complexation - échange d'ions	Chess PhreeqC		- lixiviation - perturbation alcaline - perturbation oxydante
Transport Chimie	Castem MT3D Traces	⇒	Chess PhreeqC - vieillissement - relâchement
Colis - verre - bitume	Prediver Colonbo		- dégradation des colis - relâchement
Sensibilité - échantillonnage - analyse	LHS Kalif Pastis		Sensibilités aux caractéristiques hydrauliques et de transport pour les évaluations de sûreté

Mettre à disposition des ingénieurs d'études un outil capable, dans le cadre du dossier 2005, de réaliser les évaluations de sûreté d'un éventuel stockage en couche géologique profonde, tel était l'objectif de la version 1 d'Alliances dont le développement a pris en compte les principales caractéristiques des calculs de sûreté :

- un grand nombre de données ;
- des enchaînements de calcul complexes faisant intervenir des modèles différents ;
- un volume de calcul important (plusieurs milliers de simulations) ;
- une exigence de maîtrise des données et des résultats.

Depuis début 2004, Alliances est exploitée de façon opérationnelle par l'Andra et ses partenaires pour effectuer ces calculs et pour réaliser des études de performance.

L'ensemble de ces travaux représente plusieurs milliers de cas de calculs [80]. Les calculs de sûreté réalisés en 2004 pour le dossier 2005 ont permis de vérifier la qualité et la robustesse de l'outil puisqu'un nombre minime d'incidents dans la réalisation des calculs a été constaté.

Le développement de la version 2 enrichira les capacités de modélisation d'Alliances avec l'intégration de modules traitant des aspects thermiques et mécaniques et de leur couplage avec l'hydraulique.

La plate-forme pourrait à l'avenir être exploitée dans l'objectif d'une simulation multi-physique. Ce serait alors un outil complet de modélisation, d'analyse et de conception pour l'étude du stockage, voire constituer un appui dans une phase de développement ou de réalisation.

Deux points particuliers sont à mentionner pour la bonne compréhension des résultats de calcul :

- pour faciliter leur lecture, on a présenté certaines courbes sous forme de petites vignettes permettant de ne pas interrompre trop fréquemment le texte. Le lecteur qui souhaite étudier plus en détail telle ou telle courbe en trouvera un récapitulatif sous un format plus grand dans l'annexe du présent tome ;
- dans la présentation des résultats de calcul, les radionucléides à vie longue tels que définis au paragraphe 2.1.7 ont été classés en deux sous-catégories :
 - ✓ des radionucléides de période inférieure à 10 000 ans (couramment appelé à « vie moyenne » dans la suite de la présentation des résultats de calcul),
 - ✓ des radionucléides de période supérieure à 10 000 ans (couramment appelé à « vie longue » dans la suite de la présentation des résultats de calcul).

5.4.2 Performances des fonctions de sûreté : s'opposer à la circulation d'eau

Les performances des fonctions de sûreté peuvent être différentes selon la zone de déchets concernée. De plus, pour les fonctions qui permettent de gérer des flux de radionucléides, les performances peuvent également se différencier selon les propriétés physiques et chimiques de l'élément concerné. Chaque fois que nécessaire, on différencie les performances calculées par type de déchet et par radionucléide. Quand il s'agit d'illustrer une performance générique d'une fonction, on retient par défaut le cas particulier des zones de combustibles CU1 et de l'iode 129 qui induisent l'impact le plus élevé.

5.4.2.1 Une fonction quantifiable par le nombre de Péclet, la proportion de flux diffusifs / convectifs et la répartition des voies de transfert

Outre les dispositions de conception qui visent à limiter l'extension et l'intensité de l'endommagement du Callovo-Oxfordien, le respect de la fonction s'opposer à la circulation d'eau est assurée par :

- les caractéristiques du Callovo-Oxfordien, qui permettent de conserver un système diffusif ;
- des barrières artificielles qui restaurent les propriétés de la formation hôte au niveau des galeries et de la zone endommagée. Les performances hydrauliques des scellements et des bouchons mis en place dans le réseau de galeries doivent permettre de « s'opposer à la circulation d'eau » et par conséquent de conserver un régime diffusif dominant dans le système de stockage. La maîtrise des performances des scellements apparaît donc un élément important pour satisfaire cette première fonction de sûreté.

Différents indicateurs permettent de quantifier les performances associées à la fonction « s’opposer à la circulation d’eau » :

- le nombre adimensionnel théorique de Péclet (Pe) (voir encadré), caractérisant la comparaison des cinétiques de transfert diffusif et convectif. Pour des nombres supérieurs à 2, la convection devient dominante ;
- les indicateurs de flux convectif et diffusif, qui fournissent une comparaison des flux à la sortie des argilites, au droit du stockage ;
- la répartition entre la masse de radionucléides transitant le long et/ou dans les ouvrages constitués par les galeries et les puits et la masse migrant par diffusion dans le Callovo-Oxfordien sain, avant d’atteindre le toit ou le mur de la formation. En effet, un des objectifs essentiels de cette fonction est d’éviter que le système de galeries et de puits ne constitue un chemin préférentiel des radionucléides jusqu’à la biosphère. Compte tenu de la géométrie du stockage (extension horizontale importante par rapport à l’extension verticale), la migration devrait s’effectuer principalement dans la barrière géologique⁶⁷ selon la direction verticale. Les flux de radionucléides sortant du puits après avoir transité dans les ouvrages doivent donc être négligeables devant les flux de radionucléides atteignant le toit du Callovo-Oxfordien après avoir migré dans la barrière géologique.

Encadré 7

Le nombre de Péclet

Le nombre de Péclet théorique est égal au ratio du temps caractéristique de migration diffusif (Td) sur le temps de transfert convectif (Tc).

Pe = (Td/Tc) avec :

$$T_d = L^2 \omega_d / D_e$$

$$T_c = L \omega_c / (K_{\text{barrière géologique}} \cdot \text{grad } H_{\text{vertical}}) \text{ si l'on s'intéresse au flux vertical dans la barrière géologique}$$

$$= L \omega_c / (K_{\text{ouvrage EDZ}} \cdot \text{grad } H_{\text{horizontal}}) \text{ si l'on s'intéresse au flux horizontal dans les ouvrages.}$$

Avec :

- Td, le temps caractéristique de migration par diffusion [an],
- Tc, le temps caractéristique de migration par convection [an],
- L, la distance de migration [m],
- ω_d : la porosité accessible à la diffusion [-],
- ω_c : la porosité cinématique [-],
- De : le coefficient de diffusion effectif [m²/s],
- K : la perméabilité [m/s],
- Grad H : le gradient de charges [m/m].

La Figure 5.4-1 présente les voies de déplacement possibles dans le stockage. Une part du flux se dirige vers les argilites où il migre principalement par diffusion. Cette voie est caractérisée par la mesure des quantités traversant la barrière géologique (Φ BG pour le flux). Une autre partie du flux est susceptible de suivre un cheminement au sein des ouvrages de stockage vers le drain préférentiel que pourrait constituer le puits (Φ puits) (même si les scellements constituent un obstacle).

⁶⁷ On désigne par ce terme la formation hôte, dans le contexte du calcul de performances.

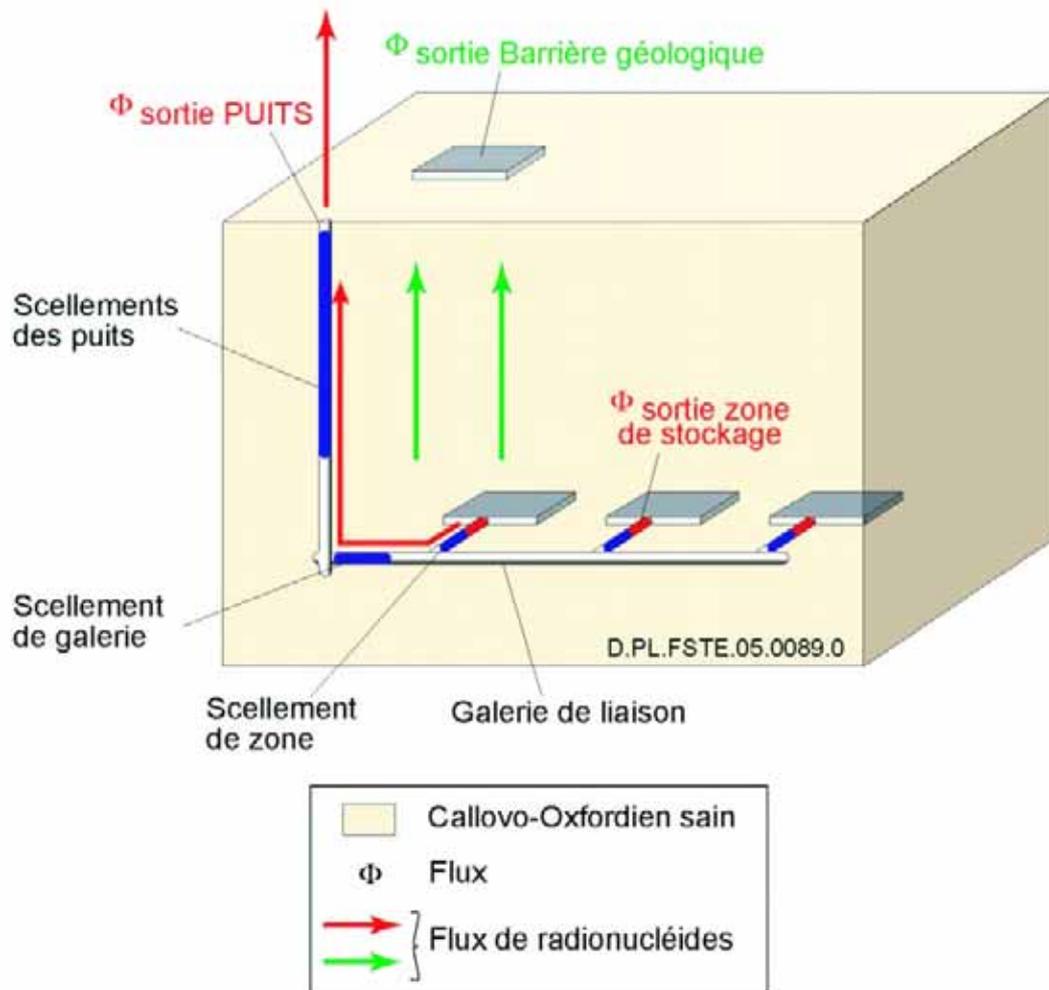


Figure 5.4-1 SEN - Quantification des voies de transfert « ouvrages et puits » et « barrière géologique saine »

5.4.2.2 Des résultats qui confirment un régime diffusif dominant

● Dans le Callovo-Oxfordien

Dans le Callovo-Oxfordien, les indicateurs mettent en évidence que le régime de transfert dominant est effectivement la diffusion.

D'une part, le nombre de Péclet théorique est très inférieur à 2 à la fois pour les anions et les cations (voir Tableau 5.4-1). En effet, le calcul donne les résultats suivants.

<p>Pe (anions) = 0,13</p> <p>Pe (cations) = 0,0096</p>	<p>avec :</p> <p>L = épaisseur de Callovo-Oxfordien sain = 60 m</p> <p>ω_d = porosité accessible à la diffusion = 0,05 (anions) = 0,18 (cations)</p> <p>ω_c = porosité cinématique = 0,09</p> <p>De = coefficient de diffusion effectif = $5 \cdot 10^{-12}$ m²/s (anions) = $2,5 \cdot 10^{-10}$ m²/s (cations)</p> <p>Kv = perméabilité verticale = $5 \cdot 10^{-14}$ m/s</p> <p>grad H = gradient de charge ascendant vertical = 0,4 m/m</p>
---	---

Tableau 5.4-1 Calcul du nombre de Péclet (Pe) dans le Callovo-Oxfordien

D'autre part, le calcul des flux diffusif et convectif, tiré des résultats des simulations numériques, confirme cette dominance du flux diffusif, de près de deux ordres de grandeur (voir par exemple la Figure 5.4-2 et la Figure 5.4-3 : ¹²⁹I anion du colis type CU1). Il est à noter que ces données sont obtenues avec un gradient hydraulique vertical maximal, ascendant, correspondant à un emplacement particulier au sein de la zone de transposition et au modèle hydrogéologique à un million d'années (0,4 m/m).

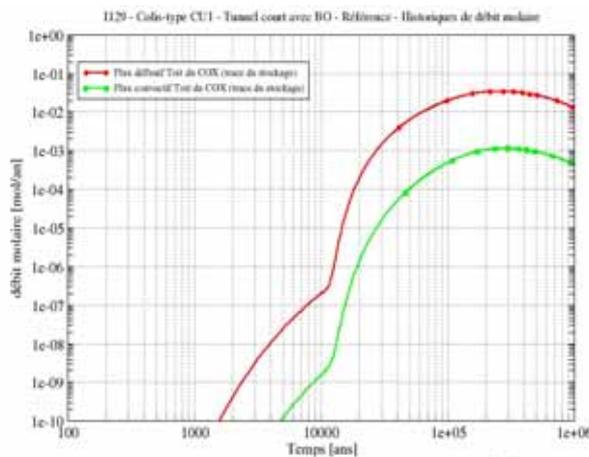


Figure 5.4-2 SEN - Historique de débit molaire au toit de la formation hôte - exemple de l'iode 129 du colis type CU1 (BO = barrière ouvragée, COX = Callovo-Oxfordien)

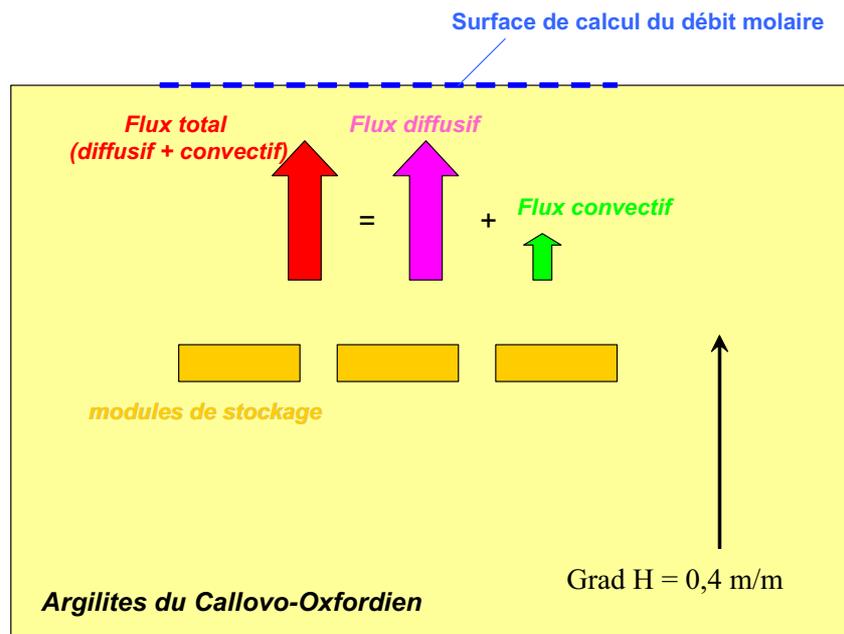


Figure 5.4-3

SEN - Répartition entre les voies de transfert « diffusives » et « convectives »

● Comparaison ouvrages / Callovo-Oxfordien

L'évaluation quantitative de la répartition entre les voies de transfert à travers les ouvrages et le Callovo-Oxfordien sain est menée sur le radionucléide (^{129}I). En effet, ce radionucléide à vie longue soluble et non sorbé permet de bien illustrer les effets de transfert dus à l'hydraulique, puisqu'il est peu sensible à la chimie du milieu. On a retenu le cas des CU1 à titre illustratif, car ils présentent l'inventaire en iode 129 le plus fort. Le calcul met en évidence que la majorité de la masse emprunte finalement la voie de transfert à travers le Callovo-Oxfordien sain. En effet, le calcul conduit aux conclusions suivantes (Figure 5.4-4 et Figure 5.4-5).

La quasi-totalité de la masse relâchée (99,999 %) sort par le toit ou le mur du Callovo-Oxfordien après avoir migré par diffusion dans le Callovo-Oxfordien sain. En effet :

- 41 % de la masse émise par les colis atteint le Callovo-Oxfordien directement après avoir migré dans le corps de l'alvéole ;
- 59 % de la masse émise par les colis atteint les galeries en migrant par diffusion dans les ouvrages situés entre les colis et les galeries d'accès (en particulier le bouchon argileux). Cette répartition correspond à une estimation pénalisante de ce qui peut migrer dans les galeries d'accès. Elle résulte des conditions aux limites (concentration nulle imposée au droit du bouchon) qui induisent un gradient de concentration élevé entre le colis et la galerie d'accès, favorisant alors, à l'échelle de l'alvéole, le transport horizontal à travers le bouchon et le Callovo-Oxfordien endommagé à proximité jusqu'aux galeries d'accès.

Malgré cette hypothèse pénalisante, sur les 59 % atteignant les galeries d'accès aux alvéoles et de liaison internes à la zone de stockage, la quasi-totalité rejoint finalement le Callovo-Oxfordien. En effet, les écoulements dans les galeries sont très lents et limités. La quantité de radionucléides entrant dans la galerie au niveau de l'alvéole migre alors lentement par diffusion (ou co-dominance convective/diffusive aux extrémités des zones). Compte tenu de cette relative immobilité, et de la longueur de transfert (plusieurs centaines de mètres), la quasi-totalité de la masse présente dans la galerie sort par diffusion dans la barrière géologique ; le débit molaire sortant de la zone de stockage est très atténué et correspond à l'influence immédiate de quelques alvéoles, en extrémité de zone de stockage.

En conséquence, une très faible quantité d'iode 129 sort par le puits (environ 3.10^{-5} % de la masse totale injectée) et le débit molaire sortant du puits est inférieur de 6 ordres de grandeur environ à celui

transitant par la barrière géologique saine jusqu'au toit et au mur du Callovo-Oxfordien. Il est de fait négligeable.

La voie de transfert prépondérante est celle par la barrière géologique saine.

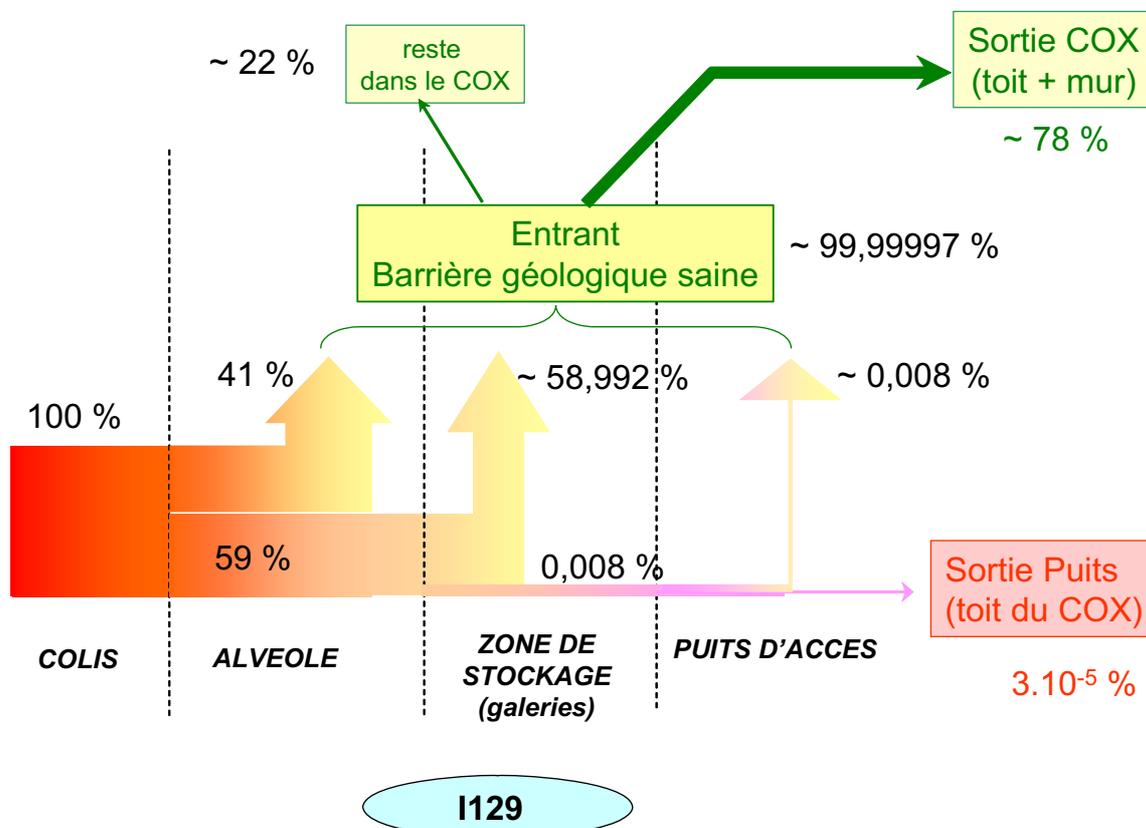


Figure 5.4-4

SEN - Répartition de la masse à travers les différents compartiments de calcul (iode 129 des CUI) (COX = Callovo-Oxfordien)

En outre, la longueur à parcourir à travers les galeries depuis les colis jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien est bien plus importante que l'épaisseur de la formation hôte (plusieurs centaines de mètres contre 60 mètres environ). De ce fait, les dates d'apparition des maxima de débits d'activité au toit du Callovo-Oxfordien apparaissent bien plus tardivement pour la fraction de radionucléides ayant transité dans le système de galeries que pour la fraction ayant migré par le Callovo-Oxfordien.

A titre d'illustration de ce dernier point, la Figure 5.4-5 montre l'évolution en fonction du temps du débit d'activité en différents points du stockage, pour l'ensemble de la zone de combustibles usés UOx (on voit, dans la représentation du relâchement « terme source colis », deux courbes correspondant respectivement au colis défaillant – commençant à 200 ans, et celle due au reste de l'inventaire – commençant à 10 000 ans). On observe bien que les débits en sortie d'ouvrages de scellements ou du puits sont nettement plus tardifs que ceux au toit de la formation hôte, qui apparaissent déjà eux-mêmes tardivement. Les débits en sortie de puits connaissent leur maximum à échéance de 800 000 à 1 million d'années, contre environ 250 000 ans pour la roche.

Il s'agit là directement d'un effet de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau ». Les voies d'accès n'étant pas des chemins privilégiés par rapport à la roche hôte, seule compte la distance à parcourir, plus longue dans leur cas.

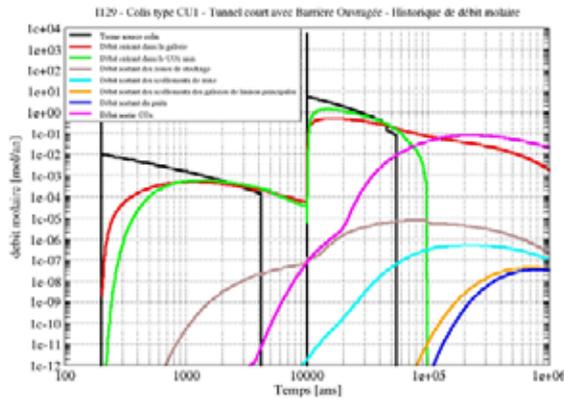


Figure 5.4-5 SEN - Evolution des débits molaires à travers le stockage – ^{129}I – CUI (Cox = Callovo-Oxfordien)

Cette évaluation, réalisée avec un élément non sorbé dans la barrière géologique, couvre également les éléments sorbés dans la formation hôte, de tels éléments ont en effet tendance à migrer préférentiellement dans la roche, pour laquelle ils ont une plus forte affinité.

● Dans les alvéoles

Les évaluations mettent en évidence que le régime au sein des alvéoles de stockage reste diffusif de manière dominante pour tous les colis (voir par exemple la Figure 5.4-6). A titre d'exemple, une évaluation du nombre de Péclet dans les ouvrages a été réalisée pour les combustibles usés CU1. Le nombre de Péclet varie de $7 \cdot 10^{-4}$ à 0,7 en tête d'alvéole, la valeur minimale se situant au niveau du bouchon, la valeur maximale au niveau de la zone fracturée où la perméabilité est la plus élevée. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne des alvéoles, la convection augmente dans les galeries de stockage, par l'effet de la collecte des flux hydrauliques. Le nombre de Péclet atteint 10 en sortie de la zone des combustibles usés, en amont des scelllements de zone. Mais le transfert reste cependant très lent et limité (temps de transfert convectifs et diffusifs de plusieurs centaines de milliers d'années le long des galeries de liaison secondaires).

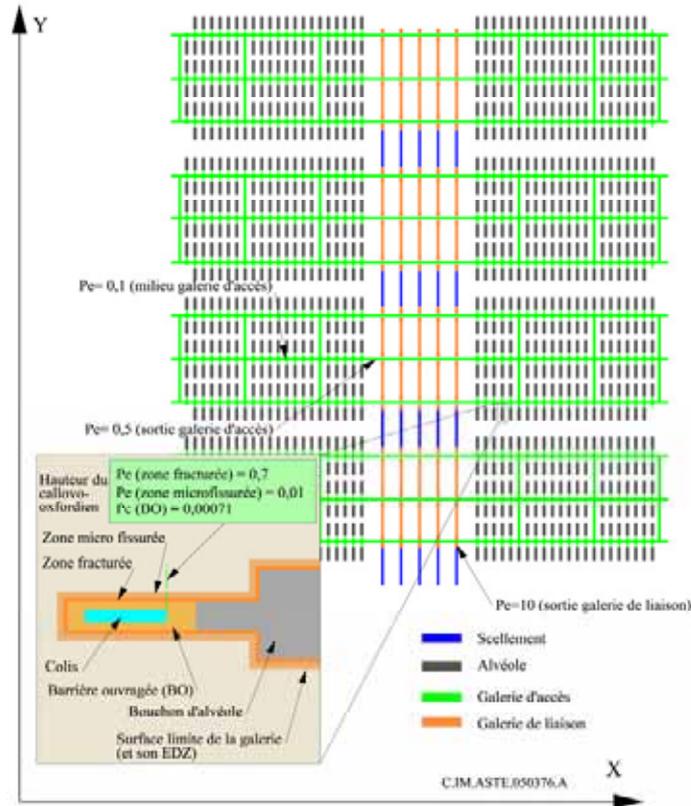


Figure 5.4-6

SEN - Evaluation du nombre de Péclet dans les ouvrages de stockage pour les colis types CUI

5.4.3 Performances des fonctions de sûreté : limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage

5.4.3.1 Les indicateurs possibles pour analyser cette fonction

Les indicateurs pertinents pour évaluer la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » se déduisent des objectifs associés à cette fonction. Il s'agit en effet :

- d'interdire l'arrivée d'eau sur les déchets (C, combustibles usés) de manière à éviter tout relâchement de radionucléides tant que la température des déchets ou du milieu environnant est supérieure au seuil acceptable (voir chapitre 3). L'analyse des conséquences associées au relâchement prématuré des colis de déchets C ou de combustibles usés à la suite d'une défaillance initiale d'un des (sur)conteneurs permet d'évaluer par différence l'intérêt d'une telle disposition à l'échelle d'un colis (le SEA défaut de colis mettra davantage cet aspect en exergue, dans le chapitre 7). Il est en effet possible de comparer les fonctions d'atténuation dans les composants ouvragés situés dans le champ proche des colis, mais également dans la barrière géologique, entre radionucléides relâchés prématurément et radionucléides relâchés au terme de l'étanchéité des conteneurs ;
- de résister au transport des espèces dissoutes au voisinage du verre et du combustible usé ; cette fonction est assurée notamment par la présence de milieux à faible coefficient de diffusion et perméabilité autour des déchets (barrière ouvragée le cas échéant, Callovo-Oxfordien perturbé (EDZ), bouchon...) qui doivent induire un transport diffusif dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés. L'analyse de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » a mis en évidence que l'on se trouvait effectivement en régime diffusif dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés, avec des nombres de Péclet très inférieurs à 1 en tête alvéoles aussi bien au niveau du bouchon que dans la zone micro-fissurée. Il a été pris en compte dans l'analyse, pour des raisons qui ont été expliquées au paragraphe 5.3, la possibilité que quelques bouchons

d'alvéole de déchets C soient défaillants. Le calcul correspondant montre que le régime hydraulique n'est pas modifié dans l'alvéole, du fait de la redondance assurée par les scellements de galeries ;

- de limiter l'altération des déchets et par conséquent le relâchement des radionucléides. Le respect de cet objectif est assuré par des conditions d'environnement thermique, hydraulique, mécanique et géochimique favorables et adaptées à chaque type de déchets. L'intérêt de cette fonction pourra s'évaluer par différence lorsque l'on procédera à des analyses de sensibilité vers des modèles de relâchement plus forts pour les colis de déchets (voir paragraphe 5.4.6.2) ;
- de limiter la mise en solution des éléments relâchés par les colis. La performance de cette partie de la fonction est retraduite dans le modèle par les limites de solubilité qui sont appliquées aux différents radionucléides. Cette fonction joue un rôle pour les radionucléides tels que les actinides, ou le sélénium 79. Ce dernier élément illustre particulièrement bien l'influence de la fonction. En effet, il est a priori très similaire à l'iode, s'agissant dans les deux cas d'anions non sorbés. La principale différence entre eux est que le sélénium a, sous sa forme réduite, une solubilité très faible, au contraire de l'iode. La comparaison des masses de chacun de ces radionucléides qui migrent hors de l'alvéole, ramenées aux masses relâchées, illustre donc bien les effets de la précipitation.

On étudie donc ici, en définitive, ce qu'apporte, vis-à-vis du transfert des radionucléides, la présence des (sur)conteneurs, en étudiant les résultats associés au (sur)conteneur défaillant.

On s'intéressera aussi aux masses de sélénium 79 restant dans le champ proche des alvéoles, en complément.

5.4.3.2 Une fonction apportant un retard efficace à la migration des radionucléides

La défaillance précoce d'un des colis de déchets C et de combustibles usés dès 200 ans en SEN entraîne un relâchement prématuré de radionucléides dans un milieu à forte charge thermique et fort gradient thermique pendant une durée pluriséculaire. Pour les déchets C et les combustibles usés, les conséquences sont pendant la période où la température est élevée avec un fort gradient :

- un relâchement prématuré de radionucléides,
- un transport diffusif plus rapide pendant la phase thermique (coefficient de diffusion élevé),
- la possibilité d'une migration accélérée sous l'effet du gradient de température.

On conduit l'analyse sur les trois radionucléides les moins sorbés (^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se).

Par rapport à la migration commençant après la décroissance thermique, on note une très faible influence du transfert en champs thermique sur l'iode et le chlore en sortie de barrière géologique. L'examen de la Figure 5.4-5 permet de retirer des enseignements dans le cas de l'iode 129 et des combustibles usés CU1, mais les résultats sont identiques pour l'ensemble des colis types de déchets thermiques. On observe que le débit molaire associé au colis défaillant, clairement identifiable dans l'historique de débit molaire associé au contenu de l'alvéole, est quasiment confondu avec celui dû au reste de l'inventaire, en sortie de Callovo-Oxfordien ou en sortie de zone de stockage. En effet, l'avance prise par les radionucléides migrant plus tôt et en ambiance thermique est *in fine* compensée par la diffusion plus rapide des autres radionucléides, pour lesquels les gradients de concentration deviennent rapidement plus forts. De plus, les débits évalués sont de plusieurs ordres de grandeur inférieurs à ceux dus aux colis sains, ce qui montre que même en présence de plusieurs colis défaillants, l'impact resterait dû à la fraction « non défaillante » de l'inventaire.

Ces résultats découlent des valeurs de coefficient de diffusion et de retard en température introduits dans le calcul. Il importe de rappeler que ces valeurs reposent sur les expérimentations conduites à ce jour, qui ont permis de définir des jeux de valeurs jugés représentatifs. Néanmoins, le transport en température est un domaine qui nécessite encore un travail de recherche pour mieux appréhender les mécanismes sous-jacents, et confirmer les évaluations actuelles. Le calcul présenté ici constitue une première approche, qui permet de porter un premier jugement sur le caractère, a priori peu pénalisant, des transferts en température. Il convient cependant, à ce stade des connaissances, de demeurer

prudent. Ces calculs montrant une influence modeste de la fonction « limiter le relâchement des radionucléides » pendant la phase thermique n'invalident pas l'intérêt de cette fonction, qui demeure un élément important de gestion des incertitudes, vis-à-vis de la sûreté à court et moyen terme.

Cette première évaluation sera cependant complétée et précisée au vu d'autres cas de calculs, dans le cadre du scénario d'évolution altérée « défaut de colis », qui permettra de généraliser les résultats présentés ci-dessus.

5.4.3.3 Une fonction permettant d'immobiliser en champ proche les radionucléides

Certains radionucléides, tels que les actinides, sont en partie immobilisés par leur limite de solubilité au sein des alvéoles. Mais les actinides sont également retardés par leur capacité de sorption dans les argilites (fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »). Les actinides ne quittent donc pas le champ proche de l'alvéole, cet effet étant lié en partie à la solubilité, en partie à la sorption.

C'est par conséquent le cas du sélénium 79 qui constitue l'illustration la plus simple des effets de la solubilité, dans la mesure où ce radionucléide est pour sa part non sorbé dans les argilites. La part du sélénium 79 qui reste confinée dans les alvéoles est donc une quantification directe du rôle de la solubilité.

Si on se place, par exemple, dans les alvéoles de combustibles usés CU1 et que l'on s'intéresse à la masse totale de radionucléides ayant réussi à sortir de l'alvéole, on constate que la totalité de l'iode 129 contenue initialement dans les combustibles est parvenue à rejoindre le Callovo-Oxfordien au bout d'un million d'années, alors que 99,4 % du sélénium 79 s'y trouve toujours. Tous les autres paramètres étant égaux pour ces deux radionucléides (qui sont tous deux des anions avec un K_d nul), c'est la limite de solubilité très faible du sélénium 79, et donc son « immobilisation », qui explique cet écart.

5.4.4 Performances des fonctions de sûreté : retarder et atténuer la migration des radionucléides

5.4.4.1 Une fonction quantifiable par les fonctions d'atténuation de la masse et des débits d'activité dans le Callovo-Oxfordien

L'objectif de cette fonction est de retarder et d'atténuer la migration des radionucléides émis par les colis dans le système de stockage. Elle est assurée (voir le chapitre 3) :

- par la formation du Callovo-Oxfordien, qui présente de très bonnes capacités à retenir chimiquement et limiter (faible coefficient de diffusion) le flux de radionucléides. L'épaisseur de garde d'argile importante de part et d'autre des ouvrages (à minima 60 mètres) est garante d'un bon niveau d'atténuation ;
- par les ouvrages (barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés, béton des alvéoles de déchets B, scellements des ouvrages d'accès) en redondance partielle avec la formation hôte. Ces barrières sont mises en place pour satisfaire d'autres fonctions (notamment assurer un environnement chimique favorable, et s'opposer à la circulation d'eau). Mais par conception, elles contribuent également au retard et à l'atténuation du flux de radionucléides. Pour autant, on s'attend à ce que leur contribution demeure minoritaire par rapport à celle du Callovo-Oxfordien.

Les performances associées à la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » dans le stockage sont quantifiables à l'aide de trois grandeurs associées au débit molaire de chaque radionucléide :

- le débit molaire maximal (Φ_{\max}) ;
- la masse (m) correspondant à l'intégrale du « débit molaire » sur la durée de la simulation (1 million d'années) ;
- le temps d'apparition du débit molaire maximal ($t_{\max} = t(\Phi_{\max})$),

Ces trois grandeurs sont illustrées sur la Figure 5.4-7 ; la courbe telle qu'elle est présentée ne constitue qu'un exemple qui ne prétend pas refléter un comportement spécifique de radionucléide, toute courbe d'historique de débit molaire pouvant être caractérisée par les trois grandeurs citées précédemment.

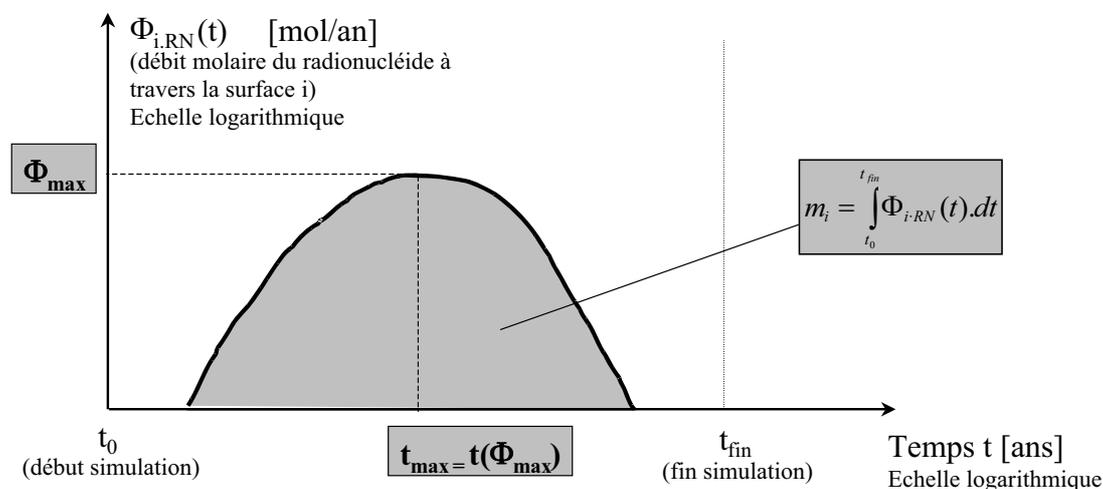


Figure 5.4-7 Grandeurs retenues pour évaluer le retard et l'atténuation

La comparaison des valeurs prises par chacun de ces indicateurs, entre deux surfaces différentes (S_i et S_{i+1}), permet d'évaluer la capacité de confinement des barrières comprises entre ces deux surfaces. On évalue ainsi :

- l'atténuation de la masse des radionucléides qui correspond à la fraction qui ne sort pas de la ou des barrières considérées (en particulier le Callovo-Oxfordien) sur la durée de l'analyse. Elle intègre ainsi la décroissance radioactive des radionucléides dans les barrières résultant des temps de migration plus ou moins long. L'expression de l'atténuation de la masse de chaque radionucléide est : $1 - m_{i+1} / m_i$ ⁶⁸ (ou inversement « m_{i+1} / m_i » si l'on se réfère à la fraction « traversante », c'est-à-dire non atténuée) En règle générale, on prend en référence la masse initialement présente dans les déchets. L'atténuation est alors évaluée dans l'ensemble des composants entre la dernière barrière considérée et le colis ;
- le retard qui correspond à la durée entre les maxima de débit molaire entrant et sortant d'une barrière ; cet indicateur est pertinent notamment pour les radionucléides à vie très longue pour lesquels la décroissance joue peu. Le retard s'exprime par $t_{max\ i+1} - t_{max\ i}$ ⁶⁹ ;
- l'atténuation des maxima de débit molaire qui illustre l'aspect « atténuation » de la fonction. L'expression de l'indicateur est $\Phi_{max\ i+1} / \Phi_{max\ i}$ ⁷⁰ ; il permet d'évaluer l'ordre de grandeur de l'atténuation du débit émis par les colis pour chaque radionucléide.

⁶⁸ Où m_i est la masse traversant la surface S_i pendant la totalité de la durée du calcul

⁶⁹ $t_{max\ i}$ est la date à laquelle le maximum de débit traverse la surface S_i .

⁷⁰ $\Phi_{max\ i}$ est le débit maximum traversant la surface S_i

5.4.4.2 Des résultats qui confirment une bonne capacité à retarder et atténuer la migration des radionucléides

- **Dans le champ proche des alvéoles (barrière ouvragée des combustibles usés, béton des alvéoles de déchets B).**

Avant de se consacrer à la formation hôte, qui est a priori le contributeur principal de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides », on cherche à identifier d'éventuels effets en champ proche, apportés par les composants ouvragés des alvéoles.

En ce qui concerne les combustibles usés, les radionucléides dont le maximum de débit d'activité émis par les colis est le plus atténué dans la barrière ouvragée, sont :

- les éléments fortement sorbés dans la barrière ouvragée, notamment le ^{93}Zr (\rightarrow $^{93\text{m}}\text{Nb}$), le ^{94}Nb , l' $^{166\text{m}}\text{Ho}$, le ^{99}Tc , le ^{126}Sn (coefficient de retard au moins égal à 60 000) ;
- le sélénium 79 non sorbé, mais précipitant dans la barrière ouvragée.

A titre d'exemple, dans le cas particulier des combustibles usés UOx2, les maxima de débit d'activité de ces radionucléides sont atténués a minima de cinq ordres de grandeur dans la barrière ouvragée argileuse.

Pour les déchets vitrifiés, le concept de référence n'est pas muni d'une barrière ouvragée. Compte tenu des caractéristiques géochimiques très similaires entre la roche hôte et l'argile gonflante, on ne s'attend à aucune différence significative, du point de vue du transfert en champ proche, entre le concept de référence et la variante avec barrière ouvragée. Aussi, dans le champ proche des alvéoles, les radionucléides dont le maximum de débit molaire émis par les colis est le plus atténué sont les mêmes que pour les combustibles usés (^{93}Zr (\rightarrow $^{93\text{m}}\text{Nb}$), le ^{94}Nb , l' $^{166\text{m}}\text{Ho}$, le ^{99}Tc , le ^{126}Sn) ; à environ 7 mètres dans le Callovo-Oxfordien (distance choisie conventionnellement pour les commodités de calcul), leur débit molaire est totalement atténué. A titre d'exemple, pour les colis types C2 et à cette même distance, les radionucléides les plus mobiles (^{129}I et ^{36}Cl) présentent des maxima de débits molaires atténués de deux ordres de grandeur environ.

En ce qui concerne les déchets B, les atténuations dépendent des modèles de relâchement des déchets qui varient significativement d'un colis type à l'autre. Néanmoins, on note, comme pour les combustibles usés que les radionucléides les plus atténués sont les éléments sorbés dans le béton (^{93}Zr \rightarrow $^{93\text{m}}\text{Nb}$, ^{94}Nb , ^{129}Sn , ^{59}Ni , ^{14}C , ^{41}Ca). A titre d'exemple, l'atténuation du maximum de débit molaire des radionucléides cités précédemment entre la sortie des colis et la sortie de l'alvéole est au minimum de cinq ordres de grandeur pour les boues bitumées dont le modèle de relâchement est inversement proportionnel à la racine carré du temps.

- **Dans la barrière géologique**

L'évaluation des performances associées à la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » fait nettement apparaître le Callovo-Oxfordien comme une barrière diffusivité. Les caractéristiques des scellements, du Callovo-Oxfordien et la géométrie du stockage contribuent conjointement à induire la prédominance d'un transport diffusif vertical des radionucléides à travers le Callovo-Oxfordien depuis les colis jusqu'aux encaissants. Le stockage étant supposé situé au milieu du Callovo-Oxfordien, la répartition entre les flux ascendants et descendants est quasi-équivalente.

L'atténuation de la masse (par rapport à la masse initiale) et le retard des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien sont des indicateurs adaptés pour évaluer les performances de la fonction « retarder et atténuer ». L'analyse des résultats met en évidence que ces indicateurs dépendent peu des colis et des concepts étudiés, ces derniers apportant un gain en terme d'atténuation qui reste limité au regard des performances du Callovo-Oxfordien. Leur objectif n'est en effet pas d'apporter un retard et une atténuation complémentaire aux transferts par la roche, mais de participer à la gestion des incertitudes (par les conteneurs par exemple, il s'agit d'empêcher la migration en ambiance thermique).

Le Tableau 5.4-2 présente, pour les radionucléides étudiés, les principales caractéristiques qui conditionnent leur comportement dans la barrière géologique : période de décroissance, forme ionique, solubilité, coefficient de retard.

Radionucléides	Période de décroissance radioactive [ans]	Forme ionique	Solubilité dans le Callovo-Oxfordien [mol/m ³]	Coefficient de retard dans le Callovo-Oxfordien [-]	
				Retard à 25°C	Retard si ΔT > 20 °C*
³⁶ Cl	302 000	Anion	Soluble	1	
⁷⁹ Se	65 000	Anion	5.10 ⁻⁷	1	
¹²⁹ I	15 700 000	Anion	Soluble	1	
¹⁴ C	5 730	Anion	2,3	5,6	
⁴¹ Ca	103 000	Cation	2,3	16	2,5
⁹³ Mo	3 500	Anion	1.10 ⁻⁵	139	
⁵⁹ Ni	75 000	Cation	5.10 ⁻²	2 050	
¹³⁵ Cs	2 300 000	Cation	Soluble	Langmuir**	
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	Cation	4.10 ⁻⁴	8 950	
⁹³ Zr	1 530 000	Cation	2.10 ⁻⁵	12 800	
¹⁰ Be	1 600 000	Cation	10 ⁻²	31 900	3 200
^{93m} Nb	16,4	Anion	2.10 ⁻⁴	53 400	
⁹⁴ Nb	20 300	Anion	2.10 ⁻⁴	53 400	
⁹⁹ Tc	213 000	Cation	4.10 ⁻⁶	128 000	
¹²⁶ Sn	100 000	Cation	1.10 ⁻⁵	179 000	
^{166m} Ho	1 200	Cation	1.10 ⁻⁴	639 000	

Sur fond jaune : radionucléide totalement atténués dans la première dizaine de mètres de Callovo-Oxfordien.

Sur fond vert : radionucléide totalement atténué à la sortie du Callovo-Oxfordien.

* : Retard si Δt > 20°C : pour les zones de déchets exothermiques, des coefficient de retard spécifiques « en température » ont été attribués aux radionucléides pour lesquels la thermique induit une influence significative sur la valeur du coefficient de retard [67]. Ainsi, dès lors que l'écart de température du milieu entre le moment initial et la date de migration des radionucléides (au niveau de chaque maille) est supérieure à 20°C, on définit une valeur spécifique de coefficient de retard.

** : Langmuir : $K_d = (1,85 \cdot 10^{-7}) / (4,76 \cdot 10^{-7} + C_{eq})$ avec C_{eq} : concentration en solution (mol/l)

Tableau 5.4-2 SEN - Principales caractéristiques des radionucléides mobilisées dans le Callovo-Oxfordien

L'évaluation de l'atténuation issue des calculs met en évidence que :

- à une dizaine de mètres dans le Callovo-Oxfordien environ 50 % des radionucléides étudiés sont totalement atténués :
 - ✓ les éléments très fortement sorbés dans la barrière géologique : ¹⁰Be, ⁹⁴Nb, ⁹⁹Tc, ¹²⁶Sn, ^{166m}Ho ;
 - ✓ les radionucléides à vie moyenne et suffisamment sorbés (⁹³Mo) ;

- au toit du Callovo-Oxfordien, la majorité des radionucléides est totalement atténuée. En plus des radionucléides cités précédemment, l'atténuation est totale pour :
 - ✓ les cations à vie longue fortement sorbés : ^{59}Ni , ^{135}Cs , ^{107}Pd et $^{93}\text{Zr} \rightarrow ^{93\text{m}}\text{Nb}$;
 - ✓ le ^{14}C , anion soluble à vie moyenne et faiblement sorbé qui bénéficie de la décroissance radioactive.

Seuls les anions non sorbés (^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se) et le cation faiblement sorbé (^{41}Ca) présentent un flux non négligeable au toit du Callovo-Oxfordien (voir Tableau 5.4-3).

Radionucléides	Phénomène contribuant à l'atténuation	Atténuation de la masse à la sortie du Callovo-Oxfordien (toit + mur)	
		Déchet C / combustibles usés	Déchets B
^{14}C	Diffusion	Atténuation totale (100 %)	
^{93}Mo	Diffusion et sorption		
^{10}Be	Sorption		
$^{93\text{m}}\text{Nb}$			
^{94}Nb			
^{99}Tc			
^{126}Sn			
$^{166\text{m}}\text{Ho}$			
^{135}Cs			
^{107}Pd			
^{59}Ni			
^{93}Zr			
^{79}Se	Diffusion et précipitation	> 99.95 %	
^{41}Ca	Diffusion et sorption	90 – 95%	> 99% environ
^{36}Cl	Diffusion	65 – 75 %	> 70% environ
^{129}I		20 – 30 %	> 50 % environ
Sur fond jaune : Radionucléides totalment atténués dans les 10 premiers mètres de Callovo-Oxfordien Sur fond vert : Radionucléides fortement atténués dans les 10 premiers mètres de Callovo-Oxfordien			

Tableau 5.4-3 SEN - Atténuation des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien.

Par ailleurs, pour les quatre éléments non totalement atténués (^{129}I , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{79}Se), on note que :

- l'atténuation est légèrement plus importante pour les déchets C que pour les combustibles usés. Cette différence résulte :
 - ✓ d'une part, de l'effet de la thermique plus important pour les combustibles usés (gradient de température et champ de température) que pour les déchets C, accélérant ainsi légèrement la diffusion ;
 - ✓ d'autre part, du modèle de relâchement du verre dont la durée (300 000 ans environ) est significative devant le temps de transfert diffusif ;
- l'atténuation des déchets B est également plus importante que celle des déchets C et des combustibles usés. Cette différence résulte d'une part de la thermique (absente pour les déchets B), d'autre part, pour certains radionucléides (^{129}I et ^{41}Ca notamment) de la sorption dans le béton qui a pour effet de retarder leur transport, dès le stade des alvéoles de déchets B. Ces effets concourent tous deux à induire une atténuation légèrement plus importante pour les concepts de déchets B que pour les concepts de déchets C et de combustibles usés.

Parmi tous les radionucléides présents dans les colis, seuls les quatre cités dans le tableau précédent ne sont pas totalement atténués. On verra par la suite que le calcium 41 présente un impact négligeable. On fournit ci-après, à titre d'exemple pour les colis types CU1, C1/C2 et B2, les dates de sortie du Callovo-Oxfordien, correspondant au débit maximal de ^{129}I , ^{36}Cl et ^{79}Se (voir Tableau 5.4-4). Les propriétés de diffusion dans le Callovo-Oxfordien sont suffisamment bonnes pour retarder fortement l'apparition du maximum de débit molaire à la sortie de la formation, à l'échelle de 200 000 ans environ. Le chlore 36 et l'iode 129 ont un comportement similaire (anions solubles non sorbés). L'iode 129 a une période longue au regard des temps de transfert diffusif ($1,57 \cdot 10^7$ ans), et ne décroît donc que très peu pendant sa migration. La date d'apparition de son maximum en sortie de formation hôte, 260 000 ans, pour les colis CU1 est donc directement l'expression de son temps de transfert. Le chlore 36, en revanche, décroît pendant sa migration (sa période est de 300 000 ans). La date d'apparition de son maximum de débit, 180 000 ans, est donc plus précoce que pour l'iode, car elle combine les effets dus à la migration et ceux dus à la décroissance radioactive.

Colis types	Radionucléides	Dates des maxima de débit molaire au toit du Callovo-Oxfordien [ans]
CU1	^{129}I	260 000
	^{36}Cl	180 000
	^{79}Se	400 000
C1/C2	^{129}I	460 000
	^{36}Cl	380 000
	^{79}Se	750 000
B2	^{129}I	465 000
	^{36}Cl	200 000
	^{79}Se	165 000

Tableau 5.4-4 SEN – dates d'apparition des maxima de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien pour les trois principaux contributeurs à l'impact

5.4.4.3 Synthèse sur les fonctions de sûreté

A ce stade de l'analyse, il est possible de porter une appréciation sur la performance des fonctions de sûreté. On constate que :

- la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » est assurée efficacement, puisque les voies d'accès au stockage ne constituent pas des voies de migration préférentielles. Les études de sensibilité et les calculs de scénario d'évolution altérée permettront d'en apprécier la robustesse en testant la contribution respective des scellements, de la formation hôte et de l'architecture en cul-de-sac ;
- la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » permet la rétention des éléments ayant une faible solubilité, dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés. Par ailleurs l'intérêt de la fonction vis-à-vis de la gestion des transferts thermiques est importante sur le plan qualitatif (gestion des incertitudes dans ce domaine), mais ne trouve pas sa traduction en termes de limitation de l'impact, avec les données actuellement utilisées ;
- la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » met en évidence l'importance prépondérante de la formation hôte, qui limite à quatre (en fait deux principaux) les radionucléides qui peuvent effectivement sortir, au bout de plus de 150 000 ans. Du fait de sa (faible) capacité à sorber l'iode, le béton des alvéoles B a un rôle visible. La barrière ouvragée argileuse des combustibles usés n'apporte pas en situation normale d'efficacité supplémentaire par rapport à une épaisseur équivalente d'argilites.

Les radionucléides sortis du système de stockage peuvent induire un impact, qui est présenté dans le paragraphe suivant.

5.4.5 Résultats associés à l'impact

5.4.5.1 Le transport dans les formations encaissantes

Aucune fonction de sûreté n'est attribuée aux formations encaissantes situées au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, qui constituent simplement des voies de transfert jusqu'aux exutoires potentiels pour les radionucléides qui les auraient atteintes.

On commence par présenter le transport dans le cadre du modèle géoprospectif à 1 million d'années. Dans un deuxième temps, sont exposés les résultats correspondant au modèle envisageant la configuration actuelle des encaissants.

● Modèle de transfert dans les encaissants dans 1 million d'années

La Figure 5.4-8 et la Figure 5.4-9 rappellent la position des trajectoires et des exutoires ainsi que les temps de transfert convectif jusqu'aux exutoires potentiels, pour les encaissants supérieurs ou inférieurs.

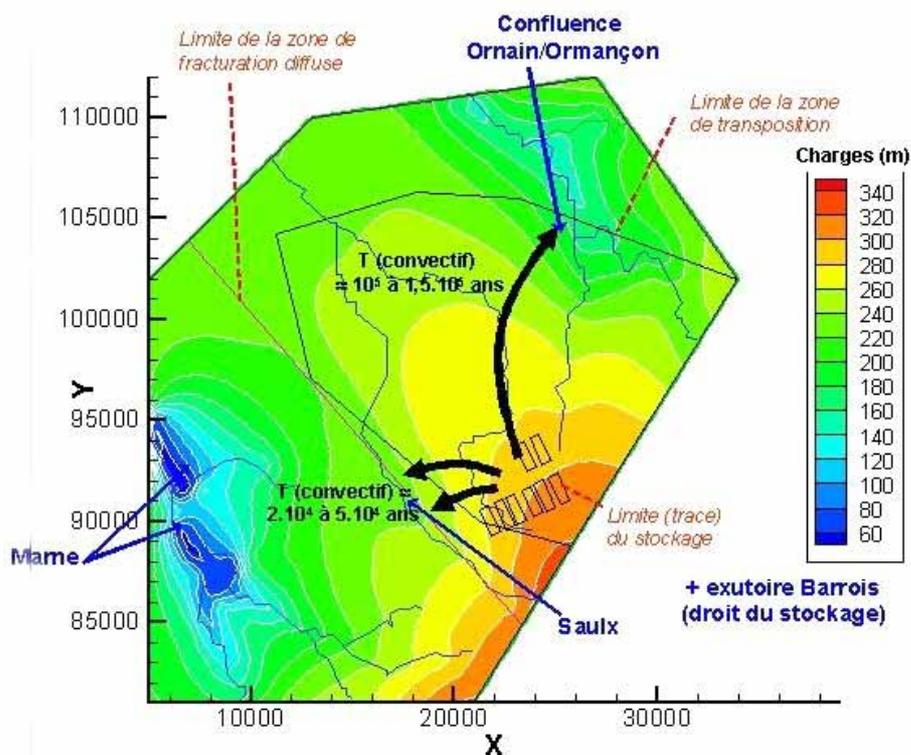


Figure 5.4-8

SEN – Piézométrie (charges hydrauliques en mètres NGF⁷¹) et principales trajectoires convectives dans l'Oxfordien, et temps de transfert convectifs jusqu'aux exutoires dans le schéma géoprospectif à 1 million d'années

⁷¹ Les mètres NGF, utilisés par commodité dans les calculs servent à quantifier les charges hydrauliques. Ils désignent l'altitude de la surface d'une nappe phréatique qui aurait la même charge que le point considéré.

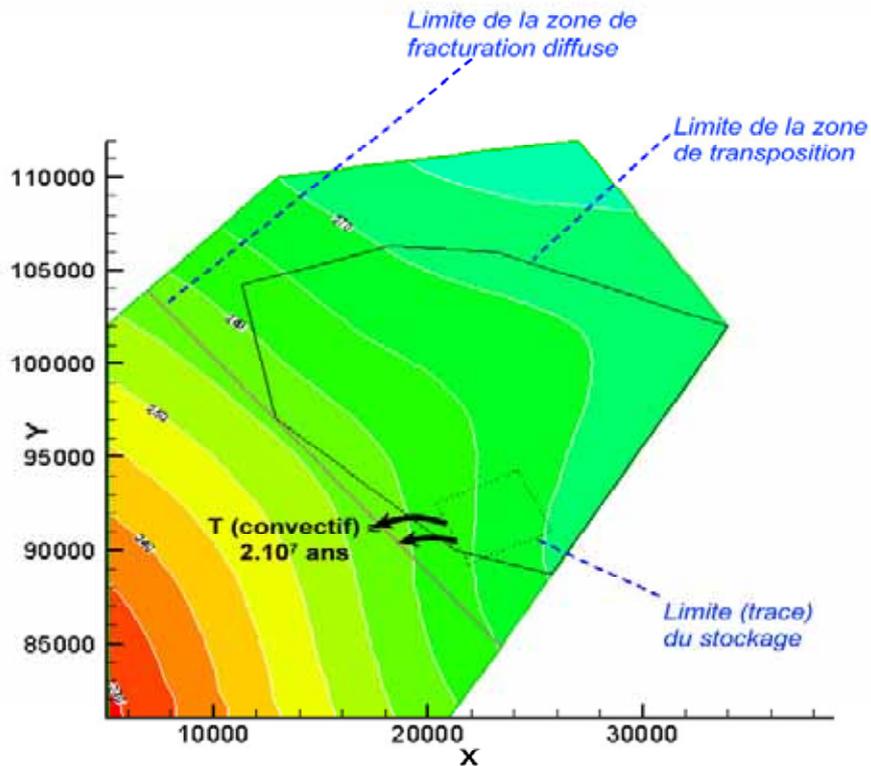


Figure 5.4-9 SEN - Trajectoires convectives dans le Dogger et localisation de l'exutoire

Les temps de transfert convectifs jusqu'aux exutoires Saulx et Ornain sont de l'ordre de :

- 20 000 à 50 000 ans pour l'exutoire Saulx. Ces temps de transfert convectif renvoient à la faible distance du stockage à l'exutoire et ne sont pas de nature à engendrer une dilution et une dispersion importante dans les encaissants (on rappelle que l'exutoire a été placé près du stockage, précisément dans cet objectif) ;
- 100 000 ans pour l'exutoire situé dans la vallée de l'Ornain.

La Figure 5.4-10 illustre les panaches de concentration à différentes dates, dans les horizons poreux de l'Oxfordien Hp1-Hp4 pour l'iode 129 des combustibles usés CU1. Elle montre dans cette coupe horizontale les deux voies de transfert (l'une vers la zone de fracturation diffuse, l'autre vers l'Ornain), en adéquation avec la Figure 5.4-8. La voie de transfert vertical Evers le Barrois n'est pas représentée. On observe sur cette figure des gradients de concentration relativement faibles dans l'Oxfordien, entre la localisation du stockage et les exutoires ; ces résultats confirment le fait que le transport dans les encaissants jusqu'aux exutoires n'induit pas de dilution notable de la masse sortant du Callovo-Oxfordien au droit du stockage.

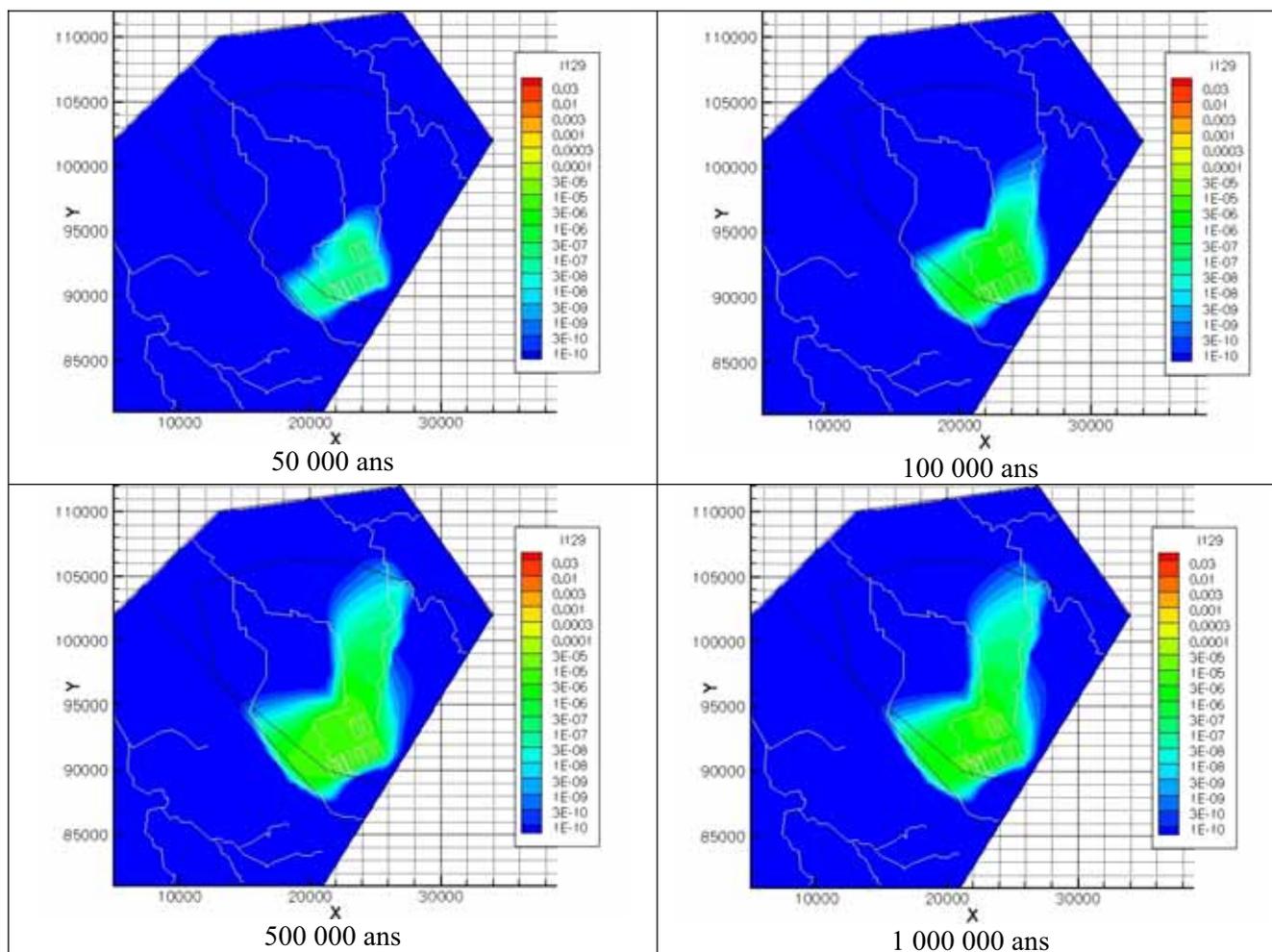


Figure 5.4-10 SEN - Panaches de concentration molaire de l'iode 129 (mol/m^3) dans le niveau poreux représentant Hp1-Hp4 (coupe horizontale) à différentes dates – CU1

Pour cette zone de stockage, la répartition entre la masse atteignant les exutoires Saulx et Ornain/Barrois est respectivement de l'ordre de 55 % et 45 %. Compte tenu des faibles temps de transfert et de la faible dilution pour l'exutoire Saulx, ce dernier correspond à l'exutoire qui engendre l'impact le plus élevé (au moins un ordre de grandeur par rapport aux autres exutoires).

La répartition de la masse entre les deux exutoires dépend des zones de déchets considérées. En effet, elle est fonction de l'emplacement, mais également de l'extension géométrique de la zone de stockage. Les zones étant supposées toutes localisées au niveau du site du laboratoire de Meuse /Haute-Marne, seule leur taille influe dans le calcul. L'analyse des résultats montre que, pour les zones de stockage dont l'extension géométrique est faible (déchets B et C0), aucun impact n'apparaît à l'exutoire Ornain car l'extension du panache dans l'Oxfordien n'est pas suffisante pour être interceptée par les trajectoires hydrauliques qui s'y rendent. Pour les autres zones de stockage, d'extension intermédiaire (autres déchets C, combustible CU2 ou CU3), la répartition montre une dominance de l'exutoire Saulx par rapport aux autres.

Les illustrations de la Figure 5.4-11 fournissent un exemple pour le colis type CU1 :

- des débits molaires en fonction du temps pour les trois principaux radionucléides dominant l'impact : ^{129}I , ^{36}Cl et ^{79}Se , ainsi que le relâchement (« terme source colis ») (1 colis défailant et les autres colis non défailants) ;
- de la quantité normée (par rapport à la quantité initiale) de radionucléides ayant transité à travers les principaux composants depuis le colis jusque vers les exutoires, à un million d'années,

permettant de mesurer à la fois les capacités d'atténuation et la répartition de l'activité radiologique à cette date. Par exemple, pour l'iode 129 des colis types CU1, on note qu'à un million d'années la quasi-totalité de la masse entrant dans les premiers horizons de l'Oxfordien C3a-C3b (auxquels on n'a pas attribué de propriétés géochimiques dans le calcul) est restituée dans les horizons poreux Hp1-Hp4. Un peu plus de la moitié de cette masse (soit environ 22 %) arrive à proximité de la zone de fracturation diffuse après transfert dans les horizons poreux et inter-poreux (exutoires Saulx et Marne), le reste (environ 18 %) empruntant la voie de transfert vers l'exutoire Ornain et vers les formations sus-jacentes (exutoire Barrois).

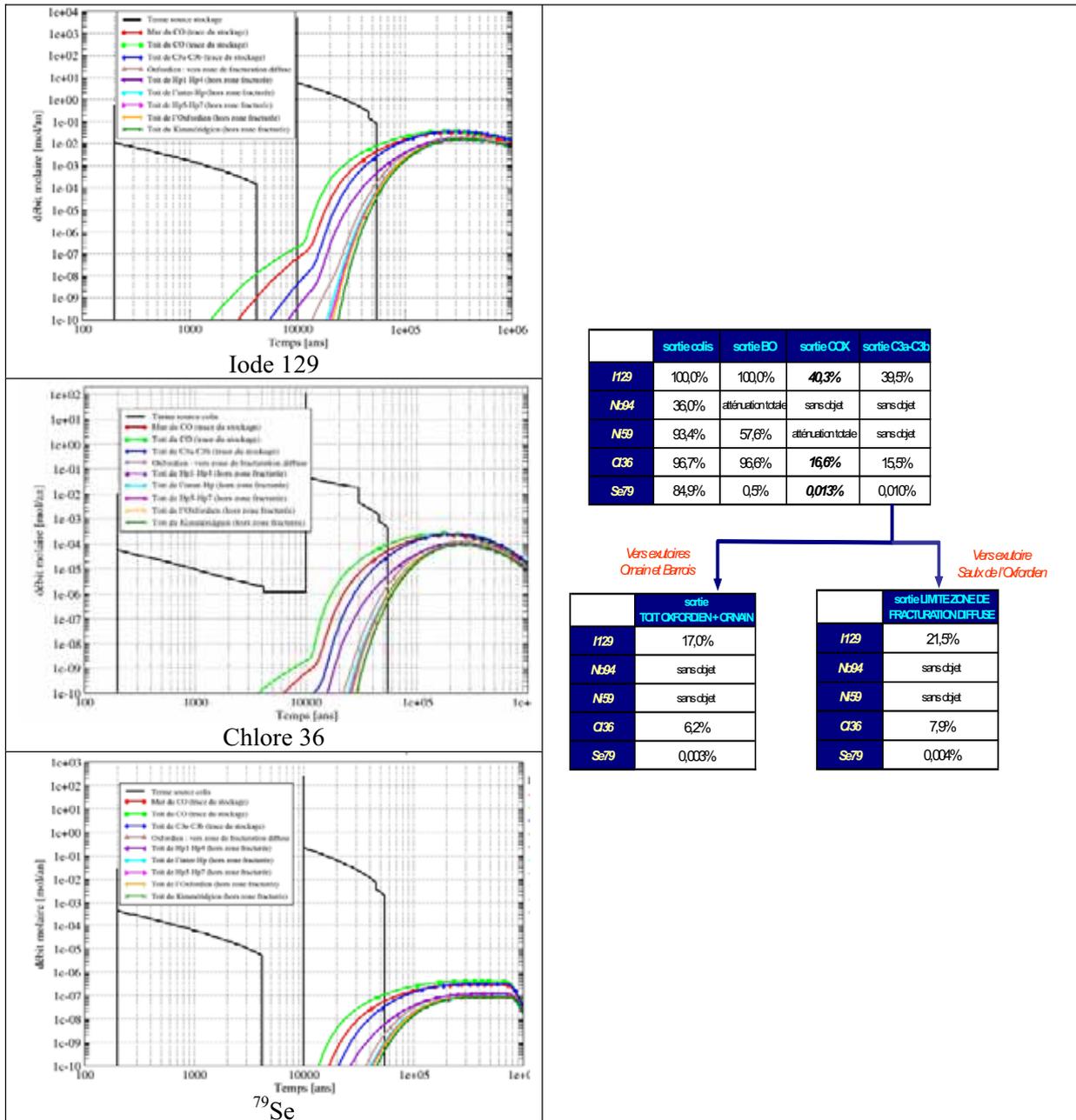


Figure 5.4-11

SEN - Colis type CUI - Historiques de débit molaire à travers différentes surfaces du milieu géologique et quantification de l'atténuation des différentes formations pour le modèle à 1 million d'années

Dans le Dogger, (voir exemple à la Figure 5.4-12) l'essentiel de la masse migre par diffusion vers le bas. L'analyse des débits molaires montre que 0,03 % de la masse transite dans la couche de plus forte perméabilité (10^{-8} m/s) jusqu'au niveau de l'exutoire conventionnel. Cette couche transmissive présente une épaisseur trop faible (5 mètres) par rapport à ses encaissants immédiats (Dogger terminal et basal) de plus faible perméabilité (10^{-10} m/s) pour constituer un drain préférentiel des radionucléides. Les temps de transfert convectif dans le Dogger sont très longs, les maxima de débits molaires eux-mêmes faibles n'apparaissant qu'au-delà de l'échéance du million d'années.

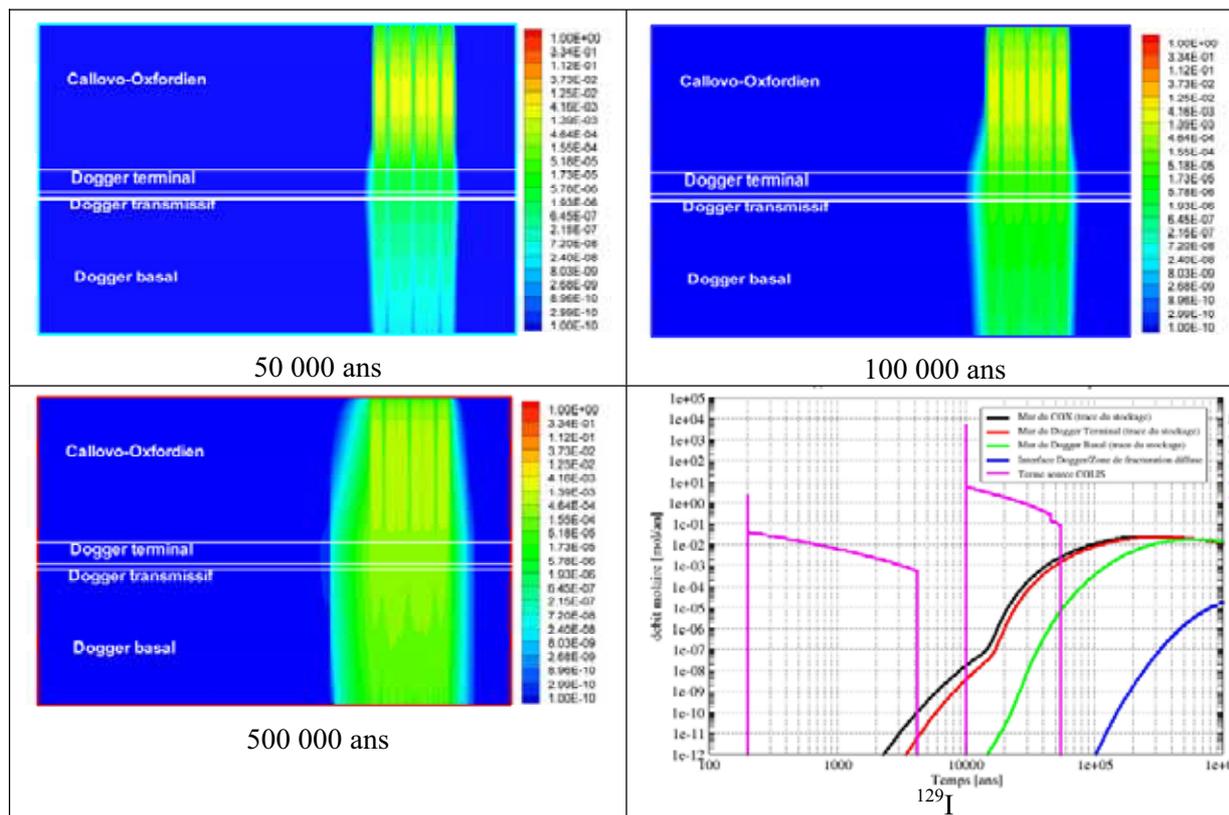


Figure 5.4-12 SEN - Panaches de concentration dans les différents horizons du Dogger (coupe verticale) à différentes dates et historiques de débit molaire à travers les différentes surfaces ^{129}I – modèle Dogger- colis- type CU1

● Modèle de transfert dans les encaissants « actuel »

On compare maintenant les résultats obtenus précédemment à ceux qui résulteraient de l'utilisation d'un modèle « actuel ». On observe que la modification du gradient vertical dans le Callovo-Oxfordien avec le modèle actuel (0,2 m/m au lieu de 0,4 m/m) n'induit aucune différence dans le transfert jusqu'au toit de la formation hôte, le transfert est dans les deux cas diffusif. On verra que les résultats sont in fine peu sensibles au modèle hydrogéologique retenu.

Si on considère le modèle d'écoulement « actuel », on observe que, par différence avec le modèle à 1 million d'années :

- une fraction faible de radionucléides (dans le cas de l'iode, 5 % de ce qui part vers l'exutoire Saulx) se dirige vers la Marne avec des temps de transfert a priori plus importants (de l'ordre de 300 000 ans si les trajectoires vont jusqu'à la Marne, mais elles sont interrompues avant de manière conventionnelle dans le modèle, au niveau de la zone de fracturation diffuse) ;
- une fraction des radionucléides (environ 0,1 % de l'inventaire total dans le cas de l'iode) part dans une direction régionale, non associée à un exutoire. On notera que, même si ces éléments étaient

rabattus conventionnellement vers l'exutoire le plus proche (la Saulx, ce qui ne correspond à aucune réalité physique), les ordres de grandeur de l'impact ne seraient pas modifiés ;

- le temps de transfert convectif dans l'Oxfordien calcaire depuis le toit du stockage jusqu'à l'exutoire Saulx (seul exutoire identique pour les deux modèles) est plus court dans le modèle à 1 million d'années que dans le modèle à l'actuel (voir Figure 5.4-13). Cela se traduit par des maxima de débit molaire décalés d'un peu moins de 100 000 ans au niveau de la zone de fracturation diffuse (exutoire Saulx) (voir Figure 5.4-14),
- l'exutoire Ornain n'existe pas dans le modèle dit « à l'actuel ».

Les différences entre les deux modèles apparaissent in fine peu significatives dans le cas du positionnement du stockage sur le site conventionnel du laboratoire.

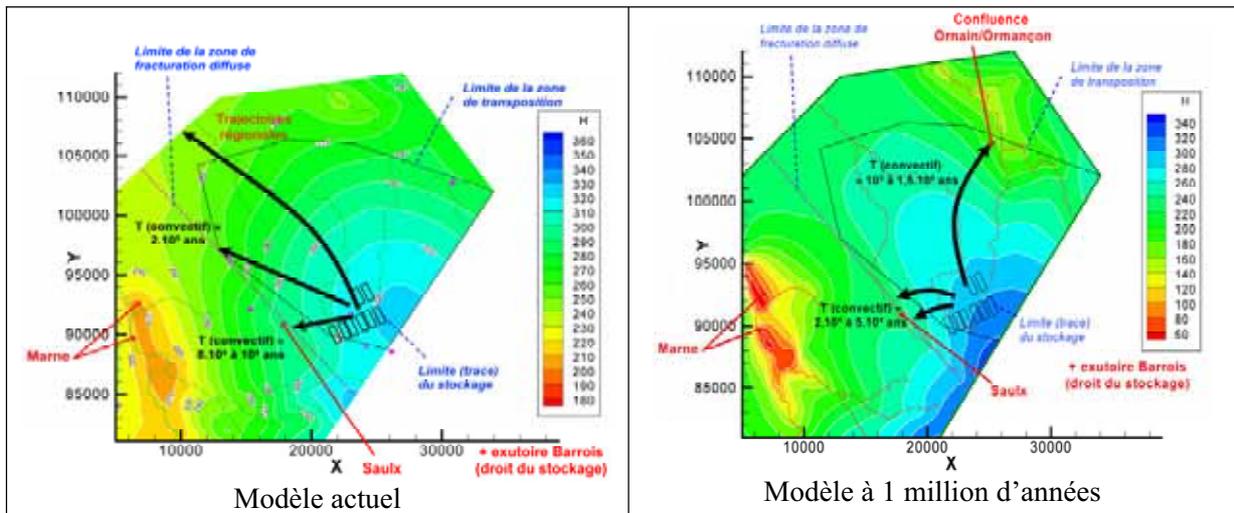


Figure 5.4-13 SEN - Sensibilité au modèle hydrogéologique - cartographie hydraulique des charges ($H = \text{charge hydraulique en mètres NGF}^{71}$) dans Hp1-Hp4 et exutoires associés

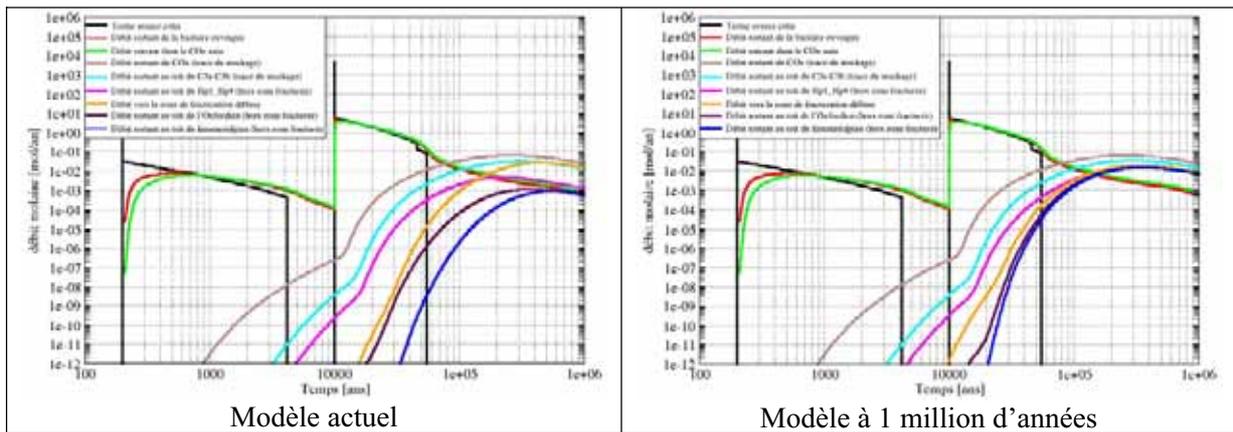


Figure 5.4-14 SEN - Colis type CUI – ^{129}I - historique de débit molaire dans les deux configurations du modèle hydrogéologique

5.4.5.2 Un impact radiologique sur le groupe critique conforme aux recommandations de la RFS III.2.f avec des dates de maxima tardives

La dose liée aux radionucléides sortant du Callovo-Oxfordien est évaluée aux exutoires identifiés au paragraphe 5.3.2.5, et pour le groupe critique décrit dans le paragraphe 5.3.2.6.

On note pour l'ensemble des colis que, dans la version du modèle hydrogéologique « à un million d'années » (voir Tableau 5.4-5 et Tableau 5.4-6) :

- l'exutoire Saulx est celui où l'on constate les doses les plus importantes. Les exutoires retenus dans l'Ornain et au Barrois donnent des impacts bien inférieurs ;
- le niveau d'impact très faible dans le Barrois s'explique par le caractère diffusif du transport, et par l'étalement qui y est associé ;
- les colis types pour lesquels l'extension géométrique du stockage est faible (déchets B et C0), n'engendrent pas d'impact à l'exutoire Ornain ;
- pour les radionucléides non totalement atténués dans le Callovo-Oxfordien, les deux principaux contributeurs sont l'iode 129 et le chlore 36 et dans une moindre mesure le sélénium 79 qui bénéficie de la décroissance radioactive. Le calcium 41 présente une dose négligeable pour l'ensemble des colis de déchets (inférieure à 10^{-12} Sv/an), ce dernier ayant un facteur de conversion très faible.

Les résultats montrent que les dates des maxima de dose apparaissent au-delà de 290 000 ans. A l'exutoire Saulx, ces dates retraduisent directement les temps de transferts induits par la barrière géologique. Les temps caractéristiques de migration par convection dans l'Oxfordien calcaire jusqu'à cet exutoire sont en effet courts devant les temps de migration dans la formation hôte, de sorte qu'ils n'amènent pas de décalage significatif complémentaire à l'apparition du maximum de dose.

Soulignons que l'addition des différents impacts ne rend pas compte d'une situation réelle puisqu'elle revient à compter deux fois le même inventaire (on ne peut pas avoir à la fois les verres C1/C2 et C3/C4 en quantité maximale dans l'inventaire). Quoi qu'il en soit, on verra que, même avec ce biais, les estimations globales demeurent inférieures à la contrainte de dose.

On donne dans le tableau ci-dessous les doses pour l'ensemble des exutoires du modèle à un million d'années, avec les dates associées. On présente séparément l'exutoire Saulx, le plus pénalisant. Les autres exutoires sont présentés à la suite.

Colis-types	Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs
Exutoire « Saulx » (le plus pénalisant)			
B1x - (colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène)	0,00033	310 000	³⁶ Cl (¹²⁹ I dans une moindre mesure)
B1h - (colis non organiques pouvant dégager de l'hydrogène)	0,000031	290 000	³⁶ Cl
B2 - (boues bitumées)	0,000021	370 000	¹²⁹ I ; ³⁶ Cl
Autres déchets B	0,00009	310 000	³⁶ Cl (¹²⁹ I dans une moindre mesure)
Total des déchets B (scénario S1b)	environ 0,00047	vers 300 000	³⁶Cl (¹²⁹I dans une moindre mesure)
Verres C0	0,0000032	340 000	¹²⁹ I
Verres C1 et C2	0,00047	490 000	¹²⁹ I ; ³⁶ Cl
Verres C3 et C4	0,00036	500 000	¹²⁹ I ; ³⁶ Cl
Total des déchets C (scénario S1b pour C0/C1/C2 et S1b pour C3/C4)	environ 0,00083	490 000	¹²⁹I ; ³⁶Cl
Combustibles usés CU1	0,019	330 000	¹²⁹ I
Combustibles usés CU2	0,0017	340 000	¹²⁹ I
Combustibles usés CU3	0,000067	330 000	¹²⁹ I
Total des combustibles usés (scénario S2)	environ 0,02	vers 330 000	¹²⁹I

Tableau 5.4-5

SEN – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien (cas le plus pénalisant) – modèle à 1 million d'années – tous déchets

Autres exutoires :

Colis-types	Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs
Exutoire « Ornain » en référence			
Total déchets B	Pas d'exutoire Ornain		
Total déchets C [C1/C2 et C3/C4] (Pas d'exutoire Ornain C0)	Environ 0,000002	660 000	¹²⁹ I ; ³⁶ Cl
Total combustibles usés (sans CU3) ⁷²	0,0006	vers 500 000	¹²⁹ I
Exutoire « Barrois »			
Total déchets B	Environ 0,000013	vers 300 000	³⁶ Cl (¹²⁹ I dans une moindre mesure)
Total déchets C	0,0000055	500 000	¹²⁹ I ; ³⁶ Cl
Total combustibles usés (sans CU3) ⁷²	Environ 0,000099	vers 530 000	¹²⁹ I
Exutoire « Dogger »			
Total déchets B	Toutes doses < 10 ⁻⁷ mSv/an		Sans objet
Total déchets C	Toutes doses < 10 ⁻⁷ mSv/an		Sans objet
Total combustibles usés	0,000016	1 000 000	¹²⁹ I

Tableau 5.4-6 *SEN – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs aux autres exutoires – modèle à 1 million d'années – tous déchets*

Ces résultats confirment que l'impact respecte la contrainte de dose individuelle de 0,25 mSv/an. On note de plus que les doses surviennent toutes bien au-delà des 10 000 ans pour lesquels la RFS recommande le respect strict de la contrainte. On note par ailleurs que l'impact maximal est associé aux combustibles usés, ce qui est naturel dans la mesure où il est piloté par l'iode 129, qui y est présent en quantité plus importante que dans les verres ou les déchets B.

Les résultats associés au modèle « actuel » (voir Tableau 5.4-7 et Tableau 5.4-8) mettent en évidence que :

- seuls les exutoires Saulx, et dans une moindre mesure le Barrois et « interception de la Marne », s'expriment ;
- l'essentiel des impacts radiologiques est dû à l'iode 129. L'impact est très similaire à celui constaté à 1 million d'années, les débits molaires de radionucléides se dirigeant vers la Saulx étant similaires.

⁷² Du fait que leur impact est négligeable devant celui des autres combustibles usés, la dose associée aux CU3 n'a été calculée que pour l'exutoire Saulx

Colis-types	Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs
Exutoire « Saulx » (le plus pénalisant)			
B1x - (colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène)	0,00032	370 000	³⁶ Cl (¹²⁹ I dans une moindre mesure)
B1h - (colis non organiques pouvant dégager de l'hydrogène)	0,00003	350 000	³⁶ Cl
B2 - (boues bitumées)	0,000022	440 000	¹²⁹ I ; ³⁶ Cl
Autres déchets B	0,000093	370 000	³⁶ Cl (¹²⁹ I dans une moindre mesure)
Total des déchets B	environ 0,00047	vers 370 000	³⁶Cl (¹²⁹I dans une moindre mesure)
Verres C0	0,0000036	400 000	¹²⁹ I
Verres C1 et C2	0,00045	540 000	¹²⁹ I ; ³⁶ Cl
Verres C3 et C4	0,00035	560 000	¹²⁹ I ; ³⁶ Cl
Total des déchets C	environ 0,0008	vers 550 000	¹²⁹I ; ³⁶Cl
Combustibles usés CU1	0,02	410 000	¹²⁹ I
Combustibles usés CU2	0,0017	400 000	¹²⁹ I
Combustibles usés CU3	0,000073	400 000	¹²⁹ I
Total des combustibles usés	environ 0,022	vers 400 000	¹²⁹I

Tableau 5.4-7

SEN – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien (cas le plus pénalisant) – modèle à l'actuel – tous déchets

Autres exutoires :

Colis-types	Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs
Exutoire « interceptant les trajectoires vers la Marne »			
Total déchets B	0,0001	vers 400 000	^{36}Cl ; ^{129}I
Total déchets C	0,00033	630 000	^{129}I ; ^{36}Cl
Total combustibles usés	0,0073	500 000	^{129}I
Exutoire « Barrois »			
Total déchets B	0,000044	vers 400 000	^{36}Cl (^{129}I dans une moindre mesure)
Total déchets C	0,0002	600 000	^{129}I ; ^{36}Cl
Total combustibles usés	0,0067	500 000	^{129}I
Exutoire « Dogger »			
Total déchets B	Toutes doses < 10^{-7} mSv/an		Sans objet
Total déchets C	Toutes doses < 10^{-7} mSv/an		Sans objet
Total combustibles usés	0,000016	1 000 000	^{129}I

Tableau 5.4-8 SEN – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs aux autres exutoires – modèle à l'actuel – tous déchets

Les impacts radiologiques évalués à l'exutoire Saulx pour les différents déchets sont présentés ci-après sous forme de courbes pour les différents colis types (pour le modèle à 1 million d'années, les courbes pour le modèle actuel étant à peu près identiques).

- **Combustibles usés CU1**

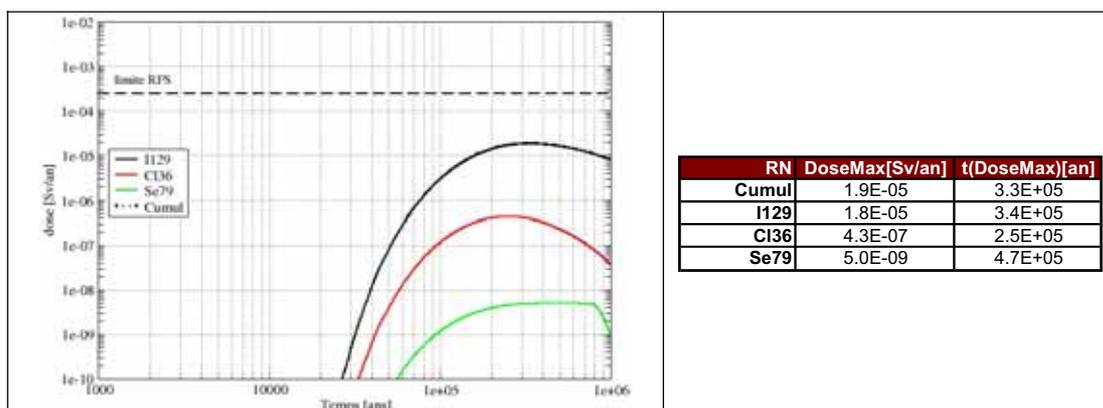


Figure 5.4-15 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis type CU1

● **Combustibles usés CU2**

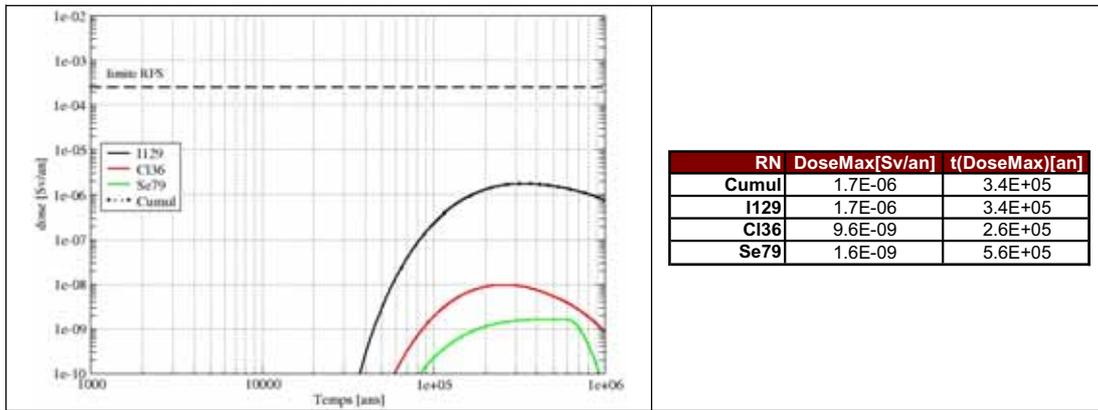


Figure 5.4-16 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – Colis type CU2

● **Combustibles usés CU3**

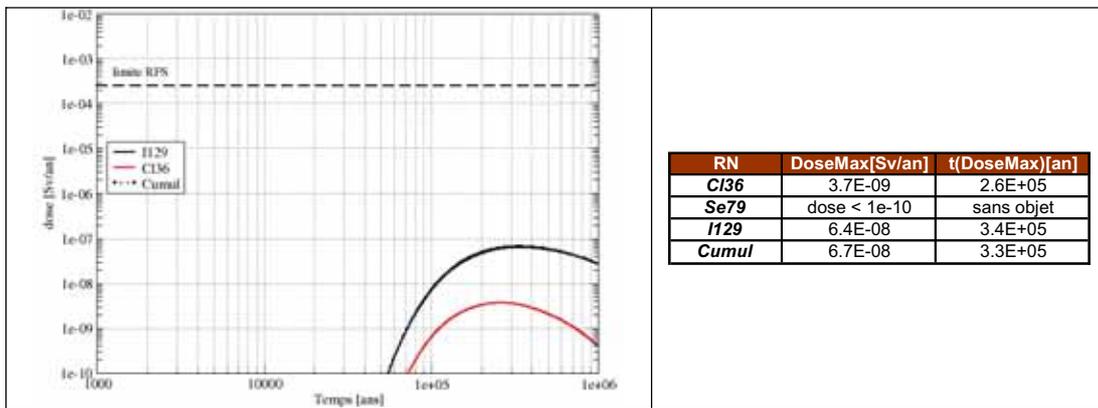


Figure 5.4-17 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – colis type CU3

● **Déchets vitrifiés C0**

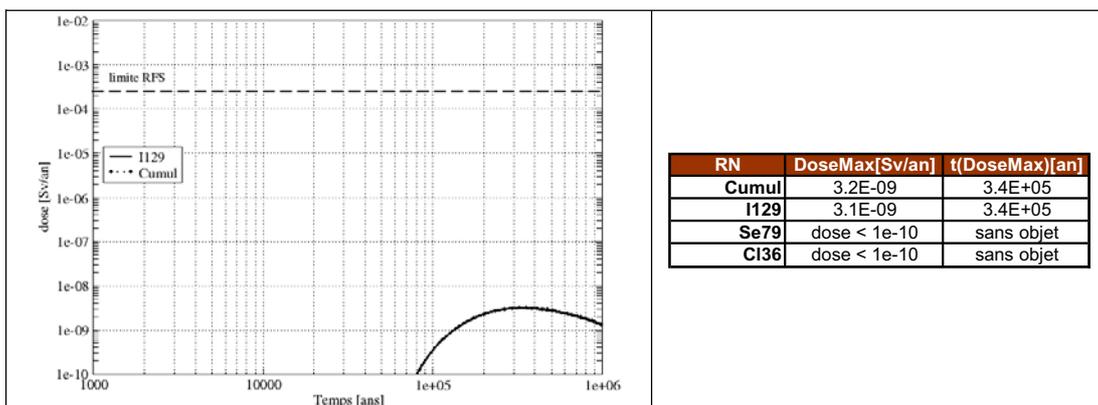


Figure 5.4-18 SEN – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - colis types C0

● **Déchets vitrifiés C1 + C2**

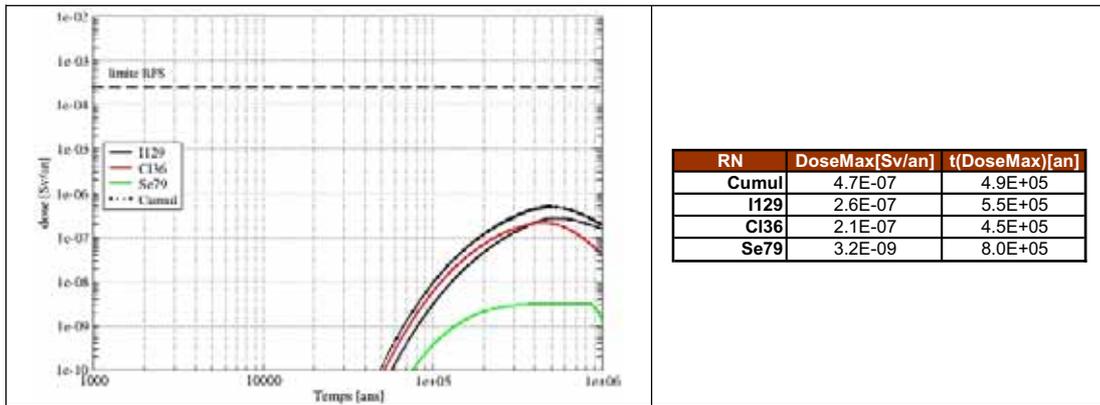


Figure 5.4-19 SEN – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - colis types (C1+C2)

● **Déchets vitrifiés C3 + C4**

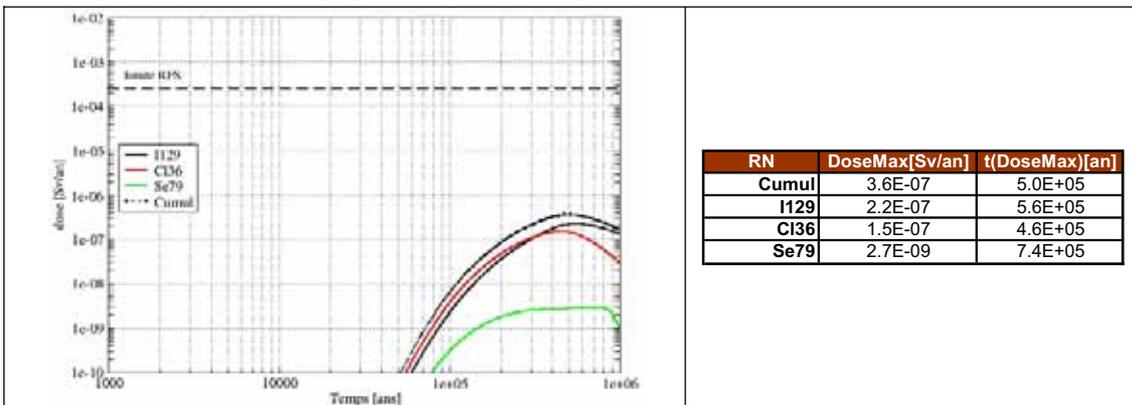


Figure 5.4-20 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - colis types (C3+C4)

● **Colis – types B1x**

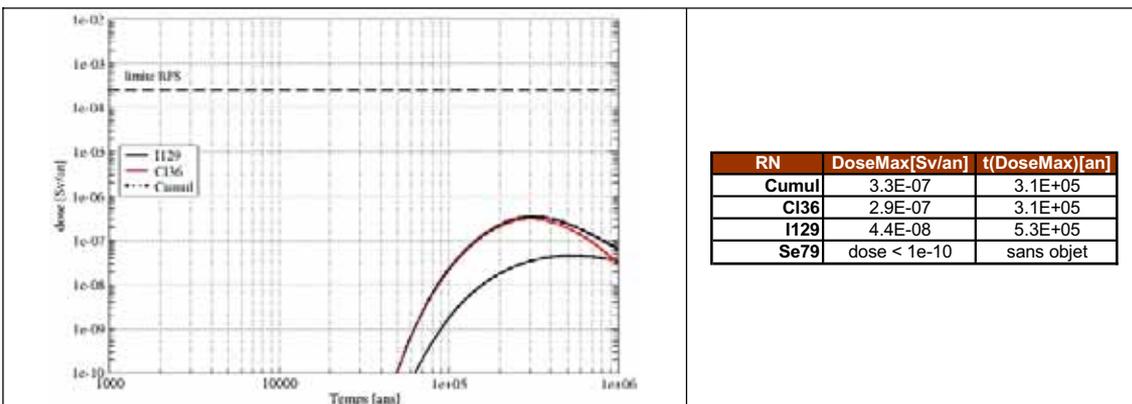


Figure 5.4-21 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - colis types (B1x)

● **Colis-types B1h**

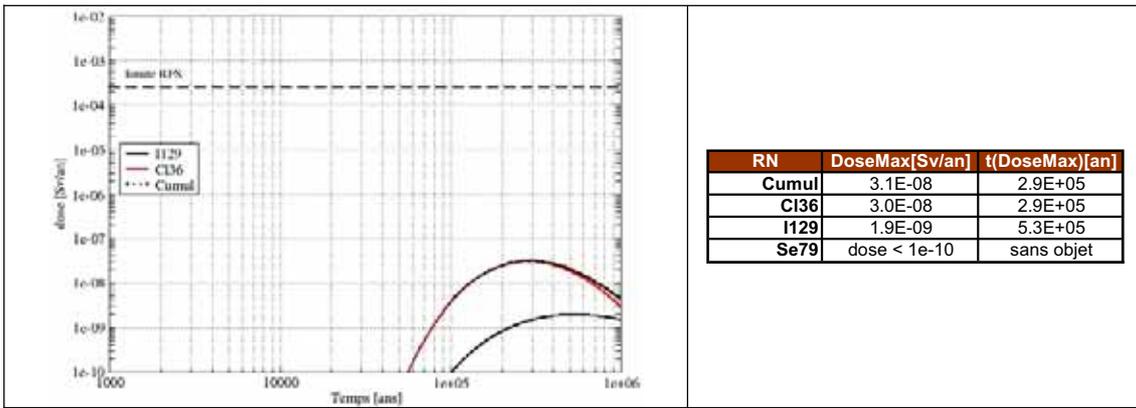


Figure 5.4-22 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – colis types (B1h)

● **Colis type B2**

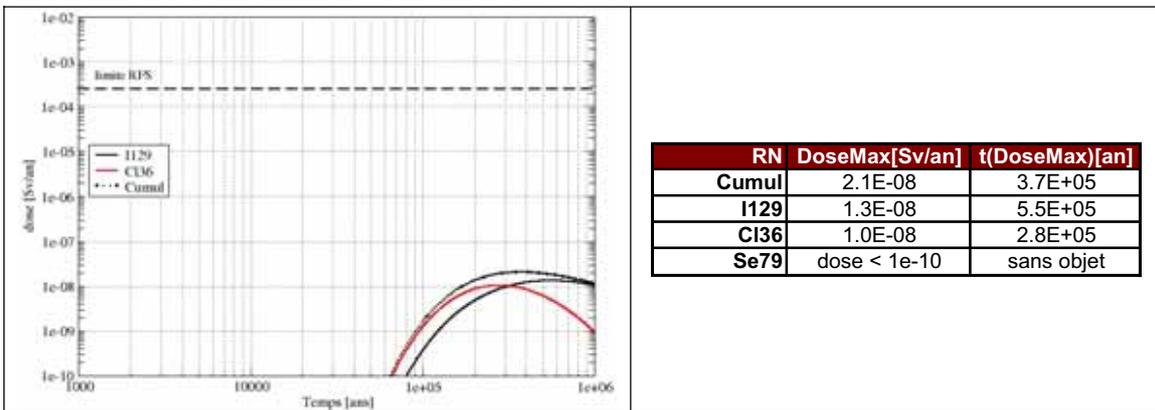


Figure 5.4-23 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - colis types B2

● **Autres déchets B**

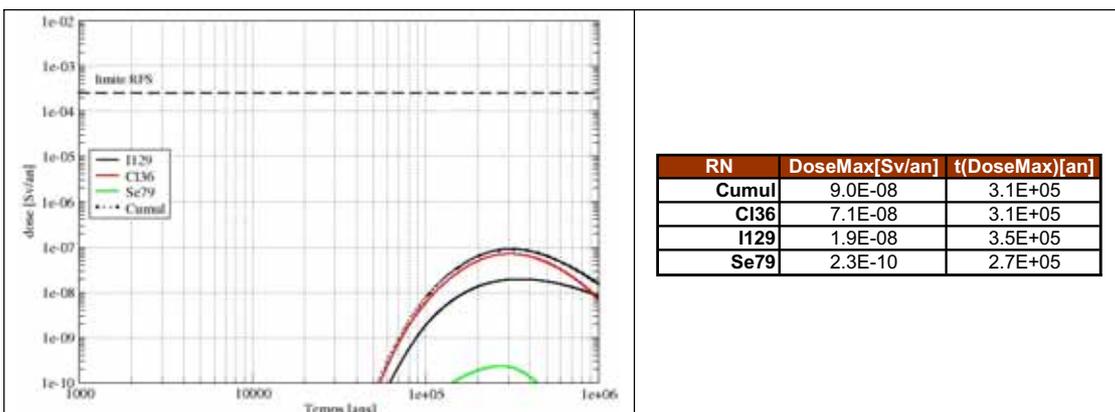


Figure 5.4-24 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - autres colis types B

5.4.5.3 Un impact des toxiques chimiques également maîtrisé

● Données d'entrée

L'impact chimique des quatre toxiques étudiés (B, Ni, Se, Sb) a été évalué pour les colis types C1/C2 qui contiennent, au moins pour le bore et le sélénium, les quantités les plus significatives de toxiques.

L'antimoine est présent en quantités similaires dans les déchets vitrifiés, les déchets technologiques et les combustibles usés. On a traité le cas des déchets vitrifiés, qui est représentatif même s'il n'est pas totalement enveloppe (le rapport des inventaires en antimoine, par rapport aux déchets C, est de 1,6 pour les combustibles usés et de 1,3 pour les déchets B). On verra néanmoins par la suite que les caractéristiques de rétention (forte sorption dans les argilites du Callovo-Oxfordien) permettent un confinement complet de ce toxique dans les premiers mètres de Callovo-Oxfordien, les conclusions du calcul ne seraient pas modifiées si l'ensemble des déchets avait été pris en compte.

Le nickel, quant à lui, est apporté par les déchets métalliques, mais surtout par les aciers introduits au sein du stockage (conteneurs, chemisage, etc.). Il est difficile, à ce stade des études, de définir un inventaire suffisamment précis des quantités de nickel, et d'attribuer une cinétique de relâchement à chaque source potentielle. Ainsi, pour s'affranchir de ces incertitudes, l'Andra a adopté une approche pénalisante consistant à imposer une concentration à saturation en nickel, de manière continue jusqu'à la fin de simulation (1 000 000 ans), et dans tout le stockage. Ce choix engendre une mise en solution de 13 600 tonnes de nickel dans les modules de stockage C1/C2, qui font l'objet du calcul.

Les inventaires mis en jeu pour chacun des toxiques chimiques étudiés sont fournis dans le Tableau 5.4-9.

	Masse totale (tonne)	Détail de la répartition pour les colis types C1/C2	
		Masse C1 (tonne)	Masse C2 (tonne)
Bore (C1/C2)	526,90	76,56	450,34
Nickel (C1/C2)	13 600 t. en solution sur 1 000 000 ans	Sans objet	Sans objet
Sélénium (C1/C2)	3,18	0,46	2,72
Antimoine (C1/C2)	0,57	0,08	0,49

Tableau 5.4-9 *SEN – inventaire en toxiques chimiques considéré pour l'évaluation de l'impact chimique [64]*

On présente également dans le Tableau 5.4-10 les valeurs des paramètres de transport et de rétention chimique retenues pour ces éléments (on rappelle également les valeurs de ces paramètres pour le sélénium et le nickel déjà étudiés pour leur impact radiologique).

		$K_h = 5.10^{-13}$ m/s $K_v = 5.10^{-14}$ m/s			
Milieu géologique		$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]
Bore (B)	Zone fracturée	0,20	$5,0.10^{-10}$	47	soluble
	Zone micro-fissurée	0,18	$2,5.10^{-10}$	52	
	Callovo-Oxfordien sain	0,18	$2,5.10^{-10}$	52	
Nickel (Ni)	Zone fracturée	0,20	$5,0.10^{-10}$	1 800	5.10^{-2}
	Zone micro-fissurée	0,18	$2,5.10^{-10}$	2 050	
	Callovo-Oxfordien sain	0,18	$2,5.10^{-10}$	2 050	
Sélénium (Se)	Zone fracturée	0,15	$1,0.10^{-11}$	1	5.10^{-7}
	Zone micro-fissurée	0,05	$5,0.10^{-12}$	1	
	Callovo-Oxfordien sain	0,05	$5,0.10^{-12}$	1	
Antimoine (Sb)	Zone fracturée	0,20	$5,0.10^{-10}$	46 000	5.10^{-7}
	Zone micro-fissurée	0,18	$2,5.10^{-10}$	51 000	
	Callovo-Oxfordien sain	0,18	$2,5.10^{-10}$	51 000	

Tableau 5.4-10 *SEN – valeur des paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique pour les toxiques chimiques étudiées [64].*

● Transport des toxiques chimiques

Les résultats des calculs de transport mettent en évidence, pour les toxiques chimiques, que :

- la forte sorption de l'antimoine dans les argilites du Callovo-Oxfordien atténue totalement son débit molaire en sortie de la formation hôte. Ce dernier reste totalement confiné dans la barrière géologique sur la durée de l'analyse (1 000 000 ans) ; la Figure 5.4-25 met en évidence qu'à 1 million d'années le front de concentration est localisé à moins de 10 mètres des colis. Le débit molaire sortant du Callovo-Oxfordien est nul. L'impact sur la biosphère est donc nul à 1 000 000 d'années. Il convient de noter que ces résultats sont la conséquence du comportement géochimique de cet élément.

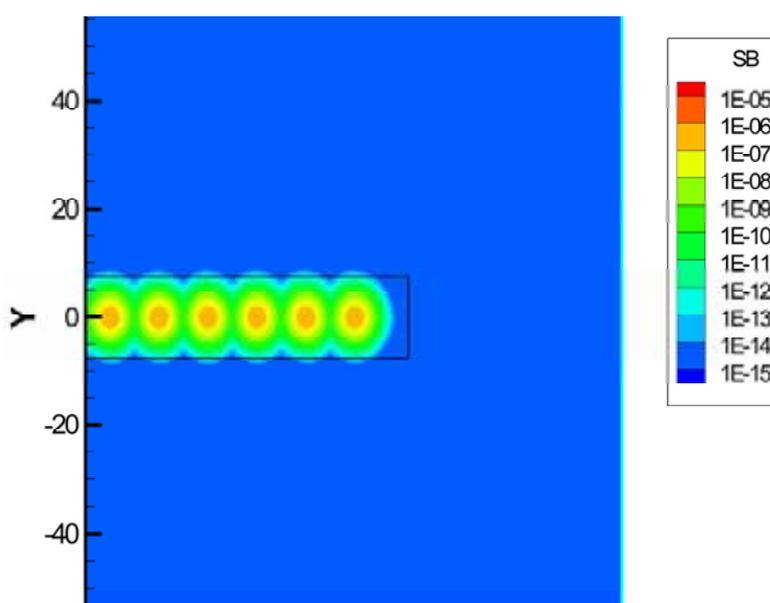


Figure 5.4-25 *Coupe verticale 2D - panaches de concentration en antimoine à 10⁶ ans*

- la sorption relativement importante du nickel dans la barrière géologique retarde et atténue significativement son débit molaire ; ainsi, son maximum de débit molaire est atteint largement au-delà du million d'années. Il est néanmoins susceptible d'atteindre les encaissants, tout au moins sous les hypothèses de calcul pénalisantes retenues par l'Andra ;
- le sélénium, limité par sa solubilité et ne bénéficiant pas de la décroissance radioactive (comme son isotope radioactif – ^{79}Se) atteint son maximum de débit molaire vers 1 million d'années en sortie de barrière géologique ;
- la faible sorption du bore dans le Callovo-Oxfordien (coefficient de retard de l'ordre de 50) suffit à retarder son maximum de débit molaire au-delà du million d'années.

● Impact des toxiques chimiques

Les résultats de l'impact chimique sont présentés uniquement dans le cadre de l'exutoire à la Saulx, dans le modèle hydrogéologique à un million d'années, sachant que les résultats sont très proches pour le modèle dit « à l'actuel ». On rappelle que les calculs n'ont été effectués que pour les déchets vitrifiés, ce qui :

- est représentatif pour le bore et le sélénium stable, les verres étant les déchets qui en contiennent le plus.
- correspond à une surestimation importante pour le nickel, puisque l'inventaire pris en compte pour les seules alvéoles de déchets C est en fait supérieur à la quantité maximale de nickel susceptible de se trouver au sein du stockage entier.

Comme dans le cas des radionucléides, l'impact des toxiques chimiques est très inférieur dans les autres exutoires.

Les résultats sont exprimés à la fois en termes de concentration maximale dans l'exutoire (grandeur qui ne renseigne pas directement sur l'effet sanitaire, mais qui est plus simple à appréhender) et en termes d'excès de risque individuel (ERI, pour les effets stochastiques sur la santé – effets cancérogènes) et de quotient de danger (QD, pour les risques à effets de seuil – effets non cancérogènes). On rappelle que l'on considère un risque acceptable pour un ERI inférieur à 10^{-5} et un QD inférieur à 1. Ces indicateurs sont évalués sur le même groupe critique que pour les radionucléides.

Parmi les quatre éléments étudiés, seul le nickel est reconnu comme cancérogène (Tableau 5.4-11).

	Effets non cancérogènes (QD)		Effets cancérogènes (ERI)	
	Voie orale (ingestion)	Voie respiratoire (inhalation)	Voie orale (ingestion)	Voie respiratoire (inhalation)
Bore	Oui	Non	Non	Non
Nickel	Oui	Oui	Non	Oui
Sélénium	Oui	Non	Non	Non
Antimoine	Oui	Oui	Non	Non

Tableau 5.4-11

Effets non cancérogènes et cancérogènes des toxiques chimiques étudiés selon la voie d'exposition

On évalue les quotients de danger et les excès de risque individuels pour chaque toxique à partir :

- des niveaux d'exposition (C) par ingestion ou inhalation (lesquels sont calculés à partir des concentrations en toxiques à l'exutoire) ;
- des quotients de danger unitaires (QD_{unitaire}) et des excès de risque unitaire (ERI_{unitaire}) qui correspondent aux valeurs de QD et d'ERI résultant d'une ingestion ou d'une inhalation d'une concentration en toxiques de $1\mu\text{g/l}$ (10^{-3} g/m^3) de façon chronique⁷³.

L'impact calculé s'exprime donc de la façon suivante à partir des grandeurs citées précédemment :

$$ERI = C * ERI_{\text{unitaire}} \quad \text{et} \quad QD = C * QD_{\text{unitaire}}$$

Les valeurs de quotients de danger et d'excès de risque individuel associées à chaque toxique sont fournies pour l'inhalation et l'ingestion dans le Tableau 5.4-12.

	$QD_{\text{unitaire}} [(\mu\text{g/L})^{-1}]$ pour une exposition chronique (Effets non cancérigènes)		$ERI_{\text{unitaire}} [(\mu\text{g/L})^{-1}]$ pour une exposition chronique sur une vie (70 ans) (Effets cancérigènes)	
	Voie orale (ingestion)	Voie respiratoire (inhalation)	Voie orale (ingestion)	Voie respiratoire (inhalation)
Bore	$4,6 \cdot 10^{-5}$	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Nickel	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$	Sans objet	$2,4 \cdot 10^{-6}$
Sélénium	$2,7 \cdot 10^{-2}$	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Antimoine	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	Sans objet	Sans objet

Tableau 5.4-12 SEN – Valeurs des excès de risque individuel et des quotients de danger des toxiques chimiques étudiés

Le Tableau 5.4-13 fournit les valeurs d'excès de risque individuel et de quotient de danger de chacun des toxiques étudiés pour l'ingestion et l'inhalation à l'exutoire Saulx (modèle à 1 million d'années).

Elément chimique (déchets concernés)	Concentration maximale [$\mu\text{g/L}$]	Date du maximum	QD - Effets non cancérigènes		ERI - Effets cancérigènes	
			Ingestion	Inhalation	Ingestion	Inhalation
Bore (C1/C2)	0,0543	$> 10^6$ ans	$2,5 \cdot 10^{-6}$ à 10^6 ans	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Nickel (C1/C2)	0,001	$> 10^6$ ans	$5,8 \cdot 10^{-5}$ à 10^6 ans	$5,2 \cdot 10^{-4}$ à 10^6 ans	Sans objet	$2,5 \cdot 10^{-9}$ à 10^6 ans
Sélénium (C1/C2)	0,0000174	Vers 10^6 ans	$4,7 \cdot 10^{-7}$	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Antimoine (C1/C2)	0	Sans objet	0	0	Sans objet	Sans objet

Tableau 5.4-13 SEN – Quotient de danger et excès de risque individuel à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien calcaire des quatre toxiques chimique étudiés

⁷³ Dans le cas des effets cancérigènes, l'ERI est évalué en considérant une durée d'exposition dite « vie entière » soit 70 ans.

Ces résultats, pour quelques toxiques choisis parmi les plus importants en quantité mobilisable à long terme au sein du stockage, montrent que l'impact chimique est acceptable en situation d'évolution normale. Tous les toxiques ont un impact très en dessous des seuils fixés.

On note que les maxima, pour le nickel et le bore, ne sont pas atteints au million d'années, ce qui confirme la bonne capacité de confinement du stockage. Compte tenu du coefficient de retard du bore, son impact maximal devrait être atteint entre 1 et 10 millions d'années et rester bien en dessous de la limite (à 10^6 ans l'impact du bore lui est de cinq ordres de grandeur inférieurs). Evaluer l'impact maximal du nickel nécessiterait de pousser le calcul jusqu'à des dates où il n'a plus de sens. On note que à un million d'années, cet élément chimique induit un impact qui est trois ordres de grandeur en dessous de la limite.

De la Figure 5.4-26 à la Figure 5.4-30 sont illustrés les résultats de l'impact des toxiques à l'exutoire Saulx pour le bore, le nickel et le sélénium.

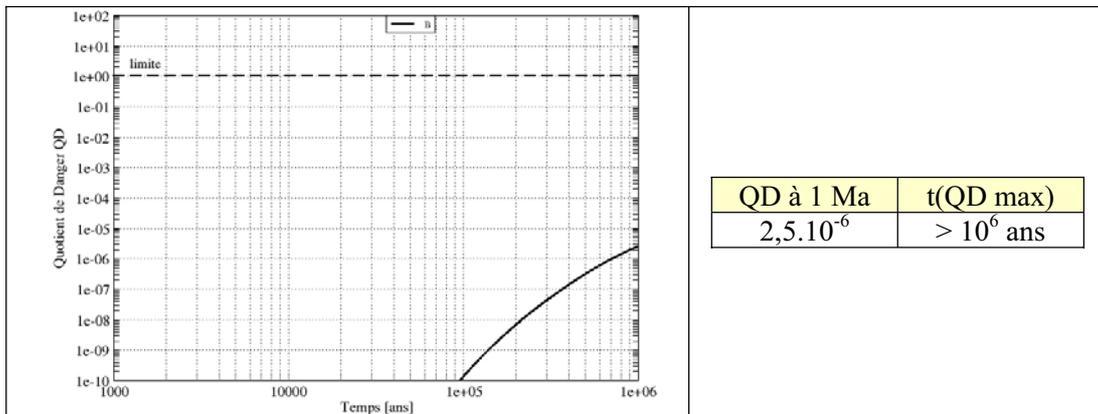


Figure 5.4-26

SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d'années – Colis types C1/C2 – Bore - Impact chimique à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l'ingestion (QD)

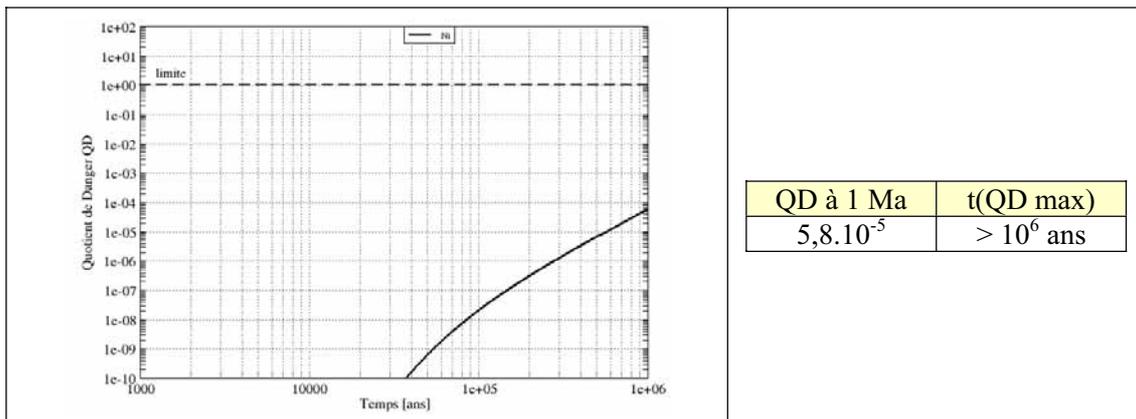


Figure 5.4-27

SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d'années – Colis types C1/C2 – Nickel - Impact chimique à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l'ingestion (QD)

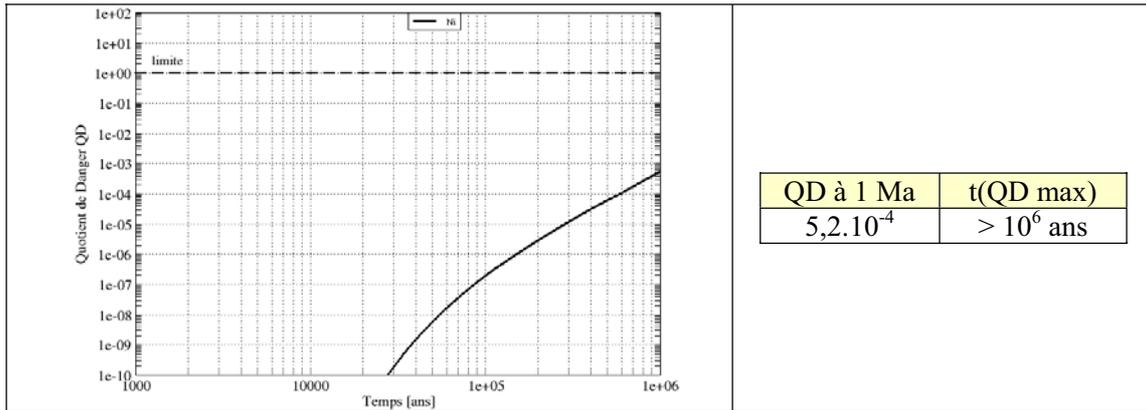


Figure 5.4-28 SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d’années – Colis types C1/C2 – Nickel - Impact chimique à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l’inhalation (QD)

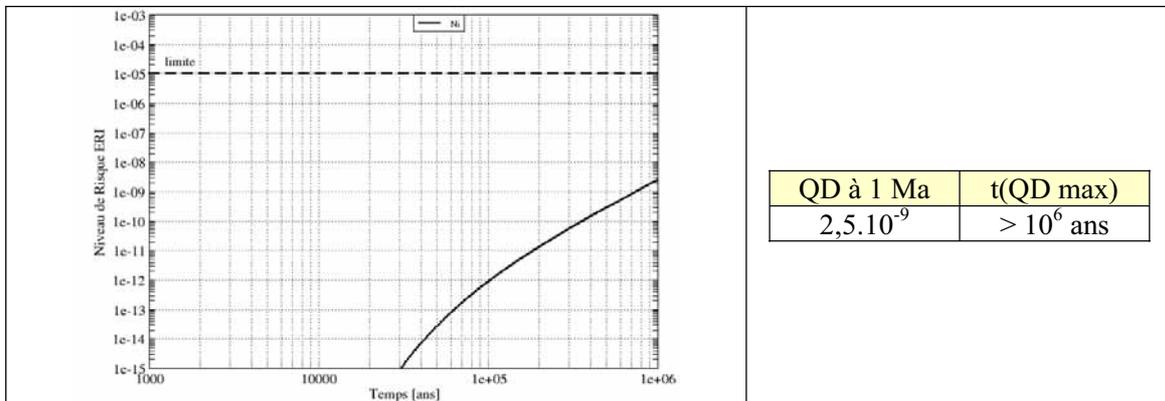


Figure 5.4-29 SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d’années – Colis types C1/C2 – Nickel - Impact chimique à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien lié aux effets cancérigènes pour l’inhalation (ERI)

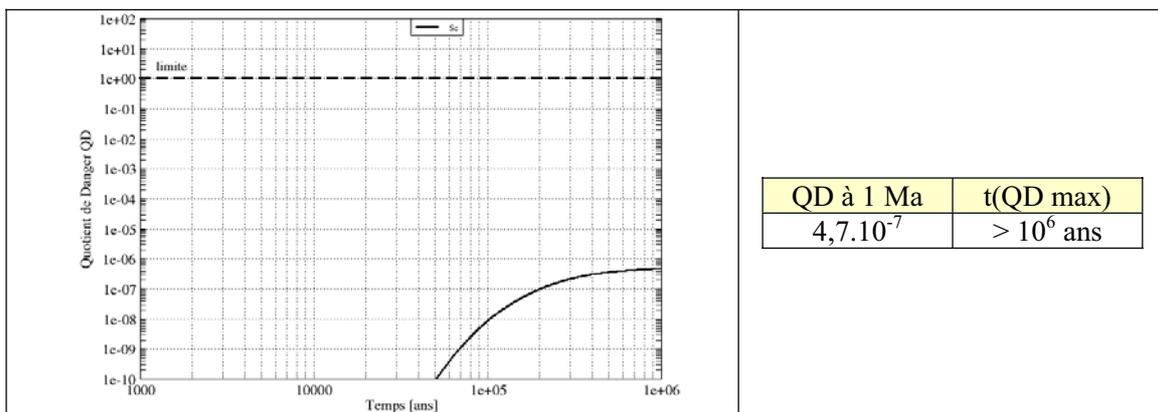


Figure 5.4-30 SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d’années – Colis types C1/C2 – Sélénium - Impact chimique à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l’ingestion (QD)

5.4.5.4 Synthèse

Les résultats des calculs mettent en évidence que la principale barrière assurant le confinement des radionucléides est le Callovo-Oxfordien, la formation hôte du stockage. Cette dernière atténue et retarde l'ensemble des flux de radionucléides. Elle ne laisse sortir que quatre radionucléides à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années.

L'exutoire Saulx, qui engendre la dose la plus élevée, est situé à proximité du stockage (environ à 2 kilomètres de son extrémité). De plus, les choix de modélisation conduisent à « rabattre » la majorité des trajectoires vers cet exutoire conventionnel. Tout dans le calcul est donc fait pour limiter les effets de retard ou de dilution liés aux encaissements. Nonobstant, on observe que les doses respectent la contrainte recommandée par la RFS III.2.f, ce qui témoigne des performances du stockage lui-même.

5.4.6 Analyses de sensibilité

En plus du calcul de référence, une série d'études de sensibilité a été menée de manière à évaluer l'influence de choix de paramètres ou de modèles différents de ceux retenus en référence. La plupart des études correspond à des modèles ou à des jeux de paramètres plus défavorables que ceux retenus dans le calcul de référence, de manière à couvrir des incertitudes résiduelles sur les valeurs sélectionnées, elles-mêmes déjà prudentes.

Par ailleurs, quelques études de sensibilité ont été menées avec des modèles alternatifs ou des jeux de paramètres moins pénalisants que ceux considérés dans le calcul de référence. Ces études sont soit menées à titre prospectif pour évaluer une marge potentielle, soit réalisées de manière à intégrer des résultats récents moins conservatifs que ceux considérés en référence.

Les analyses de sensibilité permettent également de hiérarchiser les paramètres et modèles en fonction de leur influence sur les indicateurs de sûreté (l'impact, ou tout autre indicateur intermédiaire).

Les analyses de sensibilité présentées fournissent ainsi des informations utiles pour aborder le chapitre 6 qui détaillera les incertitudes sur la connaissance des phénomènes au sein du stockage.

Les études de sensibilité ont été scindées en trois grandes catégories.

- **Les études de sensibilité relatives aux paramètres du Callovo-Oxfordien, de l'argile gonflante et du béton**

Pour la plupart, sont considérées des valeurs conservatives de paramètres, notamment pour :

- la perméabilité dans le Callovo-Oxfordien ;
- les paramètres hydrauliques, de transfert et de rétention dans l'EDZ ;
- et enfin, les paramètres de transfert et de rétention dans le Callovo-Oxfordien couplés avec ceux de l'argile gonflante et du béton.

Quelques études ont été réalisées avec des valeurs a priori moins pénalisantes.

- **Les études de sensibilité relatives à la cinétique de relâchement par les colis de déchets**

Seuls les combustibles usés, les déchets C, les colis de boues bitumés et les colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (colis type stockés dans les alvéoles de type B1x) font l'objet d'études de sensibilité, avec des paramètres plus défavorables que ceux retenus en référence. Les autres colis types étant représentés par un terme source labile en référence ne nécessitent pas de telles études.

Par ailleurs, une sensibilité est réalisée pour les combustibles usés avec un modèle fondé sur la dissolution classique de la matrice (et non radiolytique considérée dans le calcul de référence) ; ce modèle engendre des cinétiques de relâchement plus lentes.

Enfin, comme évoqué au paragraphe 5.3.2.2, une étude de sensibilité est menée à titre prospectif pour évaluer le gain potentiel apporté par l'adoption de compléments de colisage en béton durables pour les colis de déchets stockés dans les alvéoles de type B1x.

● **Les études de sensibilité portant sur la globalité du modèle de calculs.**

Ce dernier ensemble d'études de sensibilité permet de tester des modalités de transfert des radionucléides différentes de celles envisagées en référence. On regroupe dans cette catégorie :

- une étude portant sur un transfert de radionucléides sous l'influence du transitoire hydraulique, et donc en particulier des pressions de gaz, traitée pour le cas des déchets B1x et des combustibles usés CU1 ;
- une étude envisageant des propriétés différentes pour les encaissants supérieurs permettant de prendre en compte une diffusion ralentie dans l'horizon C3a de l'Oxfordien et dans le Kimméridgien, traitée dans le cas de l'iode 129 des CU1 ;
- une étude testant l'influence du modèle hydrogéologique des encaissants supérieurs sur l'impact, traitée dans le cas de l'iode 129 des CU1.

Les études de sensibilités sont abordées par la suite suivant l'ordre exposé ci-dessus et sont synthétisées dans le Tableau 5.4-14.

Sensibilités	Paragraphe
1. Sensibilité aux paramètres du Callovo-Oxfordien, de la bentonite et du béton des alvéoles	
1.1 - Perméabilité Callovo-Oxfordien conservative (facteur 10)	Voir page 305
1.2 - EDZ Zone fracturée pénalisante : $K = 10^{-6}$ m/s, coefficient de diffusion de l'eau dans l'eau ($D_p = 2.10^{-9}$ m ² /s), pas de retard, pas de solubilité Zone microfissurée conservative : $K = 5.10^{-9}$ m/s, $D_e = 1.10^{-11}$ m ² /s, $\omega = 0,04$, capacités de rétention dégradées	Voir page 306
1.3 - Paramètres de transfert et de rétention conservatifs (barrière ouvragée et Callovo-Oxfordien) : sorption, diffusion et limite de solubilité pour le Callovo-Oxfordien, sorption et limite de solubilité pour la bentonite et le béton	Voir page 311
1.4 – Coefficient de partage de l'Iode de 10^{-3} m³/kg dans le Callovo-Oxfordien	Voir page 319
1.5 - Epaisseur du Callovo-Oxfordien de 160 m	Voir page 320
1.6 - Thermique phénoménologique	Voir page 320
2 - Sensibilité aux colis	
2.1 - Colis type B1x : paramètres conservatifs des taux de relâchement	Voir page 321
2.2 - Colis type B2 : boues bitumées : taux = 10^{-3} /an	Voir page 322
2.3 - Colis type B1x : Prise en compte d'un conteneurage durable pour les déchets B	Voir page 323
2.4 - Colis de déchets C : Paramètres conservatifs du modèle $V_0.S \rightarrow V_r$	Voir page 324
2.5 - Colis de déchets C : modèle pénalisant $V_0.S$	Voir page 324
2.6 - Combustibles usés : Paramètres conservatifs (dissolution radiolytique)	Voir page 326
2.7 - Combustibles usés : Modèle de contrôle par la solubilité de l'uranium	Voir page 327
3 - Sensibilité sur la globalité du modèle de calculs	
3.1 – Transferts pendant le transitoire hydraulique	Voir page 329
3.2 - Propriétés diffusives des couches semi-perméables des encaissants sus-jacents	Voir page 337
3.3 - Trajectoire dans le modèle des encaissants sus-jacents	Voir page 339

Tableau 5.4-14

*SEN - Thèmes des différentes études de sensibilité***5.4.6.1 Sensibilité aux paramètres du Callovo-Oxfordien**● **Sensibilité aux paramètres hydrauliques (perméabilité conservative)**

Dans cette étude de sensibilité, seule la perméabilité (verticale et horizontale) du Callovo-Oxfordien sain est multipliée par 10. Tous les autres paramètres conservent leur valeur de référence (voir Tableau 5.4-15).

	Perméabilité du Callovo-Oxfordien	
	Valeur de référence (phénoménologique)	Valeur de sensibilité (conservative)
Composante horizontale (K_h)	5.10^{-13} m/s	5.10^{-12} m/s
Composante verticale (K_v)	5.10^{-14} m/s	5.10^{-13} m/s

Tableau 5.4-15 SEN - Sensibilité à la perméabilité du Callovo-Oxfordien.

La prise en compte d'une telle perméabilité du Callovo-Oxfordien, revenant à lui appliquer uniformément des valeurs parmi les plus basses mesurées, induit une augmentation du débit molaire total sortant du toit du Callovo-Oxfordien d'un facteur 2. Cette augmentation est modérée au regard de la dégradation importante de la perméabilité qui est prise en compte dans cette étude ; ce résultat s'explique par le fait que le régime de transport reste diffusif ou co-dominant diffusif - convectif.

Cette étude confirme que le caractère dominant de la diffusion dans le Callovo-Oxfordien n'est pas drastiquement sensible à la perméabilité de la formation hôte (voir Figure 5.4-31), tant qu'elle demeure dans des valeurs inférieures à 10^{-12} m/s.

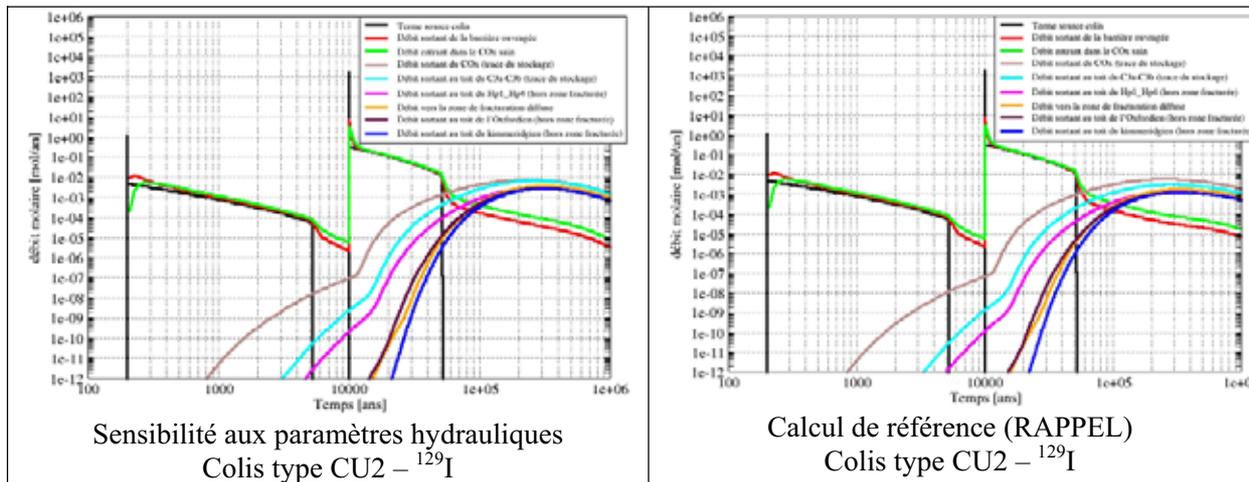


Figure 5.4-31 SEN - Sensibilité aux paramètres hydrauliques : colis type CU2 - ^{129}I – historique de débit molaire

● **Sensibilité aux paramètres hydrauliques, de transfert et de rétention de l'EDZ**

La finalité de cette étude est de vérifier que les ouvrages d'accès et l'EDZ associée ne constituent pas la voie de transfert privilégiée des radionucléides et ce malgré les incertitudes éventuelles sur les paramètres hydrauliques et de transfert au sein de l'EDZ (dues soit aux incertitudes de changement d'échelle entre l'état microscopique de l'EDZ et ses propriétés « en grand », soit à l'influence des perturbations chimiques). Cela revient à s'assurer que la barrière géologique reste effectivement la principale voie de transfert des radionucléides malgré des caractéristiques d'EDZ plus défavorables que celles considérées dans le calcul de référence et rappelées dans le Tableau 5.4-16.

	Calcul de référence EDZ phénoménologique	Calcul de sensibilité EDZ « dégradée »
Zone fracturée	$K = 5.10^{-9} \text{ m/s}$ <u>Anions :</u> $De_{\text{Anions}} = 1.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,15$ <u>Cations :</u> $De_{\text{Cations}} = 5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,20$ Rétention géochimique phénoménologique	$K = 10^{-6} \text{ m/s}$ Coefficient pénalisant ($Dp = De / \omega = 2.10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) Pas de rétention géochimique
Zone microfissurée	$K = 5.10^{-11} \text{ m/s}$ <u>Anions :</u> $De_{\text{Anions}} = 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,05$ <u>Cations :</u> $De_{\text{Cations}} = 2,5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,18$ Rétention géochimique phénoménologique	$K = 5.10^{-9} \text{ m/s}$ <u>Anions :</u> $De_{\text{Anions}} = 1.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,04$ <u>Cations :</u> $De_{\text{Cations}} = 5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,21$ Rétention géochimique conservative

Tableau 5.4-16 SEN - Sensibilité : Valeurs des paramètres de transfert dans l'EDZ

Cette étude de sensibilité est très proche d'un scénario de défaut de scellements dans la mesure où la dégradation des propriétés de l'EDZ revient à court-circuiter partiellement le scellement (sa perméabilité équivalente, en grand, n'est plus que de 10^{-7} m/s), elle préfigure les résultats qui seront présentés au chapitre 7.

A l'instar de ce qui a été fait dans les calculs de référence, un calcul complet est effectué depuis les colis de déchets jusqu'aux exutoires, en considérant les deux voies de transfert : l'une à travers les ouvrages (galeries et puits d'accès), l'autre à travers la barrière géologique saine.

Les enseignements de cette étude de sensibilité sont les suivants.

- Compte tenu de la perméabilité relativement élevée de l'EDZ et de l'efficacité hydraulique limitée des scellements, la charge hydraulique au toit du Callovo-Oxfordien se transmet dans tout le stockage, jusqu'aux différentes galeries, sans perte de charge significative après la traversée des différents scellements (voir Figure 5.4-32). Le débit en sortie du puits est augmenté ($6,3 \text{ m}^3/\text{an}$ au lieu de $0,5 \text{ m}^3/\text{an}$).

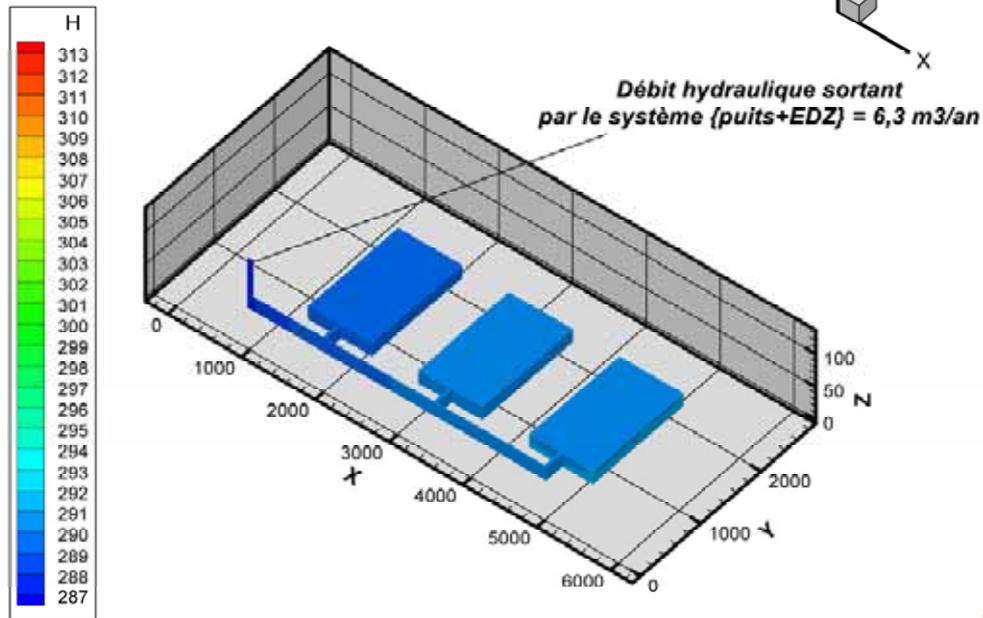


Figure 5.4-32 SEN - Propagation des charges hydrauliques (charges en mètres NGF ⁷¹) dans les ouvrages d'accès du stockage – EDZ « dégradée »

- Au niveau des alvéoles : la prise en compte d'une EDZ très dégradée modifie peu le régime hydraulique dans le champ proche de l'alvéole (voir Figure 5.4-33). Le nombre de Péclet reste inférieur à 1 en tête d'alvéole de combustibles usés avec une valeur maximale de 0,8 dans la zone fracturée (contre 0,7 en référence) et une valeur minimale de $8 \cdot 10^{-4}$ au niveau du bouchon (contre $7 \cdot 10^{-4}$ en référence). Le transport s'effectue, comme dans le calcul de référence, par diffusion dominante (ou co-dominance diffusive-convective).

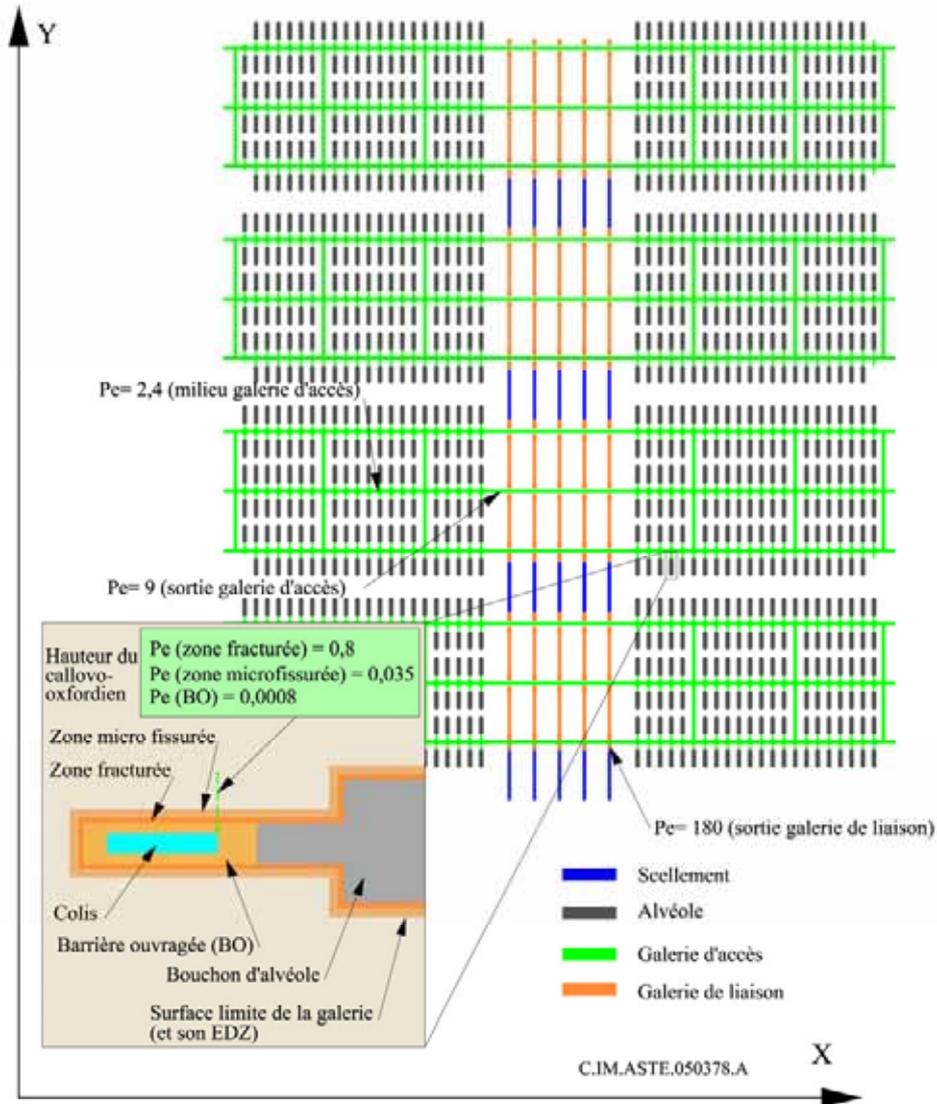


Figure 5.4-33

SEN - Sensibilité : EDZ « dégradée » (Zone fracturée pénalisante, zone micro-fissurée conservative) - Colis type CUI - ^{129}I - Valeurs du nombre de Péclet

De ce fait, le drain hydraulique induit par l'imposition d'une charge faible en tête d'alvéole (correspondant approximativement à celle du toit du Callovo-Oxfordien) n'est pas suffisant pour imposer des phénomènes convectifs dominants en champ proche de l'alvéole, la convection étant restreinte par la très faible perméabilité de la barrière géologique qui limite les apports d'eau. Ce résultat atteste l'efficacité de l'architecture borgne des alvéoles et modules de stockage pour tirer parti des propriétés de la roche dans la maîtrise du schéma hydraulique du stockage.

La prise en compte d'un coefficient de diffusion plus élevé dans l'EDZ contribue à augmenter de 50 % le débit molaire maximal d'iode entrant dans la galerie (Figure 5.4-34), et de 7 % la masse d'iode 129 intégrée à 1 million d'années qui entrerait dans la galerie (66 % au lieu de 59 % en calcul de référence-voir Figure 5.4-35).

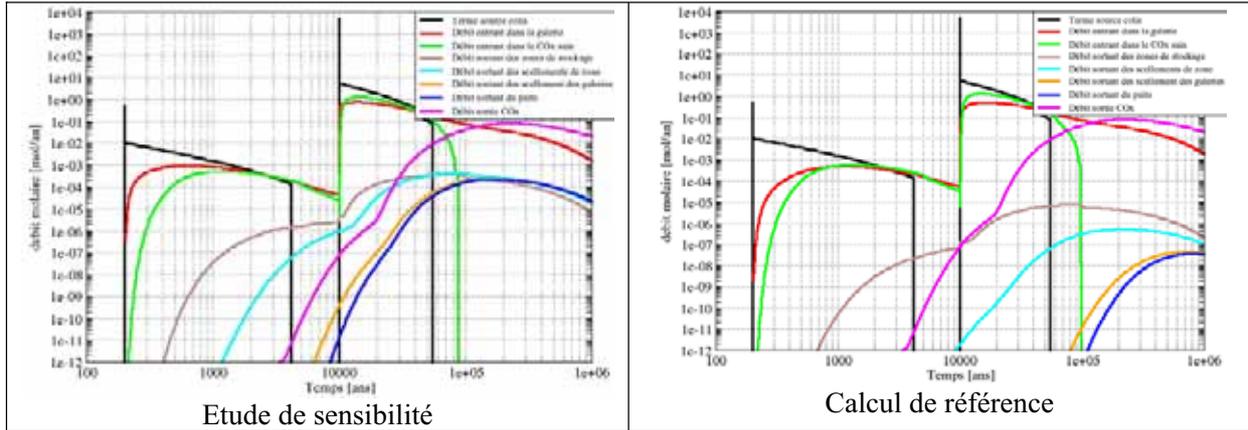


Figure 5.4-34 SEN - Sensibilité : EDZ « dégradée » (Zone fracturée pénalisante, zone micro-fissurée conservative) - Colis type CUI – ¹²⁹I – Historique de débits molaire

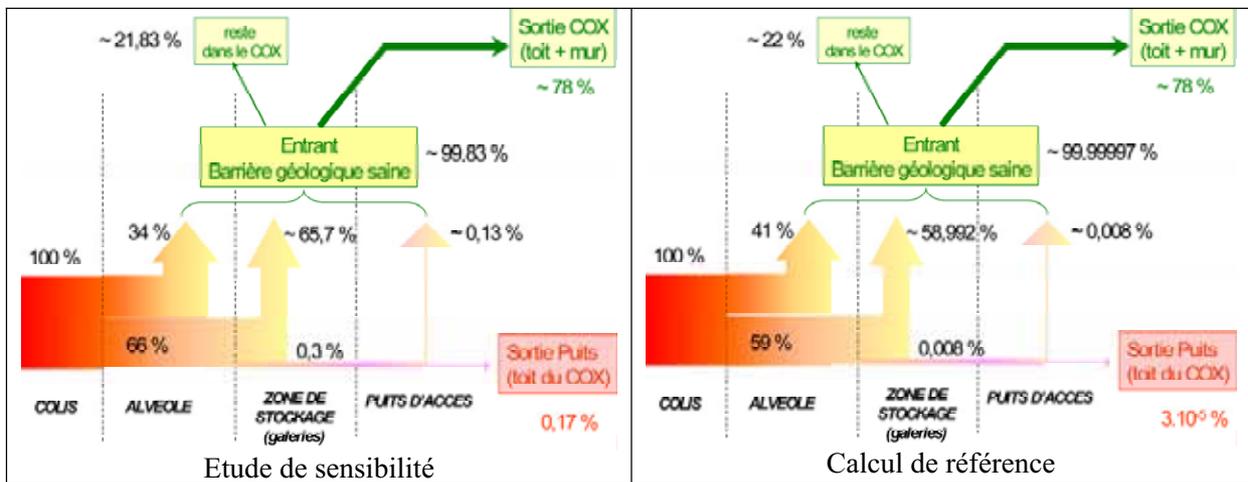


Figure 5.4-35 SEN - Sensibilité : EDZ « dégradée » (Zone fracturée pénalisante, zone micro-fissurée conservative) - Colis type CUI – ¹²⁹I - Répartition des voies de transfert

Au niveau des zones de stockage, les écoulements restent limités dans les galeries d'accès, mais sont plus significatifs (convection dominante) au niveau des galeries de liaison secondaires. A la sortie de la zone de stockage, les transferts sont très convectifs (le nombre de Péclet est de l'ordre de 180). Ces phénomènes concourent à accélérer le transfert des radionucléides en sortie de zone de stockage. Pour les combustibles usés CUI, la quantité d'iode 129 intégrée à 1 million d'années sortant de la zone de stockage est nettement plus forte que dans le calcul de référence (0,3 % contre 0,008 % en référence, soit un facteur 40 environ). Le débit molaire maximal en sortie de zone de stockage est également augmenté d'un facteur 70 environ ; en effet, le transfert y étant plus rapide, les échanges avec la barrière géologique y sont moindres.

Au niveau des ouvrages d'accès, les phénomènes observés pour les galeries de liaison secondaires s'accroissent : dans les galeries de liaison principales, le régime est très nettement convectif et les temps de transfert bien inférieurs à ceux évalués dans le calcul de référence. La quantité de matière sortant par le puits est 5 000 fois plus importante que dans le calcul de référence (0,17 % contre 3.10⁻⁵ % en référence), avec un maximum plus précoce à 150.000 ans environ au lieu de 800.000 ans.

Ainsi la prise en compte d'une EDZ avec des performances de transport, hydrauliques et géochimiques, « dégradées » par rapport au calcul de référence accroît la fraction d'activité qui migre vers les galeries d'accès. La fraction d'activité qui atteint le toit du Callovo-Oxfordien via le puits est d'autant plus importante que le transport devient convectif dans les galeries de liaison principales avec des cinétiques plus rapides.

Néanmoins, la masse d'iode au niveau du puits ne représente que 0,17 % de l'inventaire total initial des combustibles usés CU1, l'autre fraction de la masse empruntant la voie de transfert par la barrière géologique saine ; ce résultat corrobore l'écart observé entre le débit molaire maximal sortant du Callovo-Oxfordien et celui sortant du puits (facteur 400). Par ailleurs, on note que les débits molaires sortant du Callovo-Oxfordien sont quasiment identiques en référence et en sensibilité. Ainsi, on peut conclure que la formation hôte reste la principale voie de transfert des radionucléides et ce malgré la prise en compte de propriétés « très dégradées » pour la zone endommagée. Les doses sont de ce fait similaires à celles du calcul de référence.

Ces différents points sont également confirmés pour d'autres radionucléides ou d'autres colis types ; on n'a présenté ici, par commodité, que les résultats pour les combustibles usés CU1.

● **Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives)**

Dans cette étude, sont considérées :

- des valeurs conservatives de paramètres de transport (De , ω) dans la barrière géologique et dans la zone microfissurée pour les anions et les cations (Voir paragraphe 5.3.2.1) ;
- des valeurs conservatives de paramètres de rétention (retard et précipitation) dans le corps (en béton ou en argile) et le bouchon argileux des alvéoles, l'EDZ, et le Callovo-Oxfordien.

Une analyse préalable sur les coefficients de diffusion apparente (Da), conjuguant à la fois le changement de coefficient de diffusion, de porosité et de retard, permet d'évaluer le temps caractéristique de migration par diffusion, Td [$Td = R.L^2.\omega/De = L^2/Da$] et le ratio entre les temps caractéristiques de migration par diffusion obtenus en référence et en sensibilité (quatrième colonne du Tableau 5.4-17).

Diffusion apparente des radionucléides $D_a = (D_e/\omega R)$ Dans les argilites saines du Callovo-Oxfordien (m^2/s)			
	Référence	Sensibilité	Ratio $\{R_t\} =$ Sensibilité/Référence
^{36}Cl	$1,00.10^{-10}$	$2,50.10^{-10}$	2,50
^{79}Se	$1,00.10^{-10}$	$2,50.10^{-10}$	2,50
^{129}I	$1,00.10^{-10}$	$2,50.10^{-10}$	2,50
^{93m}Nb	$1,87.10^{-15}$	$5,80.10^{-15}$	3,09
^{94}Nb	$1,87.10^{-15}$	$5,80.10^{-15}$	3,09
^{59}Ni	$6,79.10^{-13}$	$2,17.10^{-12}$	3,20
^{41}Ca ($\Delta T > 20$)	$5,54.10^{-10}$	$2,38.10^{-9}$	4,30
^{126}Sn	$7,76.10^{-15}$	$3,62.10^{-14}$	4,67
^{107}Pd	$1,55.10^{-13}$	$1,36.10^{-12}$	8,75
^{99}Tc	$1,09.10^{-14}$	$1,09.10^{-13}$	10,00
^{14}C	$1,79.10^{-11}$	$2,50.10^{-10}$	14,00
^{93}Zr	$1,09.10^{-13}$	$2,17.10^{-12}$	19,98
^{166m}Ho	$2,17.10^{-15}$	$4,35.10^{-14}$	20,00
^{41}Ca	$8,64.10^{-11}$	$2,38.10^{-9}$	27,56
^{93}Mo	$7,19.10^{-13}$	$2,50.10^{-10}$	347,50
^{10}Be	$4,35.10^{-14}$	$2,38.10^{-9}$	54763,62
^{10}Be ($\Delta T > 20$)	$4,35.10^{-13}$	$2,38.10^{-9}$	5477,90

Tableau 5.4-17 *SEN - Comparaison des coefficients de diffusion apparente Référence / Sensibilité*

Ce tableau met en valeur trois types de radionucléides différents :

- les anions non sorbés, pour lesquels la sensibilité revient à accélérer d'un facteur 2,50 leur transfert, du fait d'une diffusion apparente plus rapide ;
- les anions sorbés, pour lesquels la baisse du coefficient de partage a un effet sur l'accélération du transport (jusqu'à un facteur 20 pour le ^{166m}Ho) ;
- les cations, pour lesquels les effets de la prise en compte d'une géochimie conservative sont plus marqués.

On note en plus, dans le cas du sélénium, la prise en compte d'une solubilité beaucoup plus forte, égale à $5.10^{-4} mol/m^3$ contre $5.10^{-7} mol/m^3$ en calcul de référence. Le transfert de ce radionucléide est fortement limité par la solubilité. Pour celui-ci, la prise en compte d'une solubilité plus forte peut influencer très significativement sur les résultats.

Les enseignements de ces calculs sont les suivants.

Le maximum de débit molaire de l'iode 129 et du chlore 36 des CU1 et CU2 sortant de la formation hôte est atteint environ 100.000 ans plus tôt que dans le cas de référence. En outre, la masse d'iode 129 restant confinée dans le Callovo-Oxfordien sur la durée totale de l'analyse est significativement plus faible que pour le calcul de référence (2 % en sensibilité contre 20 à 30 % en référence). L'impact associé aux combustibles usés n'augmente que d'un facteur 2,5 du fait de l'étalement du signal dans le temps apporté par la diffusion (voir Figure 5.4-36).

Cette sensibilité est un peu moins marquée pour les déchets C vitrifiés dans la mesure la durée de relâchement des colis, fondé sur le modèle ($V_0.S \rightarrow V_r$), est plus longue que celle des combustibles usés et est de l'ordre de grandeur des transferts dans la formation hôte.

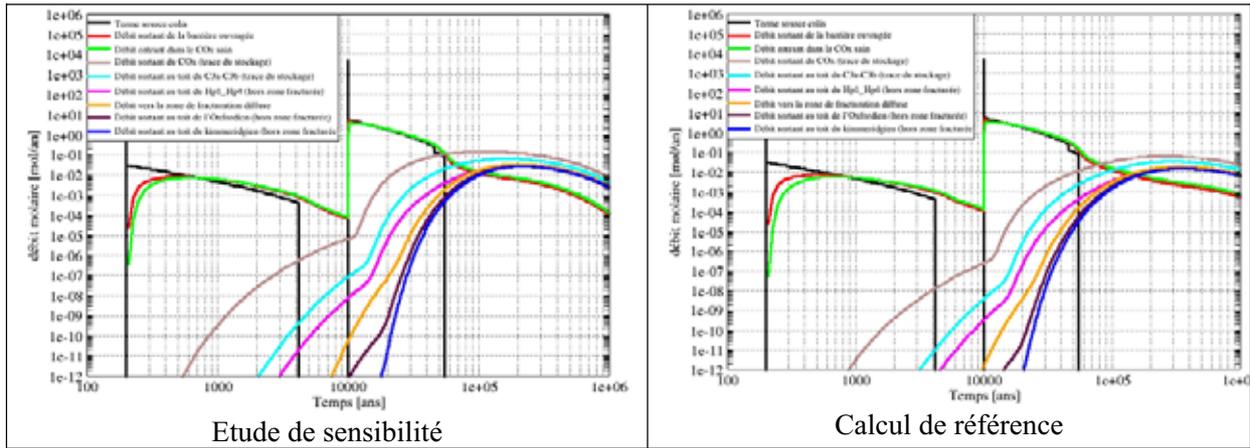


Figure 5.4-36 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI – ¹²⁹I – Historique de débit molaire

La prise en compte de paramètres plus défavorables de transfert et de solubilité du sélénium 79 induit une hausse très significative du débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien (voir Figure 5.4-37) et de l'impact radiologique associé. En effet, la multiplication par 1000 de la limite de solubilité conjointement à l'augmentation d'un facteur 2,5 de la diffusion apparente ont pour effet de rendre soluble le sélénium 79, qui précipitait dans le calcul de référence, ainsi que de diminuer l'étalement par diffusion du débit molaire et son atténuation par la décroissance radioactive. En conséquence, le débit molaire maximum en sortie de Callovo-Oxfordien augmente d'un facteur 3 000 et la masse sortant du toit et du mur du Callovo-Oxfordien sur la durée totale de l'analyse (1 million d'années) est 600 fois plus importante que dans le calcul de référence ; ce facteur 600 rend compte d'une part de l'augmentation de solubilité qui induit un accroissement d'un facteur 150 de la quantité molaire sortant de la barrière ouvragée (exemple du sélénium 79 des CUI), d'autre part du temps de transfert significativement plus court dans la barrière géologique, qui augmente la masse sortant du Callovo-Oxfordien d'un facteur 4.

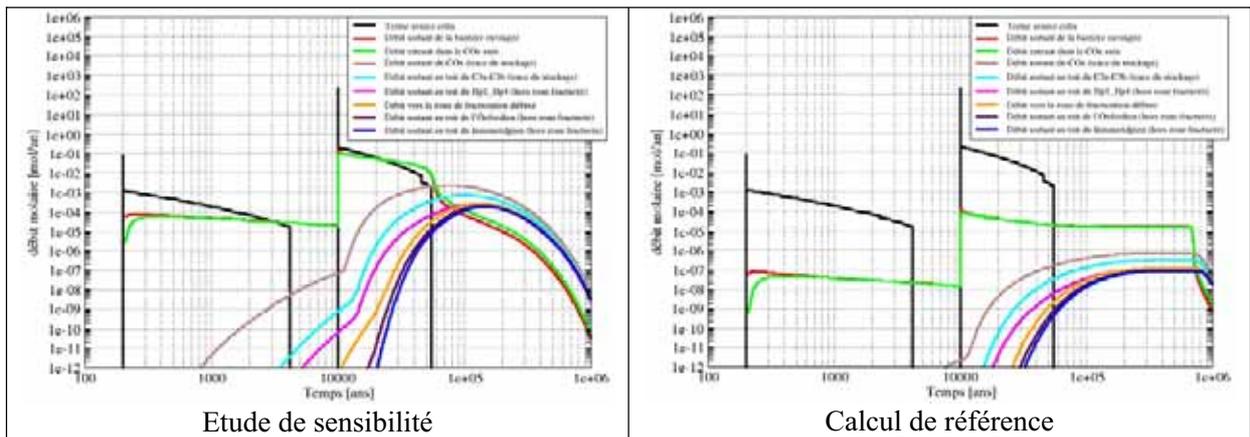


Figure 5.4-37 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI – ⁷⁹Se – Historique de débit molaire

Pour les radionucléides à vie plus courte (¹⁴C et ⁹³Mo), le débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien, qui était nul pour les calculs de référence, devient visible en sensibilité, quoique très faible (voir Figure 5.4-38). En effet, leur faible période de décroissance radioactive engendre une très forte sensibilité aux paramètres de transfert. Cet effet ne se traduit pas dans l'impact, car le temps cumulé de transfert dans la formation hôte et dans les encaissements, bien qu'il soit court dans ces derniers, suffit à assurer la décroissance radioactive.

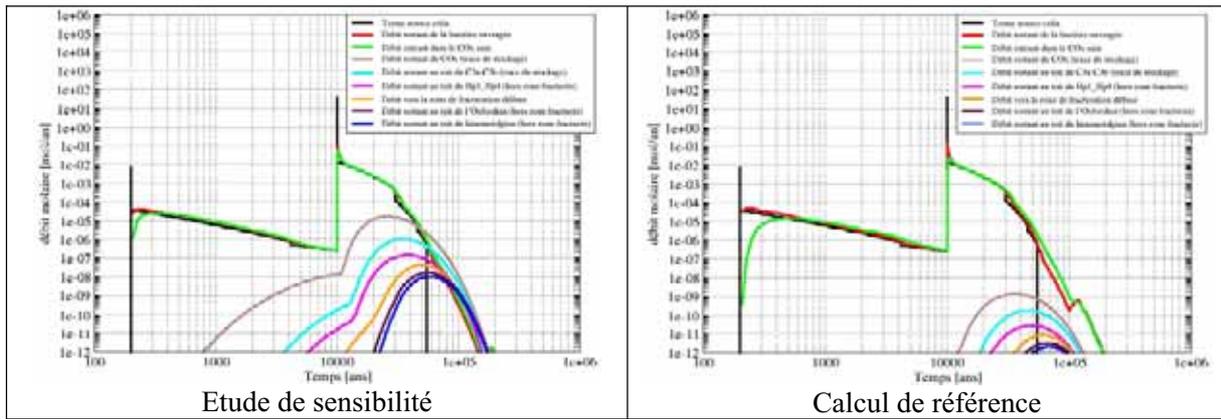


Figure 5.4-38 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI – ¹⁴C – Historique de débit molaire

Pour le ¹⁰Be, l'affectation d'un retard unitaire augmente de façon significative le débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien, alors que celui-ci était négligeable dans le calcul de référence. Néanmoins, sa faible quantité initiale n'implique pas que ce radionucléides ait une contribution significative à la dose totale (voir Figure 5.4-39).

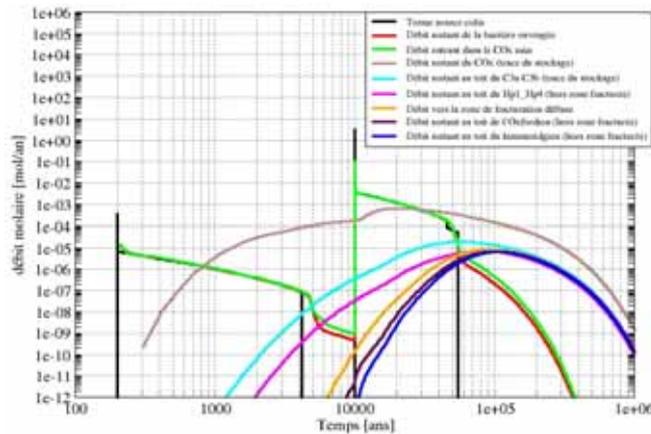


Figure 5.4-39 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI – ¹⁰Be – Historique de débit molaire

Pour le ⁹³Zr, la modification d'un facteur 20 du coefficient de diffusion apparent a pour effet d'augmenter de manière significative les relâchements. Néanmoins, compte tenu de sa période, les maximums théoriques de débit molaire se situent bien au-delà du million d'années. Même si le calcul était prolongé au-delà de cette échéance, les débits n'induiraient pas d'effet sur la dose maximale (voir Figure 5.4-40).

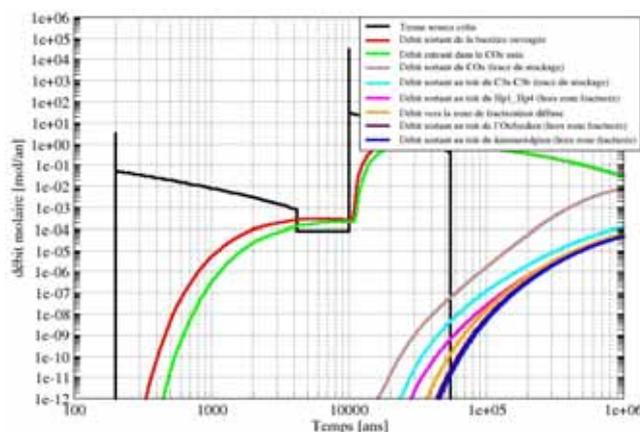


Figure 5.4-40 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI – ^{93}Zr – Historique de débit molaire

Pour les autres radionucléides à vie longue, la modification du coefficient de diffusion apparente ne modifie pas de manière significative le débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien : celui reste très faible ou négligeable.

En conclusion, pour les combustibles usés, la sensibilité aux paramètres hydraulique, de transport et de rétention dans la barrière ouvragée et dans la barrière géologique conduit à un impact qui reste piloté par l'iode 129 et, dans une moindre mesure, le sélénium 79.

Si on traduit les calculs précédents en termes de dose à l'exutoire, pour les combustibles usés (CU1) qui sont ceux dont l'impact est le plus fort, le maximum de dose à l'exutoire Saulx vaut environ 0,04 mSv/an dans le modèle à 1 million d'années comme dans le modèle actuel, aux alentours de 200 000 ans (voir Figure 5.4-41 et Figure 5.4-42). Il reste bien inférieur à la contrainte de dose recommandée par la RFS.

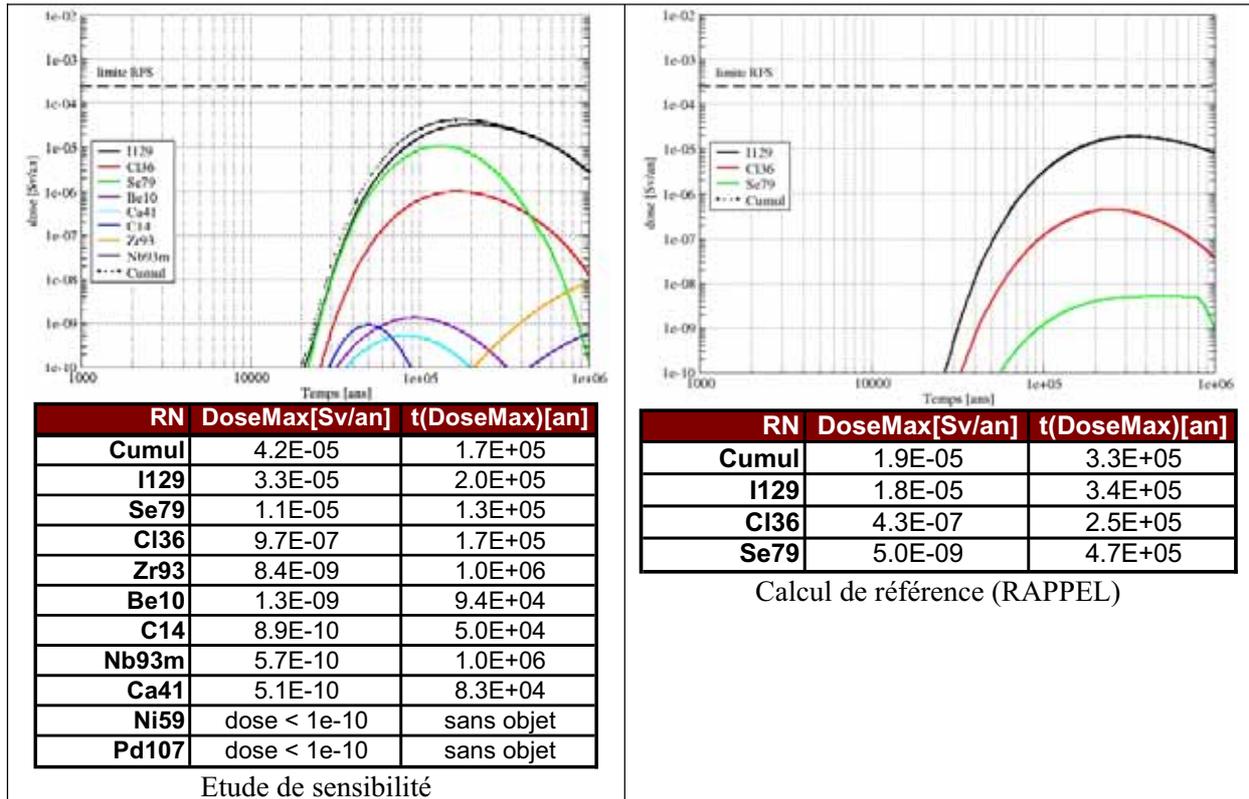


Figure 5.4-41 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis type CUI – Modèle à 1 million d'années

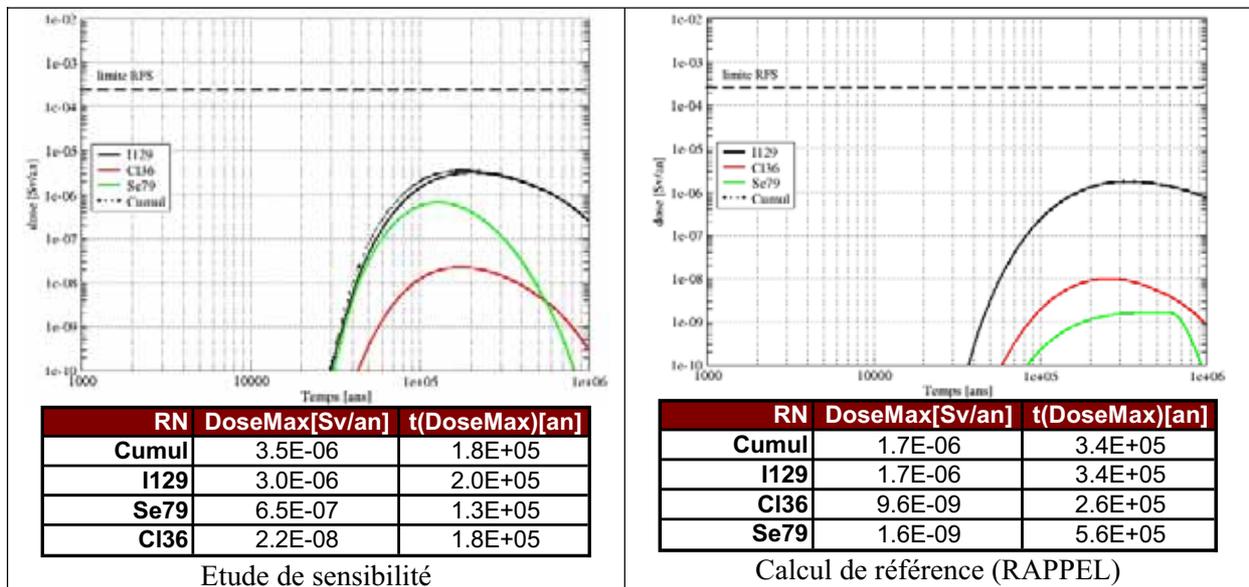


Figure 5.4-42 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis type CU2 – Modèle à 1 million d'années

Pour les déchets C, le sélénium 79 devient le radionucléide dominant jusqu'à 500.000 ans, avec un maximum de dose d'environ 0,003 mSv/an à 200 000 ans pour l'exutoire Saulx. Au-delà de

500 000 ans, l'impact radiologique des déchets C est dominé conjointement par l'iode 129 et le chlore 36, en dessous de 0,0005 mSv/an (voir Figure 5.4-43 et Figure 5.4-44).

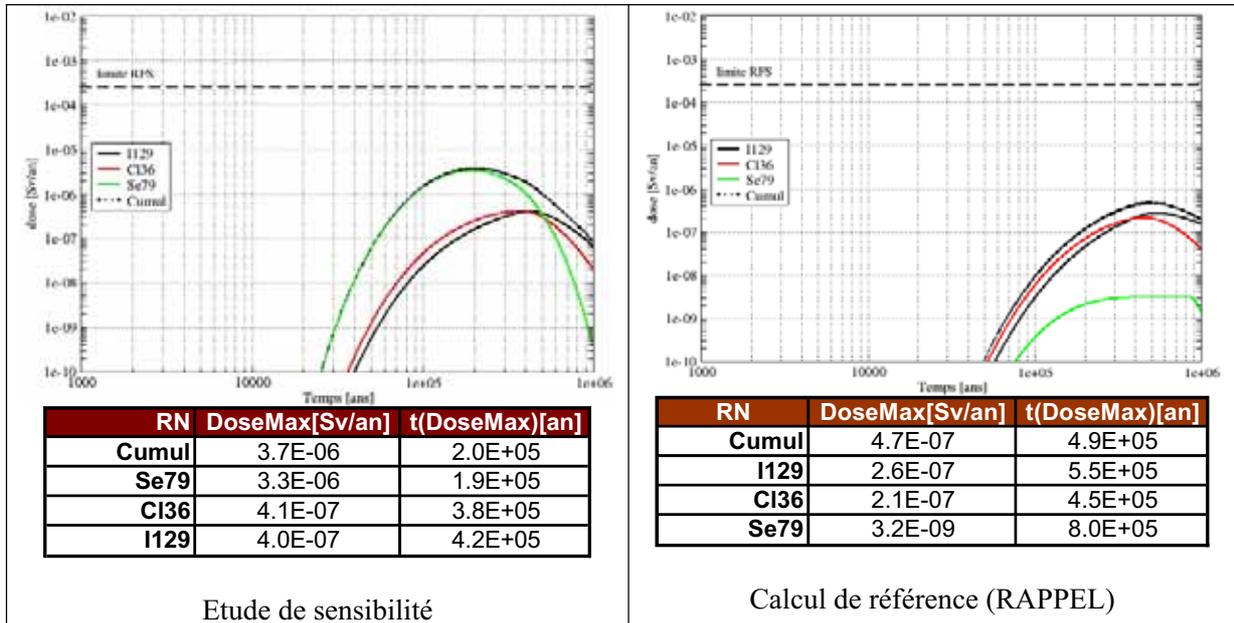


Figure 5.4-43 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis types (C1+C2)

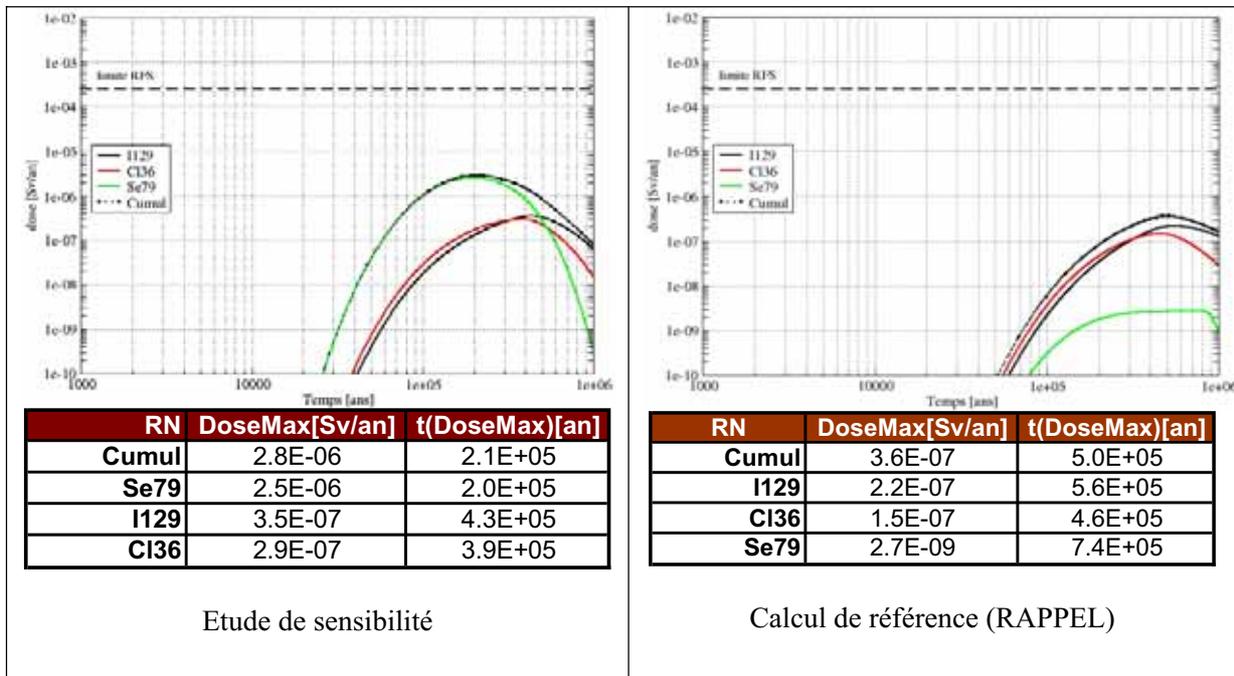


Figure 5.4-44 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis types (C3+C4)

Pour, les déchets B1x, la hiérarchisation observée dans le calcul de référence reste valable dans la sensibilité aux paramètres de transport et de rétention. L'iode 129 et le chlore 36 sont les principaux contributeurs avec une dose totale environ 2 fois plus élevée, de 0,00079 mSv/an (contre 0,00033 mSv/an en référence) pour le modèle à un million d'années et le modèle à l'actuel, à environ 200 000 ans (voir Figure 5.4-45).

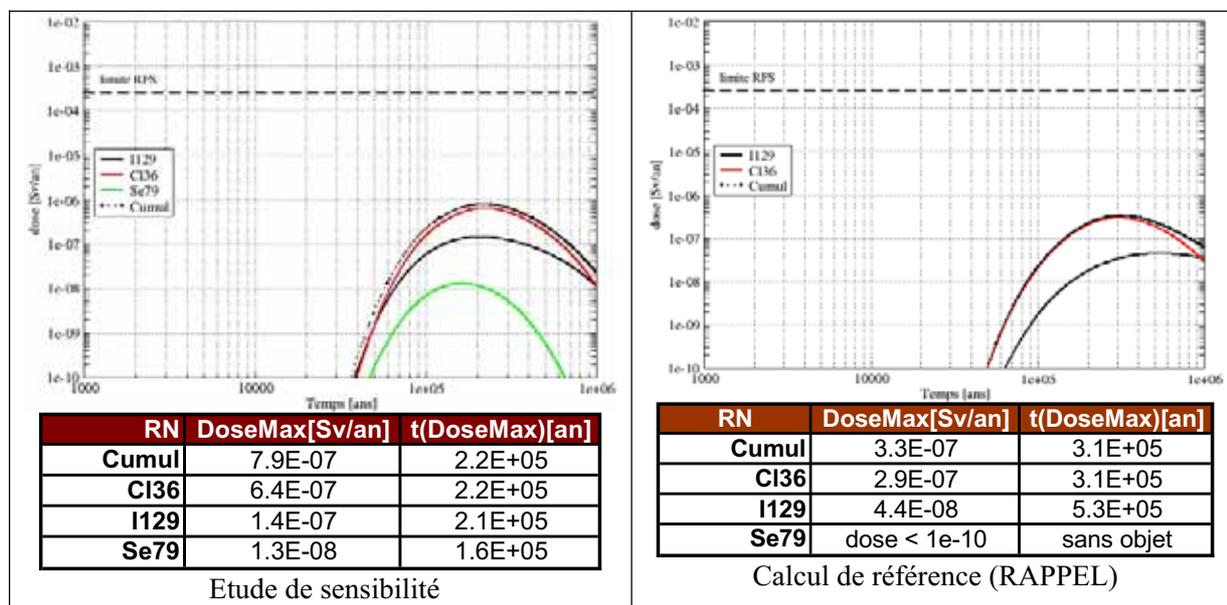


Figure 5.4-45 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis types de déchets B (B1x)

En conclusion, on observe que la modification des paramètres conditionnant les fonctions « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » (la solubilité) et « retarder et atténuer la migration des radionucléides » (la diffusion, le retard), et en particulier celle du coefficient de diffusion, est susceptible de modifier la hiérarchie des radionucléides contribuant à l'impact ainsi que l'impact. On reste cependant dans des gammes de valeurs qui respectent les contraintes de dose de la RFS III.2.f. L'effet n'est pas homogène sur la totalité des radionucléides, et concerne surtout :

- les radionucléides peu sorbés et à vie longue tels que le chlore 36 et l'iode 129 qui présentent un maximum de dose plus précoce et donc un peu plus élevé (moins d'étalement diffusif) ;
- le sélénium, qui devient soluble en sensibilité alors qu'il est immobilisé par sa faible solubilité en calcul de référence ;
- quelques radionucléides qui diffusent beaucoup plus vite en sensibilité du fait de coefficients de retard significativement plus faibles. Notons qu'aucun de ces radionucléides ne contribue significativement à l'impact. En particulier, le molybdène 93 et le carbone 14 qui sont, compte tenu de leur période, très sensibles à une diminution du temps de transfert, n'interviennent pas dans la dose, pas plus que le béryllium 10 et le zirconium 93 dont l'évolution significative du coefficient de retard fait qu'ils présentent des doses très faibles.

Pour les autres radionucléides à vie longue (^{59}Ni , ^{94}Nb , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn , actinides...) l'évolution vers des paramètres de transport et de rétention conservatifs n'engendre pas de modification importante de leur contribution à l'impact : ces derniers restent en grande partie confinés dans la barrière géologique.

● **Sensibilité au coefficient de partage de l'iode dans le Callovo-Oxfordien ($K_d = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$)**

Cette étude est réalisée pour prendre en compte des résultats expérimentaux sur la sorption de l'iode. Elle n'est menée qu'à titre prospectif, de manière à évaluer le gain potentiel associé à une faible rétention de l'iode dans les argilites du Callovo-Oxfordien. Ainsi, tous les paramètres conservent leur valeur de référence, exceptés les coefficients de retard de l'iode dans le Callovo-Oxfordien et l'EDZ dont les valeurs sont données dans le Tableau 5.4-18.

	Coefficient de retard de l'iode	
	Valeur de référence	Valeur de sensibilité
Callovo-Oxfordien sain	1	47
Zone microfissurée	1	47
Zone fracturée	1	16

Tableau 5.4-18 *SEN - Sensibilité au coefficient de retard de l'iode dans le Callovo-Oxfordien.*

L'augmentation du coefficient de retard a pour effet d'étaler fortement les débits molaires relâchés en sortie de Callovo-Oxfordien (voir Figure 5.4-46) : les maxima de débit molaire, sur la période inférieure au million d'années, sont ainsi atténués par rapport au calcul de référence et très sensiblement retardés. Ces derniers apparaissent donc au-delà du million d'années (en théorie vers 10 millions d'années).

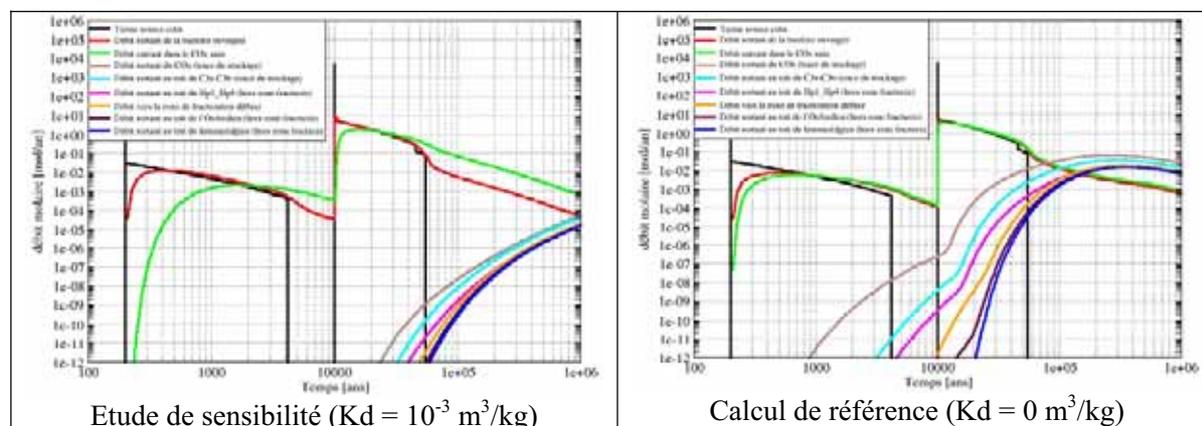


Figure 5.4-46 *SEN - Sensibilité au coefficient de retard de l'iode dans le Callovo-Oxfordien : colis type CUI – ^{129}I – Historique de débit molaire*

L'écart entre le débit maximal calculé en référence et le débit à 1 million d'années en sensibilité est d'environ trois ordres de grandeur. Par ailleurs, la masse restant confinée dans le Callovo-Oxfordien sur la durée de l'analyse (1 million d'années) est beaucoup plus élevée lorsque l'iode est sorbé dans les argilites du Callovo-Oxfordien : pour l'iode contenu dans les colis types C2, elle passe d'un peu moins de 30 % en référence à 99,98 % en sensibilité.

	Référence	Sensibilité
Masse d'iode 129 restant confinée dans le Callovo-Oxfordien sur la durée de l'analyse (1 million d'années) (en % par rapport à la masse initiale)	28 %	99,98 %

Tableau 5.4-19 *Evolution de la masse d'iode 129 contenue dans les colis types C2*

● Sensibilité à l'épaisseur du Callovo-Oxfordien

Cette étude de sensibilité permet d'évaluer les gains associés à une épaisseur de Callovo-Oxfordien plus importante que celle considérée dans le calcul, telle que celle rencontrée au Nord-Ouest de la zone de transposition. Ainsi, l'épaisseur du Callovo-Oxfordien augmente de 10 mètres de part et d'autre du stockage, le stockage restant au milieu de la couche.

D'une façon générale, augmenter la distance de parcours tend à favoriser globalement la convection par rapport à la diffusion, car les temps de parcours diffusifs augmentent avec le carré de la distance, tandis que les temps convectifs y sont seulement proportionnels. Mais, l'augmentation de l'épaisseur de la couche n'a ici aucune influence sur le régime de migration qui reste principalement diffusif. Cette augmentation d'environ 15 % est en effet trop faible pour modifier sensiblement le nombre de Péclet. Par rapport au cas de référence, on constate pour l'iode 129 :

- des débits maximum environ un tiers plus faibles (voir Figure 5.4-47) ;
- une date d'apparition du maximum retardée d'environ 115 000 ans pour le mur de la couche, et de 140 000 ans pour le toit ;
- une diminution d'un quart de la masse totale qui sort du Callovo-Oxfordien, sans modification de la proportion toit/mur.

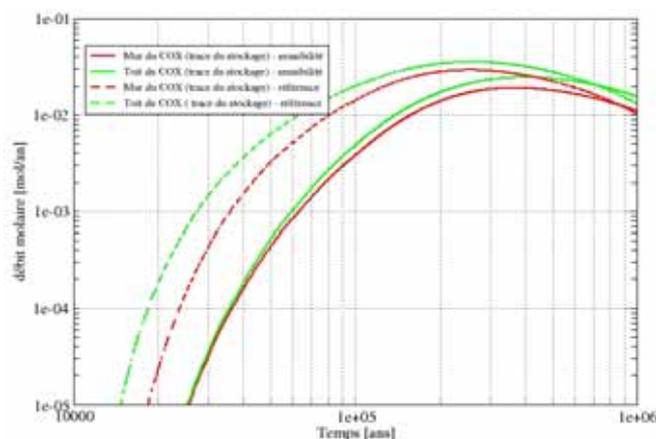


Figure 5.4-47

SEN - Sensibilité à l'épaisseur de Callovo-Oxfordien (150 mètres au lieu de 130 mètres en référence) - Colis type CUI – ¹²⁹I – Historique de débits molaire. (COX = Callovo-Oxfordien)

L'augmentation de l'épaisseur a un effet plus important sur le chlore 36 du fait de sa période radioactive de 300 000 ans, inférieure au temps de transfert dans la couche hôte.

● Sensibilité à la thermique

La thermique qui a été considérée dans les calculs de référence (et par conséquent son influence sur les paramètres de transfert et de rétention) est pénalisante car évaluée sur la base de calculs 2D. Ce choix a été retenu afin de rendre le calcul du SEN plus robuste face aux incertitudes sur la propagation de la chaleur dans le milieu. Une étude de sensibilité prend en compte des calculs thermiques plus réalistes, réalisés en 3D et pour lesquels les différents composants du stockage sont finement représentés.

L'effet de la prise en compte d'un modèle plus réaliste pour la thermique engendre une diminution d'un facteur trois sur les coefficients de diffusion pendant la phase thermique (voir Figure 5.4-48). Les résultats montrent en revanche que l'écart entre une thermique phénoménologique et une thermique pénalisante n'est pas significatif sur les résultats de calcul d'impact radiologique ; en effet, la durée pendant laquelle la thermique modifie les paramètres de transfert et de rétention est beaucoup plus courte que la durée du transfert dans le Callovo-Oxfordien sain, dans les deux cas.

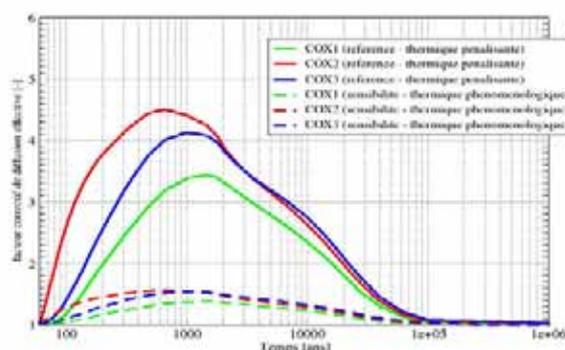


Figure 5.4-48 SEN - Comparaison des facteurs de correction diffusifs (thermique phénoménologique et thermique pénalisante) – colis type CUI

5.4.6.2 Etudes de sensibilité sur les modèles de relâchement

Pour la plupart des colis, les durées de relâchement des radionucléides par les déchets retenues dans le calcul de référence sont courtes devant le temps de transfert dans la barrière géologique. Ainsi, le débit molaire en sortie de barrière géologique ne dépend pas, dans la majorité des cas, de celui émis par les colis au cours du temps mais de la masse totale relâchée par les colis. Ainsi, considérer des durées de relâchement plus courtes ne doit pas a priori engendrer d'évolution significative du débit molaire en sortie de barrière géologique et a fortiori de l'impact. C'est l'objet de ces études de sensibilité que de s'en assurer.

- **Sensibilité au modèle de référence retenu pour les colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (modèle pénalisant)**

Cette étude de sensibilité porte sur les colis de déchets métalliques ne comportant pas de matière organique. Ces colis types correspondent aux déchets activés (colis types B1), aux coques et embouts compactés ne contenant pas de matière organique (colis type B5 hors B5.1) et aux déchets de structure et technologiques en vrac (colis type B6 hors B6.4).

L'étude considère que les produits d'activation contenus dans les gaines et les composants métalliques sont relâchés de façon labile alors qu'il sont relâchés progressivement dans le calcul de référence (sur des durées de l'ordre de 100 000 ans). Cette étude considérant un modèle de relâchement pénalisant permet largement de couvrir les incertitudes résiduelles relatives à la variabilité des déchets, à l'effet éventuelles d'espèces agressives issues de la radiolyse de l'eau ou aux phénomènes de corrosion localisée.

L'analyse ne porte que sur le chlore 36, présent en partie dans les gaines, dans la mesure où l'iode 129 et le sélénium 79 sont déjà considérés comme relâchés de manière labile dans le calcul de référence.

Les résultats mettent en évidence que la prise en compte d'un terme source labile, engendrant un relâchement plus important sur une très courte période, n'induit pas de modification par rapport au calcul de référence sur les débits molaires en sortie de barrière géologique (voir Figure 5.4-49). En effet, les durées de relâchement restent courtes au regard des temps de transfert dans la barrière géologique, que ce soit dans le calcul de référence ou en étude de sensibilité.

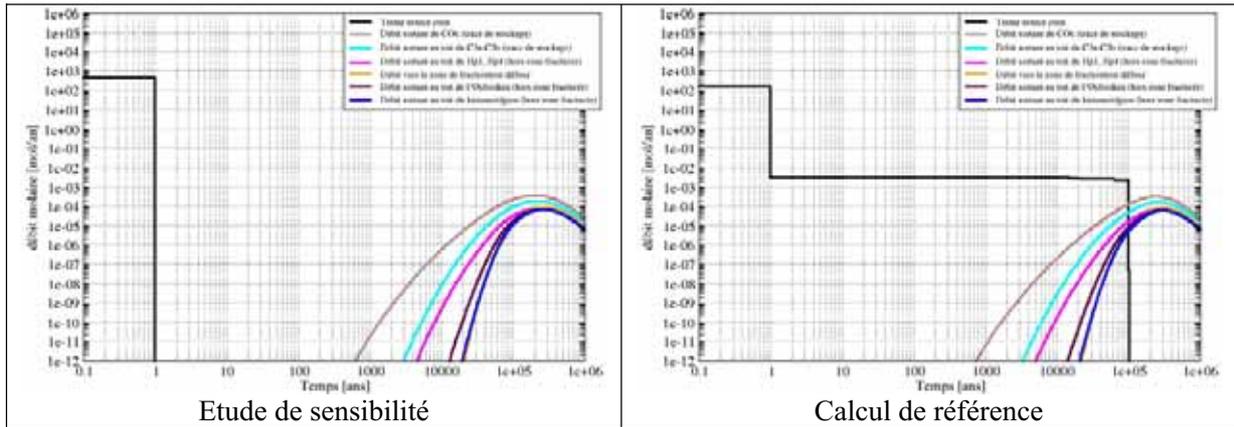


Figure 5.4-49 SEN - Sensibilité au modèle de référence retenu pour les colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (modèle pénalisant) - colis type B1x – ³⁶Cl - historique de débit molaire

● **Sensibilité aux paramètres du terme source de référence des colis de bitumes (modèle pénalisant)**

Cette étude de sensibilité porte sur les colis de déchets bitumés (colis type B2) ; elle consiste à retenir un modèle de relâchement pénalisant qui couvre les incertitudes résiduelles liées à l'évolution des colis (fluage, fissuration...). Le modèle retenu en sensibilité considère un relâchement sur 1000 ans avec un taux constant de 10^{-3} /an, alors que le modèle retenu en référence engendre un relâchement plus lent, avec un taux inversement proportionnel à la racine carré du temps [$\tau_R = 4,5.10^{-3}/\sqrt{t}$].

Pour les mêmes raisons que pour les colis de déchets B étudiés précédemment, les résultats mettent en évidence que la prise en compte d'un terme source pénalisant, engendrant un relâchement plus important sur une plus courte période, n'induit pas de modification par rapport au calcul de référence (voir Figure 5.4-50).

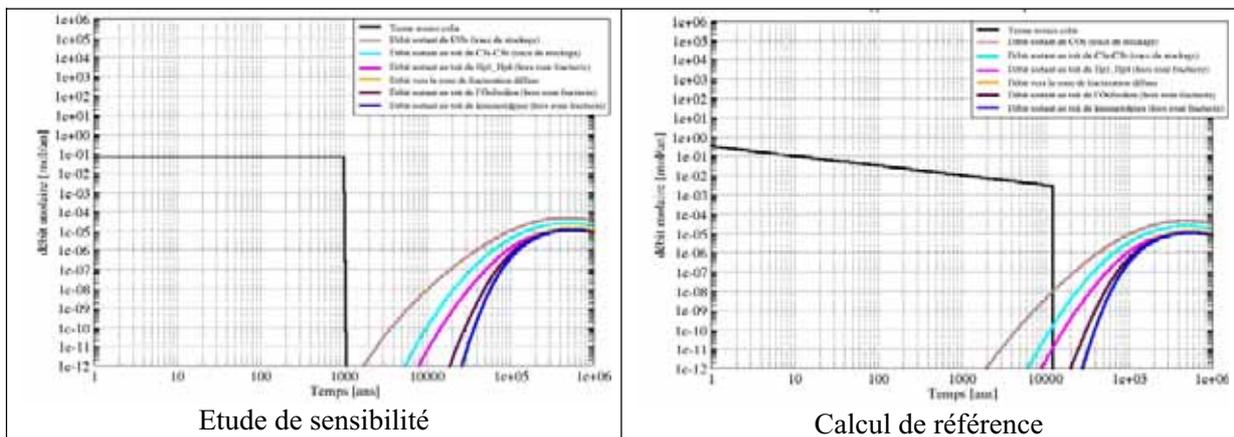


Figure 5.4-50 SEN - Sensibilité au modèle de référence retenu pour les colis type B2 (modèle pénalisant) - colis type B2 – ¹²⁹I - historique de débit molaire

● **Sensibilité au conteneurage des colis ne contenant pas de matière organique et ne dégageant pas d'hydrogène (stockés dans des alvéoles de types B1x)**

Cette étude est réalisée à titre prospectif pour évaluer le gain potentiel apporté par un béton durable pour les conteneurs des colis de déchets B. Dans ce cas, le béton des conteneurs présente des propriétés diffusives, hydrauliques et de rétention jusqu'à 10 000 ans. Tous les autres paramètres du calcul de référence sont inchangés.

Le Tableau 5.4-20 présente les paramètres hydrauliques, de transport et de rétention retenus dans le modèle de référence et en sensibilité.

	Période [ans]	Calcul de référence Béton de structure				Calcul de sensibilité Béton de conteneur durable (jusqu'à 10 000 ans)			
		$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]	$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]
³⁶ Cl	302 000	0,3	6.10 ⁻¹⁰	1	soluble	0,1	2.10 ⁻¹³	1	soluble
¹²⁹ I	15 700 000	0,3	6.10 ⁻¹⁰	8	soluble	0,1	2.10 ⁻¹³	28	soluble

Tableau 5.4-20 SEN - Valeurs de référence et de sensibilité des paramètres de transport dans les conteneurs de colis B1x.

La prise en compte d'un béton performant pendant les dix mille premières années du stockage a pour effet de diminuer à minima d'un ordre de grandeur les débits molaires et de retarder leur sortie de l'alvéole pendant les 10 000 premières années, en particulier pour l'iode 129 dont le coefficient de retard évolue de 8 à 28 (voir Figure 5.4-51) Néanmoins, la quantité de radionucléides émise par l'alvéole reste très faible pendant cette période (de quelques % seulement).

Au-delà de 10 000 ans les courbes avec ou sans conteneur sont confondues.

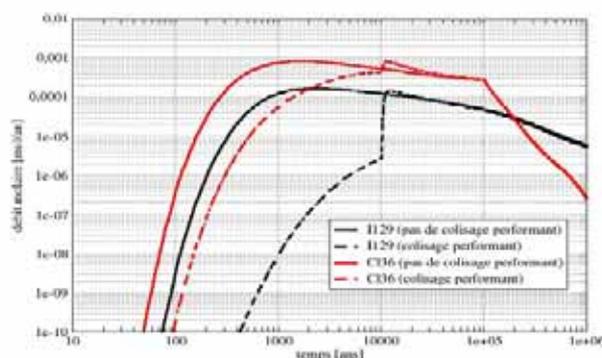


Figure 5.4-51 SEN - Evolution du débit molaire sortant des alvéoles de déchets B1x pour ¹²⁹I et ³⁶Cl – comparaison avec et sans conteneurage efficace

La durabilité du conteneurage étant inférieure de plus d'un ordre de grandeur au temps de transfert diffusif dans le Callovo-Oxfordien, l'influence n'est pas significative sur le débit molaire en sortie de barrière géologique (voir Figure 5.4-52). En revanche, l'introduction d'un tel conteneur apporte un élément de sûreté supplémentaire pendant les premières phases de temps.

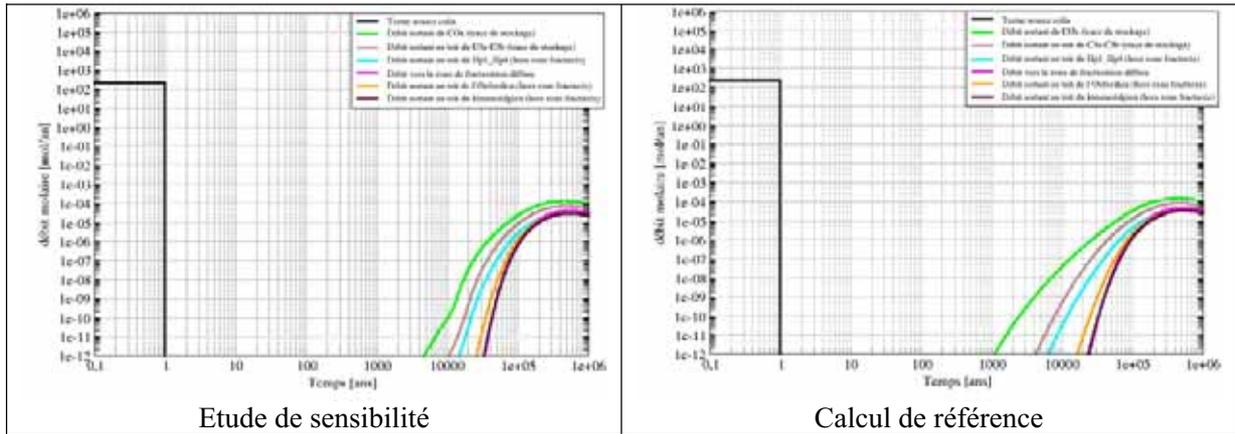


Figure 5.4-52 SEN - Sensibilité aux performances du conteneurage - colis type B1x – ¹²⁹I - historique de débit molaire

● **Sensibilité aux paramètres du terme source de référence des colis C (modèle $V_0.S \rightarrow V_r$)**

Cette étude a consisté à modifier le modèle de relâchement des déchets vitrifiés, en adoptant des valeurs conservatives pour la vitesse initiale et en considérant un taux de fracturation plus élevé. Les résultats des calculs ne montrent aucune modification des résultats par rapport aux calculs de référence – voir Figure 5.4-53).

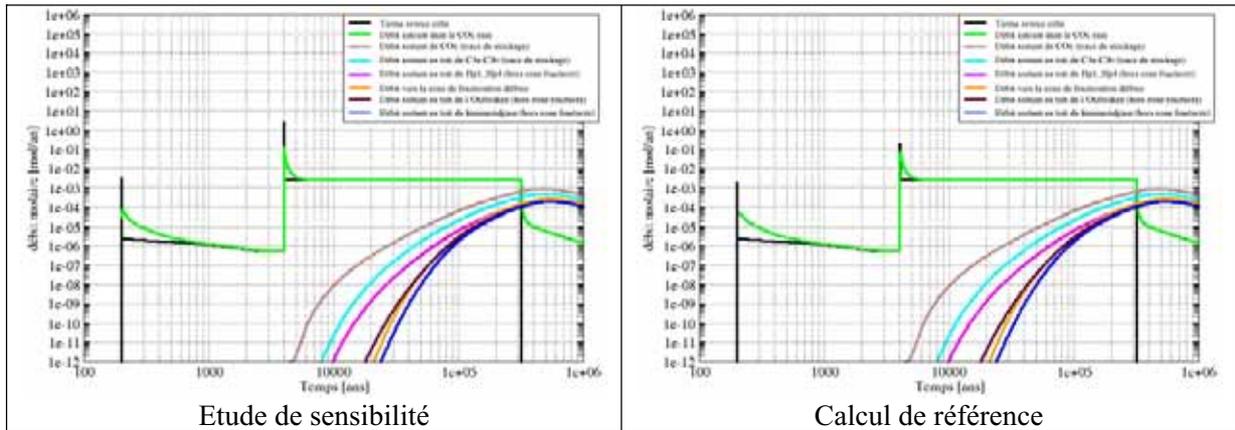


Figure 5.4-53 SEN - Sensibilité aux paramètres du terme source de référence des colis C (modèle $V_0.S \rightarrow V_r$) - colis type C1 + C2 – ¹²⁹I - historique de débit molaire

● **Sensibilité au modèle de relâchement des colis C (modèle $V_0.S$)**

Une étude de sensibilité permettant de couvrir les incertitudes associées au modèle à vitesse résiduelle a été réalisée. Cette étude a consisté à évaluer l’effet d’un modèle de relâchement plus pénalisant se fondant uniquement sur la vitesse de dissolution initiale (modèle $V_0.S$). A titre d’exemple, les débits molaires maximum et les dates d’apparition des maxima sont donnés pour les colis types C2 dans le Tableau 5.4-21. Les débits molaires des colis types C4 sont légèrement plus faibles.

Débit molaire maximal en sortie de Callovo-Oxfordien (mol/an) et date des maxima (ans)		
	Référence	Sensibilité
^{129}I	$8,6 \cdot 10^{-4}$ 460 000 ans	$9,1 \cdot 10^{-4}$ 250 000 ans
^{36}Cl	$2,2 \cdot 10^{-4}$ 380 000 ans	$3,8 \cdot 10^{-4}$ 190 000 ans

Tableau 5.4-21 SEN - Atténuation ^{129}I et ^{36}Cl – C1+C2 – comparaison entre les modèles $V_0.S$ (sensibilité) et le modèle $V_0.S \rightarrow V_r$

Les enseignements de cette étude de sensibilité sont les suivants.

- La date d'apparition des maxima de débit molaire est plus précoce en sensibilité qu'en référence (maxima avancés de 200 000 ans environ). En effet, la durée de relâchement du modèle $V_0.S$ devenant plus courte que le temps de transfert dans formation hôte, l'influence du modèle de relâchement est moins visible en sortie de barrière géologique. Les dates d'apparition des maxima de débits molaires deviennent alors comparables à celles observées pour les combustibles usés (voir Figure 5.4-54). La date d'apparition du maximum de débit molaire est plus tardive pour l' ^{129}I (250 000 ans) que pour le chlore 36 (190 000 ans) qui bénéficie de la décroissance radioactive. Ce décalage dans le temps s'applique bien entendu également à la dose aux exutoires.
- Le maximum de débit d'activité en sortie de Callovo-Oxfordien est quasi-identique pour l'iode 129 entre la sensibilité et la référence alors qu'il augmente d'un facteur 2 pour le chlore 36 dans l'étude de sensibilité. En effet, la masse de chlore 36 étant relâchée plus rapidement, la date d'apparition du maximum de débit molaire devient inférieure à la période de décroissance radioactive du chlore 36 (302 000 ans). Dans ces conditions, ce dernier bénéficie moins de la décroissance.

Ainsi, le modèle ($V_0.S \rightarrow V_r$) présente un intérêt significatif par rapport au modèle ($V_0.S$) étudié en référence dans la mesure où il contribue à atténuer le débit molaire du chlore 36 du fait de la décroissance radioactive, et il retarde l'apparition du maximum de débit molaire de 200 000 ans environ.

Néanmoins, dans la mesure où l'impact des colis de déchets vitrifiés est très inférieur à la contrainte de dose de 0,25 mSv/an (0,00063 mSv/an pour C0, C1 et C2, et 0,00049 mSv/an pour C3 et C4), l'adoption d'un modèle à vitesse de dissolution constante ne remet pas en cause l'acceptabilité de l'impact (voir Figure 5.4-55).

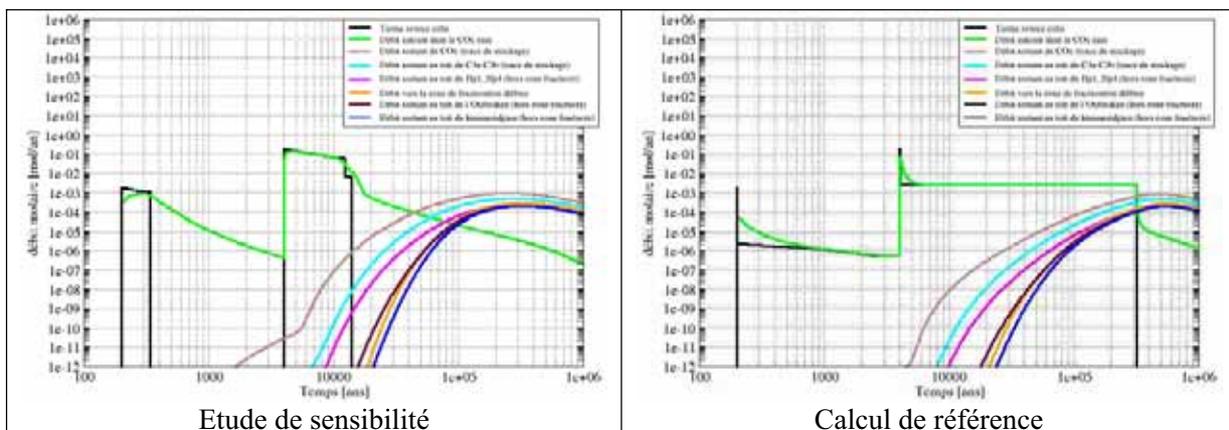


Figure 5.4-54 SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis C (modèle $V_0.S$) - colis type C1 + C2 – ^{129}I - Historique de débit molaire

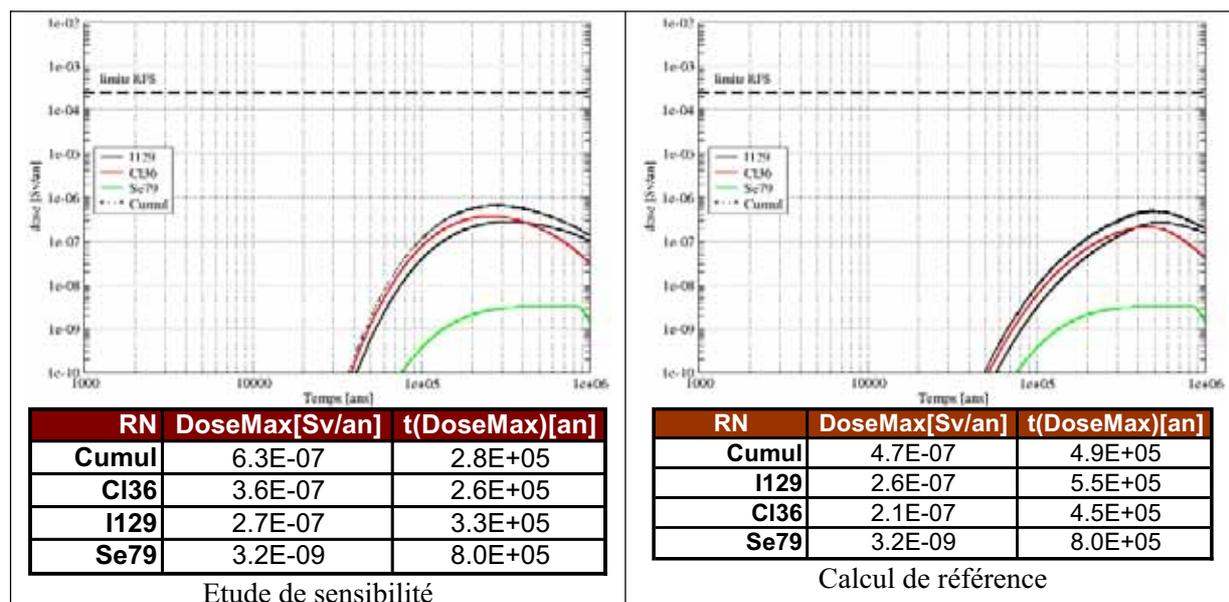


Figure 5.4-55 SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis C (modèle $V_0.S$) – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - colis type C1 + C2

- **Sensibilité aux paramètres du modèle de relâchement de référence des combustibles usés (valeurs conservatives)**

Cette étude a consisté à considérer des valeurs conservatives de vitesse de dissolution radiolytique dix fois plus élevées, pour couvrir des incertitudes résiduelles sur ce modèle, liées essentiellement à l'influence de la température.

Les résultats de l'étude ne montrent pas de modification significative par rapport au calcul de référence. En effet, la masse sortant du Callovo-Oxfordien sur un million d'années reste quasiment identique à celle du calcul de référence (seulement 1 % de masse supplémentaire à la sortie du Callovo-Oxfordien, par rapport au cas de référence pour l'iode 129 des CU1). Ceci est corrélé au fait que la durée de relâchement par la matrice est déjà nettement inférieure à la durée moyenne de transfert des radionucléides dans la formation hôte dans le calcul de référence ; le flux en sortie de barrière géologique n'est alors pas dépendant du débit émis par les colis mais de la masse totale relâchée par ces derniers. C'est a fortiori le cas pour une durée de relâchement encore plus courte que celle du calcul de référence (voir Figure 5.4-56).

Ainsi en SEN, l'influence d'un terme source pour les combustibles usés plus défavorable que celui retenu en référence n'est pas significative.

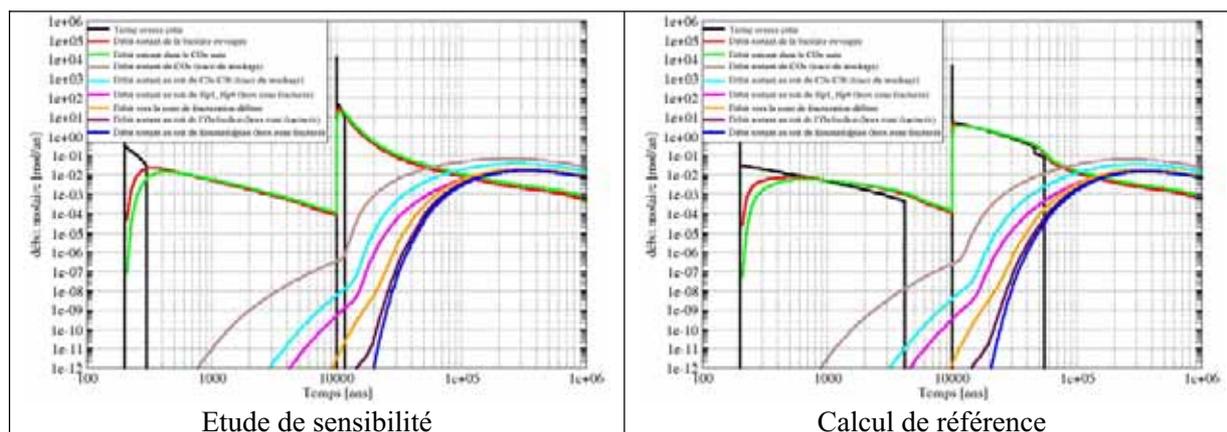


Figure 5.4-56

SEN - Sensibilité aux paramètres du modèle de relâchement de référence des colis combustibles usés (valeurs conservatives) - colis type CUI – ^{129}I - historique de débit molaire

● **Sensibilité au modèle de relâchement des colis combustibles usés (contrôle par la solubilité de l'uranium)**

Cette étude a consisté à considérer un modèle alternatif fondé sur la dissolution classique de l'uranium au sein des combustibles usés ; la dissolution est alors contrôlée par la solubilité de l'uranium, (de $7.10^{-7} \text{ mol/m}^3$), et engendre des cinétiques de relâchement plus lentes. Ce modèle conduit à un relâchement beaucoup plus progressif de l'activité que dans le calcul de référence. Hormis le modèle de dissolution classique qui se substitue au modèle de dissolution radiolytique, les autres caractéristiques restent inchangées (fraction labile, coefficient D3AI, taux de relâchement des produits d'activation contenus dans les matériaux métalliques).

Le Tableau 5.4-22 fournit la masse d'iode 129 émise par les colis sur 1 million d'années pour le modèle de dissolution radiolytique et pour celui de dissolution classique. On note qu'à un million d'années, la totalité de la masse d'iode 129 présente initialement dans les colis est relâchée par ces derniers pour le modèle de dissolution radiolytique alors que cette quantité est de 10 % pour le modèle de dissolution classique. Par ailleurs, pour ce dernier, l'essentiel de cette masse provient de la fraction labile, la fraction d'activité relâchée par la matrice ne représente qu'un pourcent de la masse totale initiale.

Masse d'iode 129 relâchée par les combustibles usés sur la durée de l'analyse (1 million d'années)			
Terme source retenu en référence (dissolution radiolytique)		Terme source étudié en sensibilité (contrôle par la solubilité de l'Uranium)	
Masse relâchée par la fraction labile	Masse relâchée par la matrice	Masse relâchée par la fraction labile	Masse relâchée par la matrice
8,4 %. M_0 ⁷⁴	91,6 %. M_0	8,4 %. M_0	1 % M_0
Soit 100 % de la masse totale initiale d'iode 129		Soit 9,4 % de la masse totale initiale d'iode 129	

Tableau 5.4-22

SEN - Intégrale de débit molaire relâché à 1 million d'années pour l'iode 129 des CUI

⁷⁴ M_0 est la masse initiale totale

Ainsi dans la mesure où, à un million d'années, seuls 10 % de la masse ont été relâchés par les colis et que cette activité est en grande partie labile, le débit molaire en sortie de barrière géologique devrait être atténué d'autant (facteur 10) entre le calcul de référence et le calcul de sensibilité. Les résultats le confirment : ils mettent effectivement en évidence que l'essentiel de l'impact radiologique de l'iode ^{129}I est produit par la fraction labile et que le débit molaire sortant du Callovo-Oxfordien est environ 10 fois plus faible dans l'étude de sensibilité que dans le calcul de référence. Les doses associées sont également plus faibles d'environ un ordre de grandeur (maximum de dose de 0,0018 mSv/an pour l'exutoire Saulx de l'Oxfordien contre 0,019 mSv/an à 330 000 ans pour la référence, voir Figure 5.4-57 et Figure 5.4-58).

En ce qui concerne les combustibles usés CU2, l'écart entre les débits molaires d'iode ^{129}I sortant du Callovo-Oxfordien en référence et en sensibilité est un peu moins marqué (gain d'un facteur 3 environ) puisque la fraction labile que l'on conserve en sensibilité est plus importante (de l'ordre de 35 %). Ainsi, en référence, la totalité de l'activité est relâchée par les colis de CU2 sur la durée de l'analyse alors qu'en sensibilité seulement 36 % de la masse l'ont été (35 % de labile et 1 % environ dû à la dissolution classique). La dose est donc environ 3 fois plus faible que pour le calcul de référence (0,00059 mSv/an contre 0,0017 mSv/an).

En ce qui concerne le chlore ^{36}Cl , le gain est moindre puisque plus de la moitié de l'inventaire est contenue dans les gaines dont la durée de relâchement est de l'ordre de 10 000 ans. Compte tenu des temps de transfert dans la barrière géologique, elle est donc assimilable d'un point de vue physique à une fraction labile. Elle n'est pas sensible au passage à un modèle de relâchement plus lent.

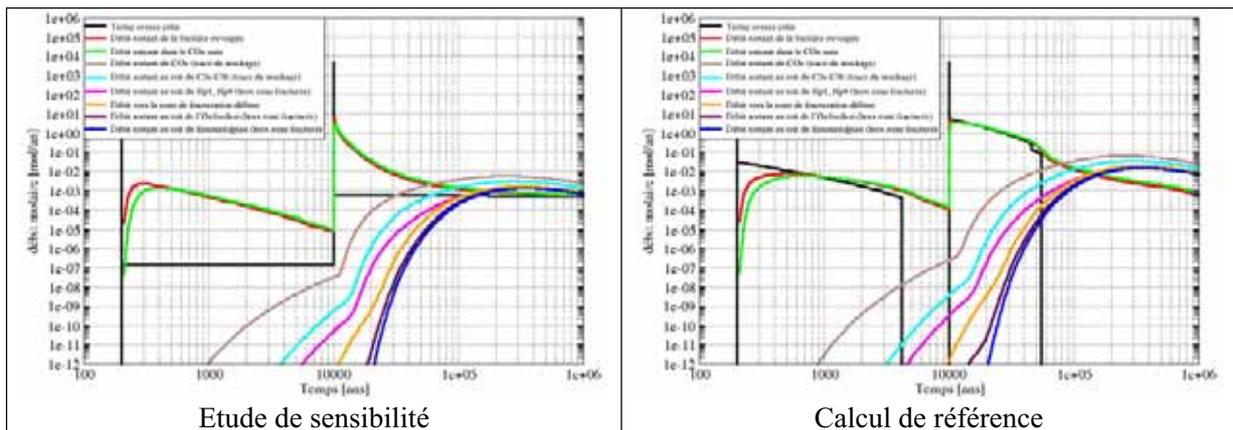


Figure 5.4-57

SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis combustibles usés (contrôle par la solubilité de l'uranium) - colis type CU1 - ^{129}I - historique de débit molaire

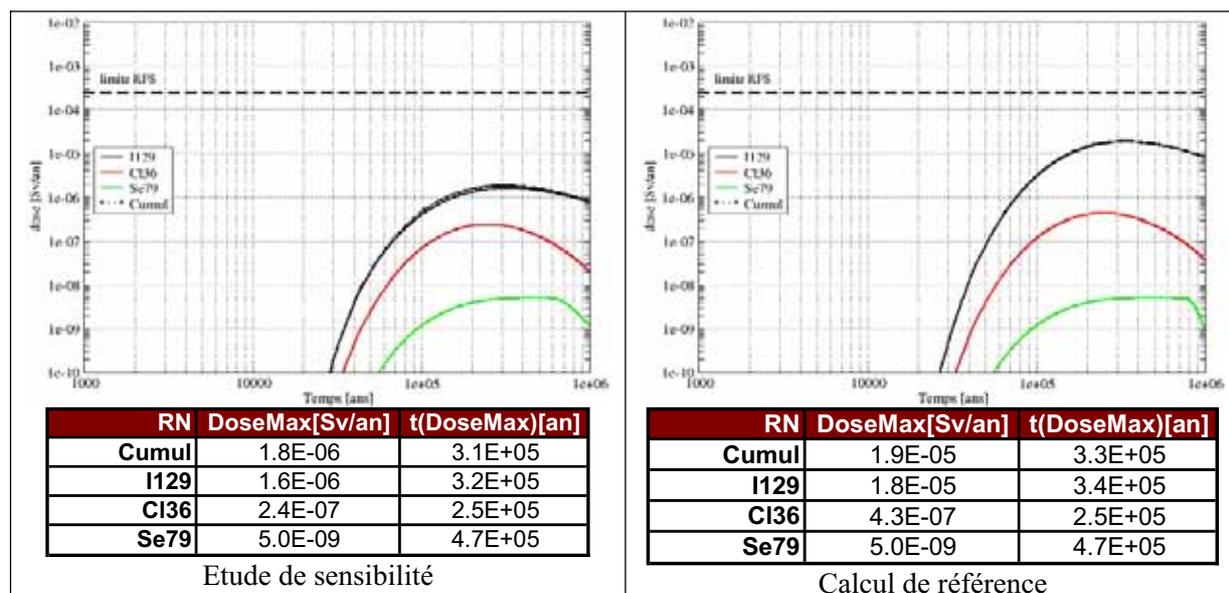


Figure 5.4-58

SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis combustibles usés (contrôle par la solubilité de l'uranium) - colis type CUI - ^{129}I - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien

5.4.6.3 Etude de sensibilité portant sur la globalité du modèle de calculs

- Sensibilité sur les transferts pendant le transitoire hydraulique

Définition de l'étude de sensibilité

Comme on l'a vu, le modèle du scénario d'évolution normale néglige la durée du transitoire hydraulique, et se place directement dans une situation où le stockage est totalement resaturé dès l'instant initial. Le paragraphe 5.3.1.3 a permis d'expliquer dans quelle mesure ce choix était conservatif et ne conduisait pas à sous-estimer l'impact. En particulier, on a vu que les phases de transitoire hydraulique ne sont pas des phases au cours desquelles les radionucléides sont susceptibles d'être relâchés.

Néanmoins, à ce stade des études, il n'a pas été retenu de fonction de confinement pour le complément de colisage B. Du point de vue de l'analyse fonctionnelle, on ne peut donc exclure que des relâchements de radionucléides aient lieu tôt après la fermeture du stockage, donc en particulier lors de la phase pendant laquelle les gaz ont une influence sur les pressions et les écoulements d'eau. Un tel relâchement est en revanche, du point de vue de la phénoménologie, difficile voire impossible dans la mesure où il correspond à une phase où les alvéoles de déchets B sont fortement désaturées. On a cependant décidé de le prendre en compte, pour en étudier l'influence, en traitant en étude de sensibilité un relâchement par les alvéoles de déchets B à un stade où les écoulements ne sont pas pilotés par les gradients naturels, mais par des phénomènes transitoires.

De même, on n'a pas exclu la possibilité d'un défaut de surconteneur C ou de conteneur de combustible usé. Pour les mêmes raisons que celles évoquées ci-dessus, un tel défaut n'entraîne, en principe, pas un relâchement pendant le transitoire hydraulique. En étude de sensibilité, on prend cependant en compte la possibilité que les colis de déchets thermiques défaillants de manière précoce puissent relâcher leur activité dans un milieu soumis simultanément au transitoire thermique et au transitoire hydraulique.

La difficulté spécifique d'une telle simulation est la représentation des écoulements dans un milieu au sein duquel se trouve une quantité de gaz suffisamment importante pour influencer sur le degré de saturation des matériaux. Dans une telle configuration, le gaz occupe tout ou partie de la porosité des matériaux, et une fois qu'il a évacué l'eau libre que sa pression lui permettait de chasser, il empêche

l'eau de circuler. Il réduit donc la porosité accessible à l'eau. Du fait de cette désaturation, la migration des solutés par diffusion et convection dans les différents milieux poreux est réduite.

Les différents phénomènes mis en jeu, leur couplage et leurs enchaînements ne peuvent pas être représentés finement avec les outils actuels. Aussi, l'Andra a effectué un calcul de transfert simplifié et majorant depuis les alvéoles de stockage jusqu'au toit de la couche hôte, en considérant un transfert dans la barrière géologique et dans les différents ouvrages de stockage. On a opté pour une représentation pénalisante purement conventionnelle, dans laquelle les gaz mettent en pression l'eau du milieu sans désaturer celui-ci. La pression de gaz crée donc un écoulement forcé dans les ouvrages et dans la formation hôte, et peut engendrer une augmentation significative du transfert convectif des solutés. Les calculs réalisés ne traduisent pas une réalité physique. En effet, les valeurs de surpression issues de calculs préparatoires plus fins (avec phénomène de désaturation/resaturation et influence des pressions de gaz) au niveau d'alvéoles et de galeries de stockage sont repris de manière pénalisante en les imposant dans un système où tous les matériaux sont saturés (et dont les propriétés de transfert et de rétention sont celles à saturation). Le calcul considère un enchaînement de régimes hydrauliques permanents saturés, correspondant à différentes valeurs de surpression appliquées par plage de temps. La représentation de telles surpressions dans un milieu qui se maintient à saturation supposerait que de l'eau soit « créée » en permanence dans les zones qui subissent la pression de gaz, de manière à entretenir l'écoulement.

Le calcul est traité pour les deux voies de transfert (la formation hôte et les ouvrages d'accès), et pour les zones de stockage de déchets B1x et de combustibles usés (enveloppes du cas des déchets vitrifiés en terme d'impact). En ce qui concerne les combustibles usés, l'alvéole contenant le colis défaillant est située près de la sortie de la zone de stockage la plus proche des puits ; cette configuration permet d'une part de minimiser la distance entre le colis défaillant et les puits, d'autre part de maximiser l'influence hydraulique des galeries de stockage situées en amont.

Modélisation des transitoires

La prise en compte du transitoire thermique, pour le calcul conduit sur les CU1, est la même que pour le calcul de référence. De plus, dans la mesure où la présence de gaz peut accroître le transport convectif dans la formation hôte et le rendre prépondérant face au transport par diffusion, l'effet de la température sur la perméabilité a également été pris en compte pour modéliser le transfert à travers le milieu géologique.

Le transitoire hydraulique est pris en compte en appliquant dans le modèle les pressions issues des modélisations portant sur la production et l'accumulation de gaz [61]. Ces calculs sont pénalisants, dans la mesure où ils supposent que la corrosion se déroule avec une vitesse forte pour un milieu anoxique et réducteur (supérieure au micron par an) et qu'elle est indépendante du degré de saturation (voir chapitre 6, paragraphe 6.2.8.3).

Pour la voie de transfert par le milieu géologique, ces pressions d'eau sont appliquées sur toute la hauteur du Callovo-Oxfordien, par tranches de temps successives. Elles sont relativement fortes dans les alvéoles mais se dissipent assez rapidement, au-delà de quelques mètres (voir Figure 5.4-59). On rappelle que le paroxysme de pression se produit aux alentours de 500 ans pour les déchets B et 2000 ans environ pour les combustibles usés CU1. Pour les combustibles usés, on considère qu'au-delà de 10 000 ans, la pression a suffisamment baissé pour qu'on n'ait plus à simuler de charge imposée dans le Callovo-Oxfordien par les gaz.

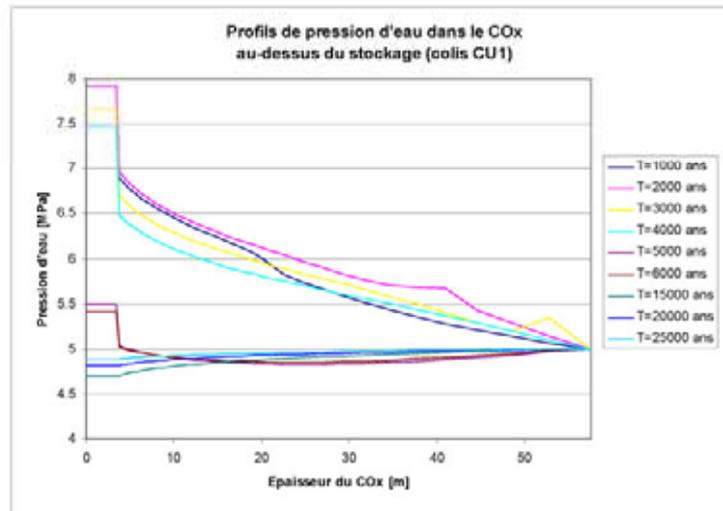


Figure 5.4-59 *Pression d'eau dans le Callovo-Oxfordien (COX) au-dessus du stockage – colis type CU1*

Pour la voie de transfert par les ouvrages, dans les alvéoles de déchets B1x et pour l'alvéole avec un colis défaillant de CU1, la modélisation adopte un schéma pénalisant de manière à simplifier le calcul : le transitoire hydraulique est représenté sur deux phases de temps ; pour chacune de ces phases, on considère dans l'enceinte de l'alvéole (en fait au niveau du colis) une pression d'eau correspondant à la pression de gaz maximale au sein de l'alvéole telle que présentée sur la Figure 5.4-60 et la Figure 5.4-61. On néglige en revanche la présence des gaz au sein des galeries de manutention et au-delà. Cela maximise le gradient de pression entre l'alvéole et la galerie attenante, et « force » ainsi la circulation dans les ouvrages. Chaque alvéole concernée se comporte ainsi comme une « source » d'eau sous pression, qui alimente le stockage.

Dans le cas des combustibles usés, la surpression hydraulique imposée par les gaz est :

- d'environ 300 mètres pendant 5 000 ans (correspondant à une pression de gaz de l'ordre de 9 MPa) ;
- puis 50 mètres pendant 5 000 autres années ;
- puis un retour à l'état d'équilibre avec le milieu.

Pour les déchets B, la surpression hydraulique appliquée est d'environ :

- 200 mètres pendant 1 000 ans ;
- puis de 100 mètres sur les 2 000 ans suivants ;
- puis retour à l'état d'équilibre avec le milieu.

Il importe de souligner le caractère irréaliste de cette modélisation, qui ne rend pas compte d'une réalité physique, mais garantit le conservatisme de l'approche.

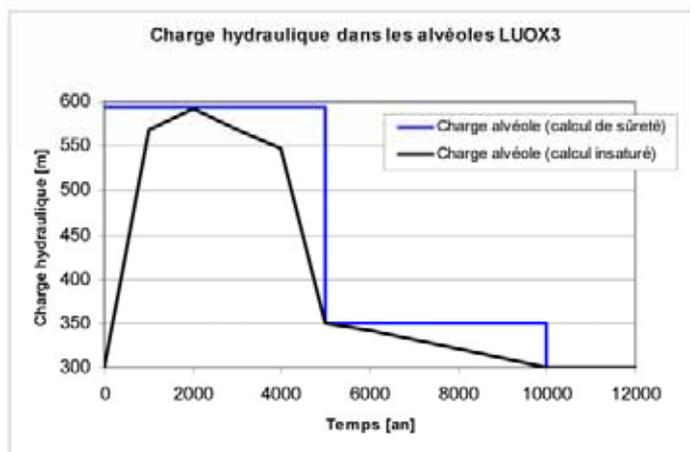


Figure 5.4-60

SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – Charge hydraulique imposée pendant la phase de surpression – colis type CUI

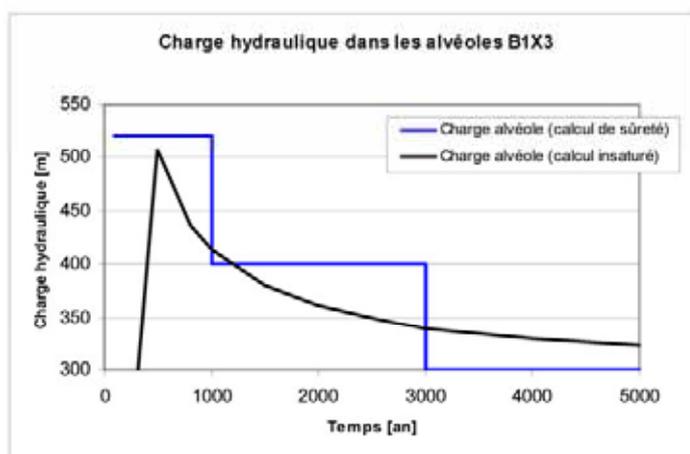


Figure 5.4-61

SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – Charge hydraulique imposée pendant la phase de surpression – colis type B1x

Résultats de calcul

Combustibles usés

Pour la voie de transfert par la barrière géologique, les résultats mettent en évidence que les débits molaires en sortie de Callovo-Oxfordien relatifs au colis défaillant (avec et sans prise en compte des surpressions de gaz) sont à peu près identiques. En effet, la durée du transitoire hydraulique est suffisamment courte au regard du temps de transfert pour que son influence ne soit pas visible en sortie de Callovo-Oxfordien. Rappelons en outre qu'en SEN, l'impact du colis défaillant est masqué par celui des colis non défaillants (pour lesquels les surpressions n'ont pas d'influence). Cela permet de conclure que l'influence des surpressions est négligeable sur le débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien et a fortiori sur l'impact par cette voie (voir Figure 5.4-61).

En ce qui concerne la voie de transfert par les ouvrages, la Figure 5.4-62 illustre les répartitions de charges hydrauliques en mètres (NGF⁷¹) dans les ouvrages pour les trois régimes permanents considérés (les deux phases transitoires et le régime permanent, voir).

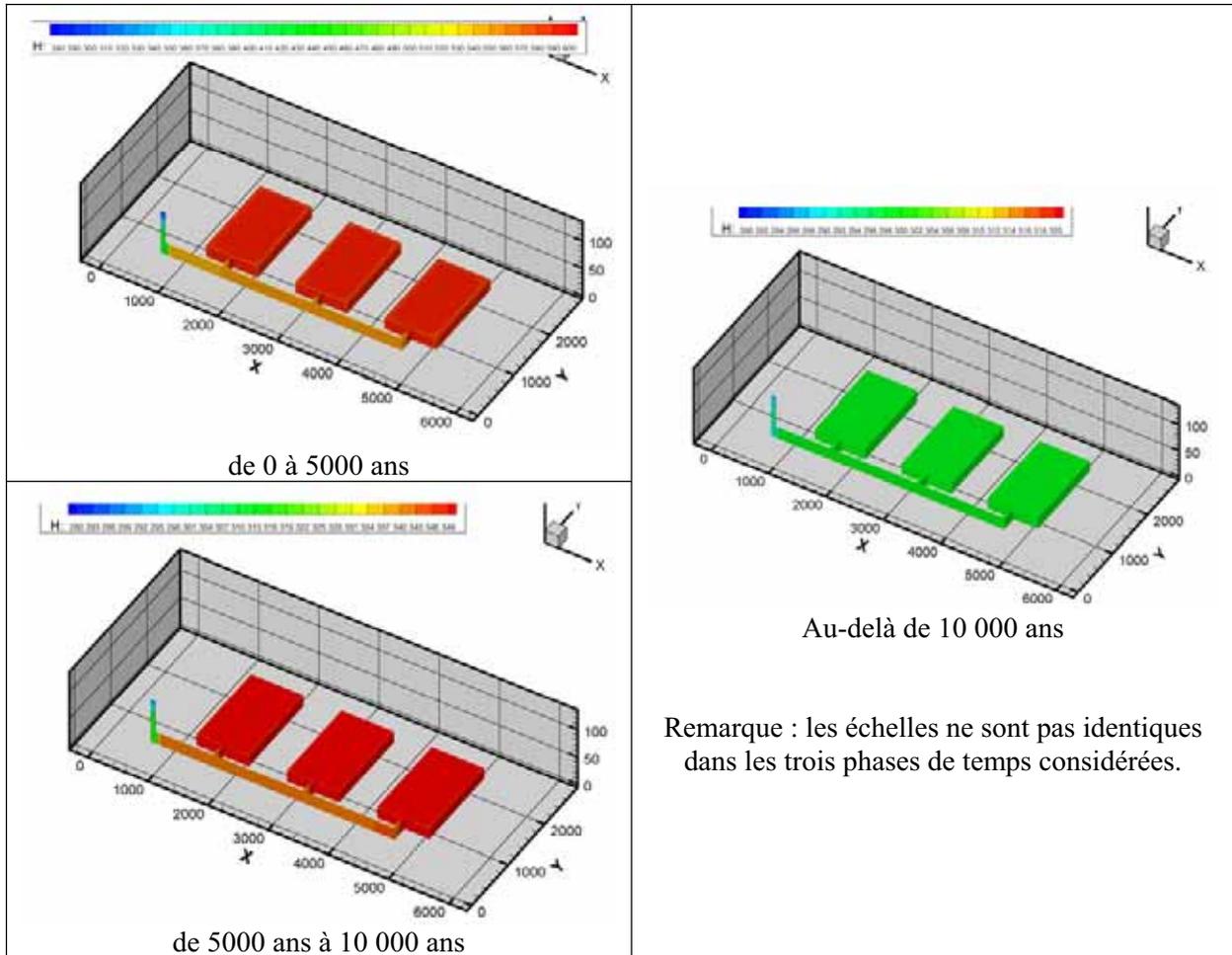


Figure 5.4-62 SEN - calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – cartographies de charges hydrauliques en mètres (NGF⁷¹) (m) pour les ouvrages d'accès et les zones de stockage de combustibles usés CUI

On note que, lorsque les surpressions sont élevées (0-5000 ans), les pertes de charge de part et d'autre de chaque scellement sont importantes (plusieurs dizaines de mètres). Il en est de même au niveau des scellements de puits où la charge à la base des puits est significativement plus élevée que celle au toit (environ 100 mètres). Ces forts gradients de charges sont de nature à induire des vitesses de Darcy importantes⁷⁵ Un débit molaire non nul apparaît aussi au niveau des scellements de zone à partir de quelques milliers d'années, ainsi que dans les galeries de liaison.

Les courbes d'historique de débit molaire présentées sur la Figure 5.4-63 mettent en évidence l'influence des pressions de gaz sur la voie de transfert par les ouvrages :

- l'influence du gaz, dans les conditions de modélisation retenues, a pour conséquence d'augmenter d'un ordre de grandeur environ le maximum de débit molaire en sortie de puits et d'avancer d'environ 500 000 ans la date du maximum (300 000 ans au lieu de 800 000 ans). L'essentiel de la quantité d'iode 129 sortant des puits provient du colis défaillant, même au-delà du transitoire de

⁷⁵ A titre d'exemple, pendant la première phase du transitoire (0-5000 ans), la vitesse de Darcy est de l'ordre de 0,1 m/an dans les galeries de liaison principale avant les scellements. Notons que les vitesses de Darcy sont variables dans le temps (en fonction des surpressions) et dépendent de la position des galeries dans le stockage.

surpression hydraulique : en effet, lorsqu'à 10 000 ans le système revient à l'équilibre naturel, la partie de radionucléides provenant du colis défaillant déjà présente dans les galeries de liaison secondaires présente des temps de transfert jusqu'aux puits relativement faibles. Notons néanmoins que la quantité d'iode 129 relâchée par les puits pendant un million d'années ne correspond qu'à 5 % de la masse présente initialement dans le colis défaillant (soit environ 4.10^{-4} % de l'inventaire initial total contre 3.10^{-5} % pour le calcul de référence) ;

- pendant les 10 000 premières années le débit molaire en sortie de puits est supérieur à celui issu du transfert par les argilites saines (contrairement au calcul de référence) ; au-delà, il devient inférieur. En tout état de cause, le débit molaire sortant des puits reste faible sur toutes les phases de temps et le maximum, atteint aux alentours de 300 000 ans, est très inférieur (environ 6 ordres de grandeur) à celui sortant des argilites saines.

Les courbes d'historique de débit molaire permettent également de mettre en évidence le rôle des différents scellements durant le transitoire hydraulique. A 10 000 ans environ, on note que :

- à la sortie du scellement de zone, le débit molaire est atténué d'environ un ordre de grandeur ;
- il est à nouveau atténué d'un ordre de grandeur au niveau des scellements de galeries principales ;
- le transfert à travers le scellement du puits atténué encore d'environ un ordre de grandeur le débit molaire.

Ces résultats montrent que l'efficacité des scellements contribue à atténuer la voie de transfert par les ouvrages. Cette dernière reste négligeable par rapport à la voie de transfert par la barrière géologique à l'échelle du million d'années.

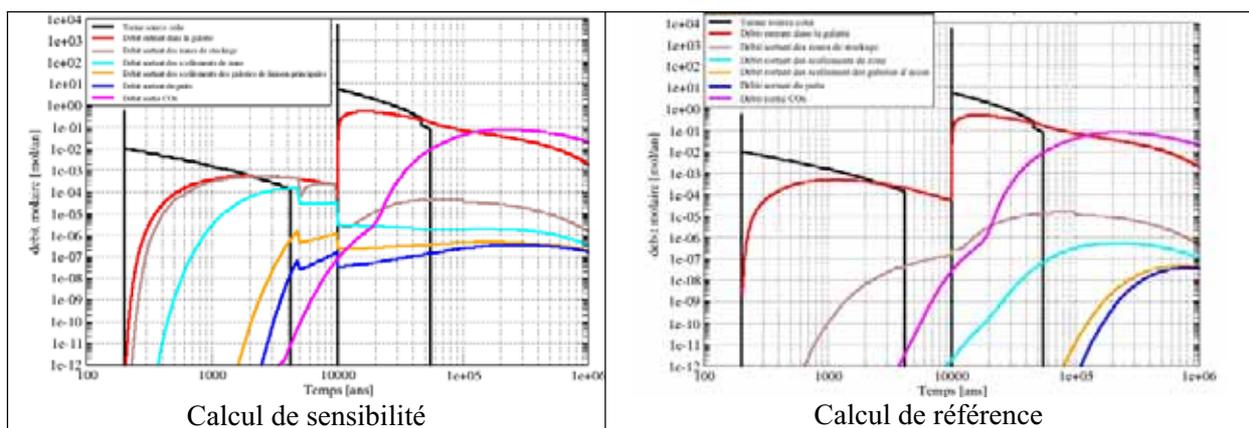


Figure 5.4-63 SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – ^{129}I – combustibles usés CUI

En conclusion, la prise en compte d'une surpression hydraulique transitoire due à la génération de gaz n'a pas d'influence significative sur l'impact radiologique, les niveaux et les dates d'apparition des doses maximales restant identiques à ceux du calcul de référence.

Colis de déchets B

Rappelons que la perturbation hydraulique sur la zone de déchets B est plus courte et d'intensité moindre que celle des combustibles usés.

En ce qui concerne la voie de transfert par la barrière géologique, on observe, comme pour les combustibles usés, que l'influence potentielle des surpressions est masquée par la durée du transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien, nettement supérieure à la durée du transitoire hydraulique. Les courbes de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien sont en effet confondues avec celles du calcul de référence (voir Figure 5.4-64).

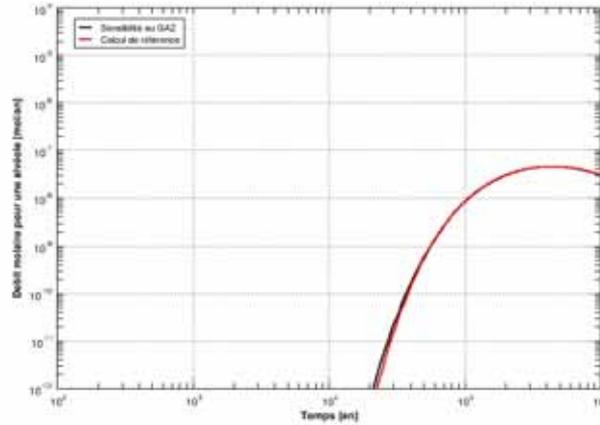


Figure 5.4-64

SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historiques de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien pour un alvéole de déchet B1x - comparaison des cas avec et sans surpressions hydrauliques – ¹²⁹I

En ce qui concerne le transfert par les ouvrages, les résultats mettent en évidence que le débit molaire en sortie de puits reste très inférieur à celui sortant des argilites saines du Callovo-Oxfordien, et on peut considérer comme négligeable l'influence des surpressions dues au gaz pendant le transitoire hydraulique. Les résultats vis-à-vis de l'hydraulique et du transport sont détaillés ci après.

La Figure 5.4-65 illustre les répartitions de charge hydraulique dans les ouvrages pour les trois états hydrauliques de régime permanent considérés.

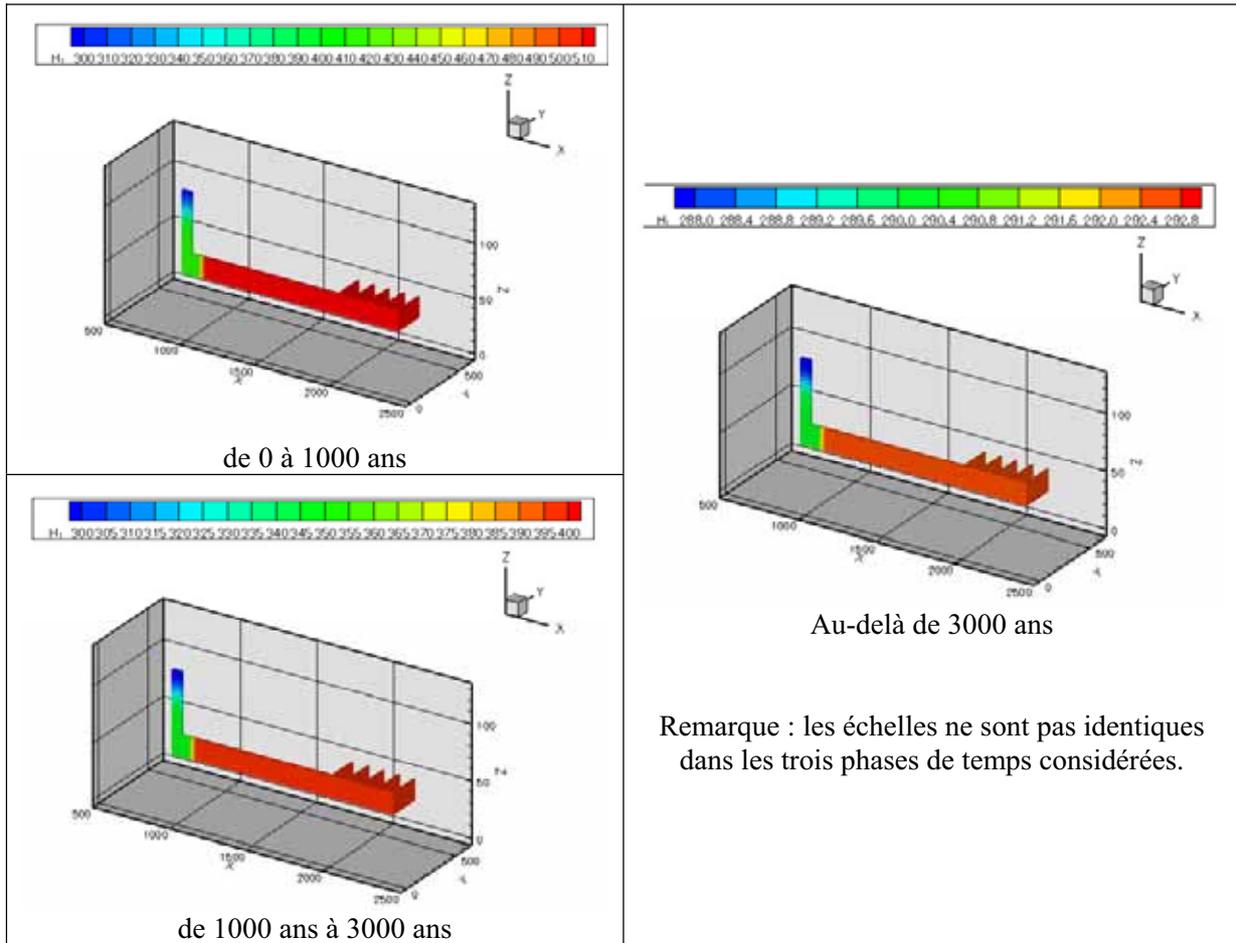


Figure 5.4-65 : SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – cartographies de charges hydrauliques en mètres (NGF⁷¹) (m) pour les ouvrages d'accès et les zones de stockage de colis B1x

Les scelllements remplissent un rôle identique à celui qui est le leur dans le calcul de la zone des combustibles usés. Les gradients de charges sont similaires, et de nature à induire des vitesses de Darcy pouvant atteindre 0,07 m/an.

D'un point de vue du transport, compte tenu de la longueur des alvéoles de déchets B et de la sorption de l'iode dans les bétons, les temps de transfert depuis les alvéoles de stockage vers la galerie contiguë sont de plusieurs dizaines de milliers d'années. La surpression hydraulique dans l'alvéole accélère le transfert des radionucléides vers la galerie pendant les 10 000 premières années (Figure 5.4-66). Au-delà, le système revient à l'équilibre et les niveaux de relâchement sont identiques à ceux du calcul de référence. Compte tenu des faibles cinétiques hydrauliques imposées par le stockage de déchets B, qui n'a qu'une capacité de drainage limitée, les temps de transfert jusqu'aux puits d'accès sont importants, et le débit molaire en sortie de puits est très peu augmenté par rapport à une situation ne considérant pas l'influence des surpressions.

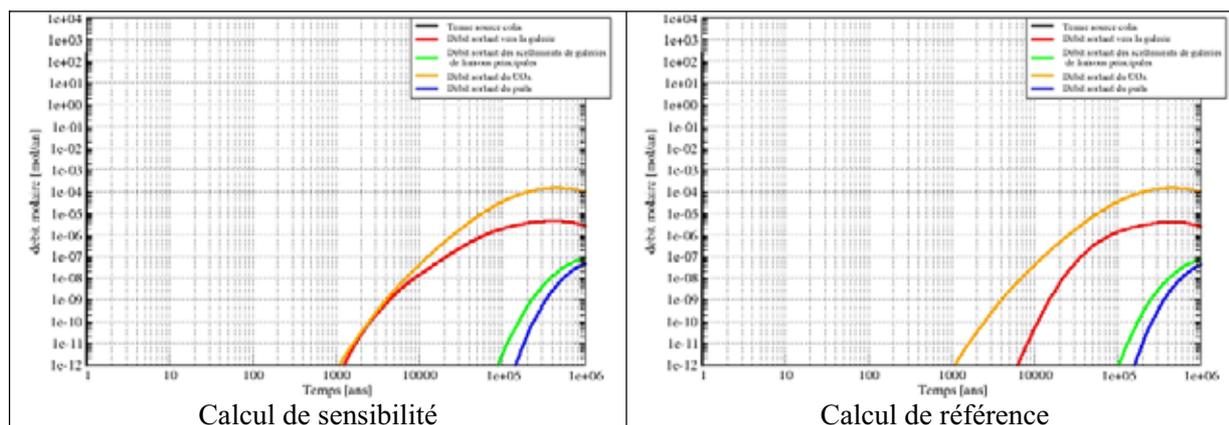


Figure 5.4-66 : *SEN – calcul de sensibilité sur l’influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – ¹²⁹I – Colis types non organiques ne dégageant pas d’hydrogène gazeux.*

Les résultats présentés mettent en évidence qu’en SEN le transitoire hydraulique n’a pas d’influence préjudiciable notable sur l’impact du stockage. Les suppressions dégradent transitoirement les performances de la fonction « s’opposer à la circulation d’eau » car elles induisent une augmentation des cinétiques convectives dans la barrière géologique et dans les galeries pendant les premiers milliers d’années. Mais la durée de ce transitoire hydraulique est suffisamment courte devant les temps de transfert dans la barrière géologique pour que son influence ne soit pas visible sur le débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien.

Les débits molaires en sortie de puits peuvent être significativement plus importants que pour les calculs de référence et les maxima apparaissent plus tôt, dans le cas des combustibles usés. Néanmoins, ils restent faibles devant ceux calculés en sortie de barrière géologique.

Ainsi, on peut conclure que le transitoire hydraulique n’a pas d’effet significatif sur l’impact SEN, les niveaux des doses maximales étant identiques à ceux du calcul de référence. Rappelons de plus qu’il a été modélisé dans ce cas de figure de manière pénalisante, en négligeant la désaturation induite par les gaz.

- **Etude de sensibilité aux propriétés diffusives des couches semi-perméables des encaissants sus-jacents**

On a vu que les choix de modèles pour les encaissants retiennent des valeurs fortes de coefficients de diffusion, ce qui pourrait dans certaines situations induire une sous-estimation de l’impact des radionucléides qui transitent par convection (voir paragraphe 5.3.2.4). Une étude de sensibilité a été conduite, retenant des valeurs plus faibles de coefficient de diffusion et de porosité accessible à la diffusion dans le Kimméridgien de manière à limiter l’étalement diffusif. Par cohérence, on suit la même logique pour la couche C3a de 20 mètres d’épaisseur qui est également peu perméable.

Pour ces deux couches, on retient les valeurs de coefficients de diffusion et de porosité du Callovo-Oxfordien. Ces valeurs semblent représentatives pour la couche C3a, mais sont sûrement surestimées pour le Kimméridgien – mais c’est l’objectif de ce calcul que de surestimer ses propriétés vis-à-vis de la diffusion.

Le calcul étant mené pour l’iode 129 des combustibles usés qui est le principal contributeur à l’impact, on considère un coefficient de diffusion effectif de 5.10^{-12} m²/s et une porosité accessible à la diffusion de 5 % (valeurs retenues pour les anions).

On n’observe pas, dans cette situation, d’augmentation de la dose à la Saulx et à l’Ornain ; en effet, les résultats mettent en évidence que :

- la prise en compte de valeurs de transport phénoménologiques dans les 20 mètres de la couche C3a au toit du Callovo-Oxfordien engendre une augmentation des temps de transfert diffusifs jusqu’au toit des couches C3a-C3b d’un facteur 1,7 environ ;
- la prise en compte d’une faible valeur de coefficient de diffusion dans le Kimméridgien ne conduit pas à augmenter le flux de radionucléides transitant par convection dans l’Oxfordien au point que l’impact s’en trouve modifié : les effets dus aux performances de l’horizon C3a restent dominants et conduisent globalement à un impact plus faible. La dose maximale aux exutoires Saulx et Ornain baisse d’environ 70 % et l’apparition du maximum de dose est retardée de 170 000 ans supplémentaires environ, comme illustré sur la Figure 5.4-67. Ainsi, la dose maximale de l’iode 129 des combustibles usés CU1 est de 0,011 mSv/an à 510 000 ans à l’exutoire Saulx, alors qu’elle est de 0,018 mSv/an à 340 000 ans en référence ;

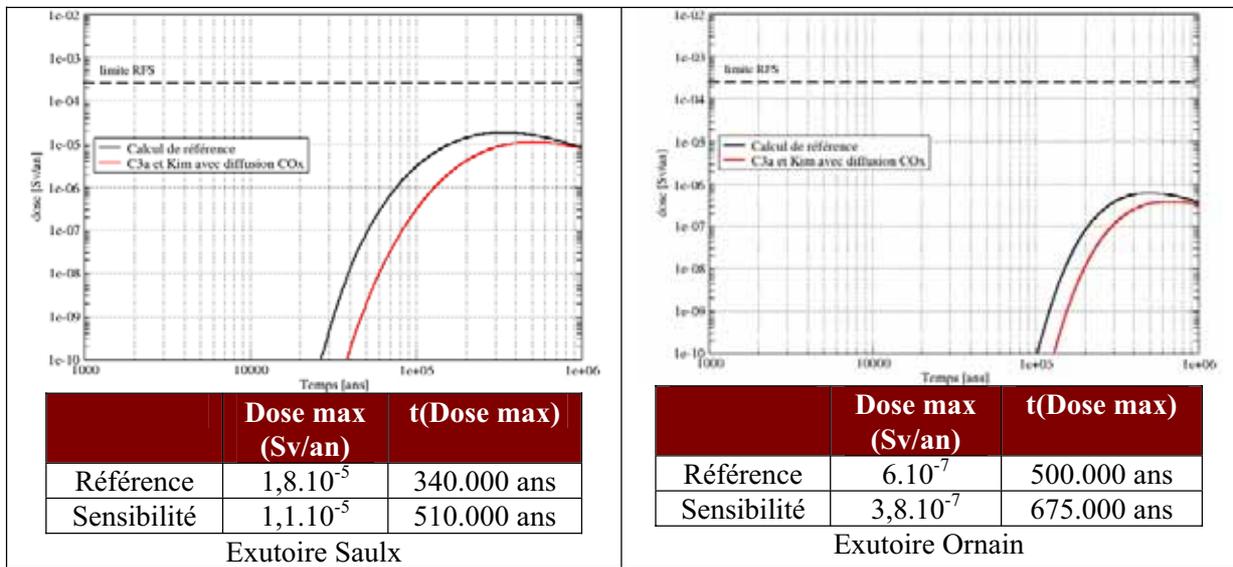


Figure 5.4-67

SEN - Sensibilité aux propriétés diffusives des couches semi-perméables des encaissants sus-jacents - colis type CU1 – ¹²⁹I - Dose à l’exutoire Saulx et Ornain de l’Oxfordien – comparaison calcul de référence /étude de sensibilité

- la diffusion plus difficile dans le Kimméridgien atténue d'environ deux ordres de grandeur la dose maximale à l'exutoire Barrois comme illustré sur la Figure 5.4-68

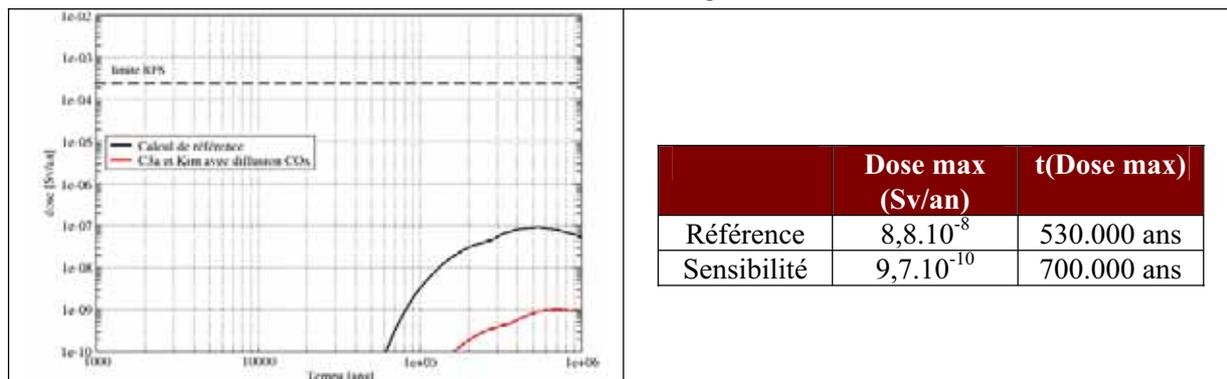


Figure 5.4-68

SEN - Sensibilité aux propriétés diffusives des couches semi-perméables des encaissants sus-jacents - colis type CU1 – ^{129}I - Dose à l'exutoire Barrois – comparaison calcul de référence /étude de sensibilité ($H =$ charge hydraulique en mètres NGF^{71})

Ces résultats permettent de confirmer que la prise en compte d'une diffusion plus faible dans le Kimméridgien et les horizons inférieurs de l'Oxfordien conduit à diminuer l'impact aux exutoires. Le calcul de référence considérant des valeurs de coefficient de diffusion élevées dans les couches semi-perméables des encaissants sus-jacents (coefficient de diffusion de l'eau dans l'eau – $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) est donc bien enveloppe de situations prenant en compte des valeurs de paramètres de transport phénoménologiques dans les encaissants.

● Etude de sensibilité aux trajectoires dans le modèle des encaissants sus-jacents

Les évaluations d'impact ont été conduites, de manière conventionnelle, en supposant chaque zone de stockage centrée sur la position du laboratoire de Meuse Haute-Marne. Cette position permet de placer le stockage au plus près de l'exutoire « Saulx », dans le modèle à 1 million d'années. On a vu en effet que, pour les zones de stockage de petites dimensions, l'ensemble des trajectoires convectives dans l'Oxfordien se dirige vers cet exutoire. Dans le cas de zones étendues, telles que la zone CU1, une partie des flux se dirige vers l'exutoire Ornain. Il ne serait cependant pas possible de déplacer la zone CU1 de manière à la rapprocher encore plus de l'exutoire Saulx. L'emplacement retenu en référence correspond déjà, parmi ceux qui sont à proximité du site du laboratoire de Meuse Haute-Marne, à une position en limite de zone de transposition.

Il est apparu intéressant cependant de « tester » l'influence des trajectoires du modèle hydraulique sur l'impact. Cela peut se faire en calculant les trajectoires des radionucléides à partir d'autres emplacements du stockage au sein de la zone de transposition. L'analyse de sensibilité correspondante a consisté à « déplacer » le stockage, sans rien modifier au modèle par ailleurs, de manière à isoler l'influence du seul modèle hydrogéologique.

Le calcul a été conduit pour la zone CU1, pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79.

Implanter la zone CU1 à un autre emplacement revêt un caractère tout aussi arbitraire que le choix de la position de référence. Les positionnements retenus doivent par ailleurs être cohérents avec l'objectif de l'étude : il ne s'agit pas de rechercher le « meilleur » endroit où positionner un stockage, mais bien au contraire de vérifier que des emplacements a priori défavorables ne conduisent pas à augmenter très significativement l'impact. L'objectif est ainsi de vérifier que l'emplacement du laboratoire de Meuse / Haute-Marne ne correspond pas à une position singulière, qui serait particulièrement favorable.

On a choisi de tester deux localisations correspondant au modèle à 1 million d'années, c'est dans ce dernier que les exutoires locaux sont les plus nombreux. On a déplacé la zone de stockage de part et

d'autre de la ligne de crête qui sépare les écoulements se dirigeant vers l'Ouest (vers les vallées de la Saulx et de la Marne) et ceux qui prennent la direction de l'Ornain (voir Figure 5.4-69).

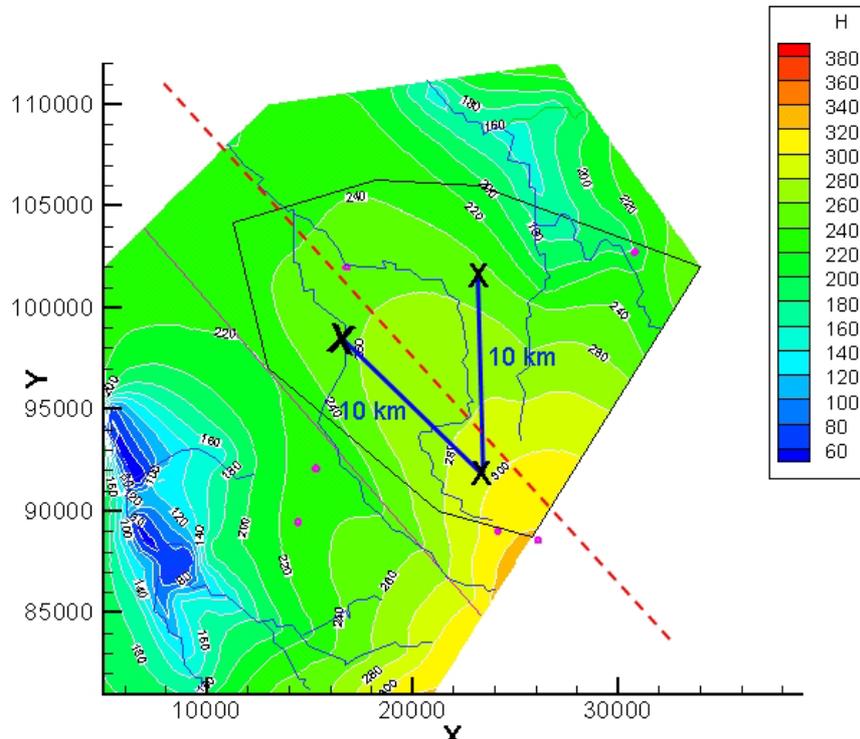


Figure 5.4-69

SEN - Positions du stockage étudiées en sensibilité (H = charge hydraulique en mètres NGF⁷¹)

On modélise le stockage en conservant la même garde d'argilites vis-à-vis de l'Oxfordien qu'en référence, c'est-à-dire que le stockage est positionné à 65 mètres du toit de la formation hôte, pour qu'un éventuel épaissement du Callovo-Oxfordien dans les nouvelles positions testées ne masque pas les effets dus aux modifications de trajectoires hydrauliques dans les encaissants. Conformément aux choix formulés pour le calcul de référence, le comportement géomécanique retenu correspond à un positionnement au plus profond sur la zone de transposition, et le gradient est ascendant et à son maximum (0,4 m/m) quelque soit l'emplacement.

En plaçant le stockage à dix kilomètres du site du laboratoire, respectivement vers le nord-ouest et vers le nord-est, et en traçant les trajectoires issues du modèle hydrogéologique, on constate que :

- pour la position nord-ouest, les trajectoires hydrauliques vers la Saulx sont supprimées et remplacées par des trajectoires vers la confluence de la Marne et du Rongeant. L'exutoire « interception des trajectoires vers la Marne », défini dans le modèle hydrogéologique à l'actuel et qui intercepte ces trajectoires au niveau du prolongement de la zone de fracturation diffuse, devient alors un exutoire pertinent dans le modèle à 1 million d'années. Il est de plus situé très près de la zone de stockage. La Figure 5.4-70 met en évidence que la majorité des trajectoires se dirige vers cet exutoire et que seule une part infime suit une trajectoire régionale dans la direction nord nord-ouest. Le mode de calcul de la dose à cet exutoire est identique à celui du calcul de référence : un pompage, positionné dès le début de la zone de fracturation diffuse, est supposé capter la totalité des radionucléides se dirigeant vers la vallée de la Marne. Ce calcul permet donc de vérifier si l'impact est sensible ou non à la position du stockage le long de la zone de fracturation diffuse ;

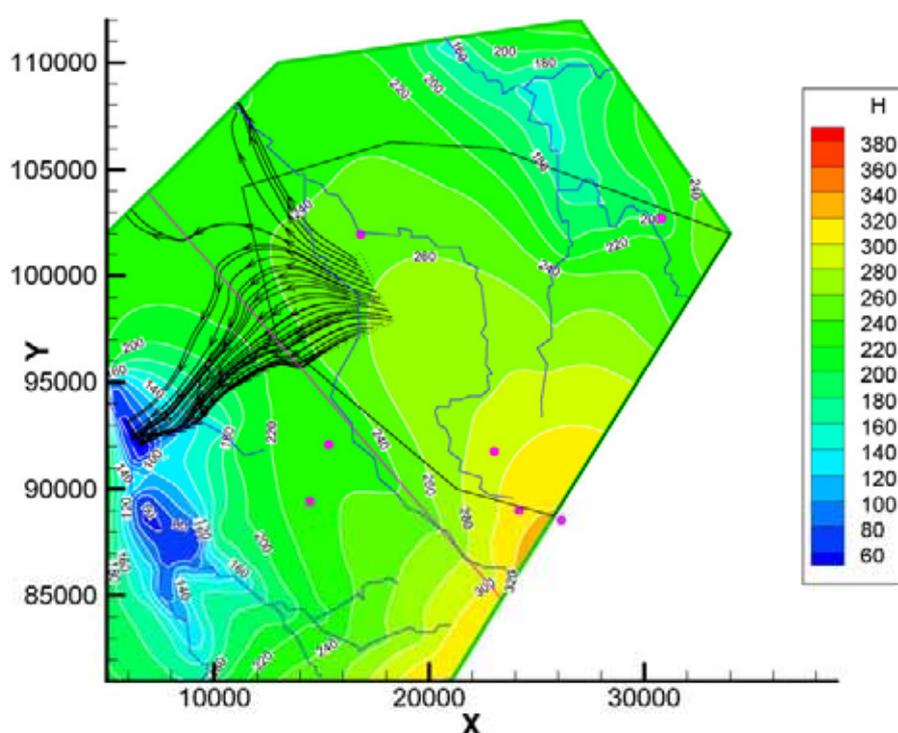


Figure 5.4-70

SEN – sensibilité à la position du stockage - trajectoires hydrauliques dans les horizons poreux Hp1-Hp4 – Position du stockage Nord (H = charge hydraulique en mètres NGF⁷¹)

- pour la position nord-est, la zone de stockage se trouve située à proximité de l'exutoire Ornain, ce qui privilégie celui-ci au détriment de l'exutoire Saulx qui n'apparaît plus. La Figure 5.4-71 montre que la dispersion des trajectoires partant du stockage est assez restreinte et que l'ensemble converge vers la vallée de l'Ornain, le long de cette dernière. On note cependant que d'autres exutoires hydrauliques peuvent s'exprimer vers le nord de cette vallée. Cette position est particulièrement pénalisante, puisqu'elle revient à maximiser volontairement la dose à l'Ornain.

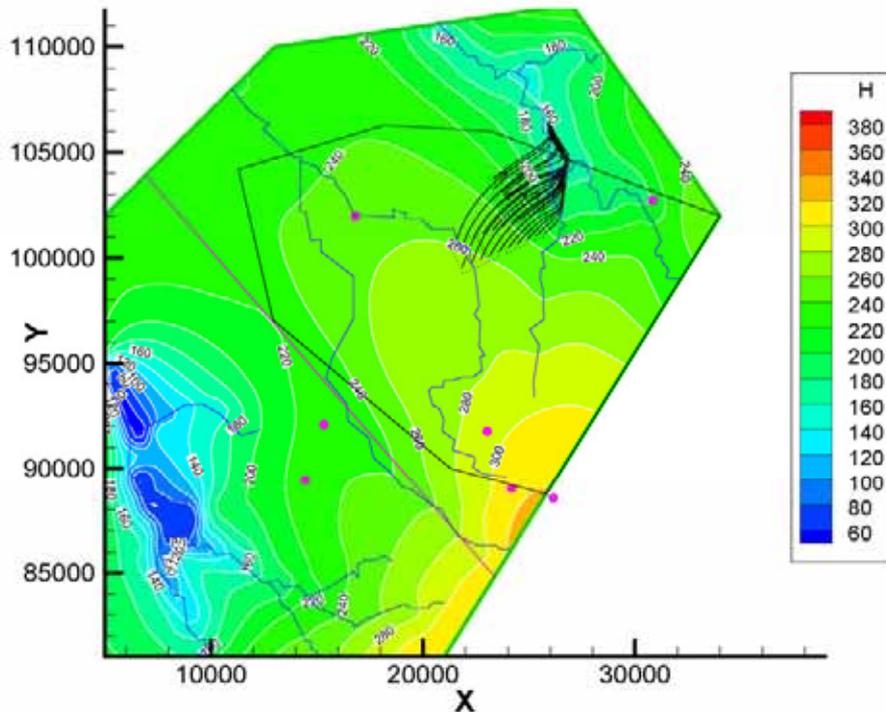


Figure 5.4-71 *SEN – sensibilité à la position du stockage - trajectoires hydrauliques dans les horizons poreux Hp1-Hp4 – Position du stockage Nord*

Les résultats montrent que le principal contributeur à l'impact est l'iode 129. Les calculs de dose aux différents exutoires mettent en évidence les résultats suivants, qui sont comparés au calcul de référence (voir Tableau 5.4-23).

Exutoire	Calcul de référence (rappel)		Sensibilité nord-ouest		Sensibilité nord-est	
	Dose maximale (mSv/an)	Date du maximum [ans]	Dose maximale (mSv/an)	Date du maximum [ans]	Dose maximale (mSv/an)	Date du maximum [ans]
Exutoire en amont de la zone de fracturation diffuse ⁷⁶	0,019	330 000	0,023	400 000	Sans objet	Sans objet
Exutoire Ornain	0,0006	500 000	Sans objet	Sans objet	0,19	390 000

Tableau 5.4-23 *SEN – sensibilité à la position du stockage - Impact des combustibles usés CUI dans le modèle hydrogéologique à 1 million d’années, pour différentes positions du stockage*

Les résultats montrent peu de différence entre la position sur le site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne et la position au nord-ouest, du seul point de vue du transfert dans les encaissants. Un tel résultat est attendu, dans la mesure où un choix d’exutoires proches du stockage et interceptant l’ensemble des flux de radionucléides rend l’impact peu dépendant des caractéristiques détaillées du modèle hydrogéologique. Ce résultat doit bien entendu être tempéré du fait que, au niveau du laboratoire, le comportement géomécanique est plus favorable que ce qui est représenté dans le modèle; en revanche, la formation hôte est plus épaisse au nord-ouest qu’elle ne l’est dans le calcul.

La position au nord-est est, comme on pouvait s’y attendre, la plus pénalisante, dans la mesure où le stockage est très proche de l’exutoire. Dans ce cas la dose augmente environ d’un facteur 10. L’étude des panaches de concentration montre que la dispersion est négligeable entre le droit du stockage et l’exutoire, et donc qu’il ne serait probablement pas possible de trouver une configuration plus défavorable sur la zone. Celle-ci est de plus particulièrement irréaliste. Du fait de la perméabilité du terrain dans cette zone, les débits de pompage sont très modestes et inciteraient les populations à utiliser la rivière, très proche. La dose obtenue correspond, de ce point de vue, à un majorant pénalisant des doses possibles, et elle renvoie à un positionnement du stockage qui n’est à l’évidence pas optimal du seul point de vue de la réduction de l’impact. Rappelons de plus que les paramètres du modèle (la profondeur du stockage en particulier) sont fixés à des valeurs conservatives ne correspondant pas aux caractéristiques de cet endroit, près de la vallée de l’Ornain.

Cette étude ne couvre pas l’ensemble des positions possibles du stockage au sein de la zone de transposition. Elle montre, conformément à son objectif, que les impacts calculés dans la position de référence ne correspondent pas à un cas singulier, mais que le même ordre de grandeur d’impact peut être obtenu en déplaçant le stockage au sein du modèle hydrogéologique des encaissants. Elle montre aussi que l’impact calculé à l’exutoire « Saulx » est peu sensible au modèle hydrogéologique, et donc que le résultat calculé est robuste. Dans la position a priori la plus défavorable, l’augmentation n’est pas supérieure à un ordre de grandeur.

5.4.6.4 Synthèse concernant les études de sensibilité du SEN

Les doses maximales et la date des maxima de dose des études de sensibilité sont synthétisées dans le Tableau 5.4-24. Seules sont présentées les doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien calcaire, ce dernier étant celui qui engendre l’impact le plus élevé. Les calculs conduisant à des doses à d’autres exutoires, tels que la sensibilité sur le modèle hydrogéologique, ne sont pas présentés à nouveau ici.

⁷⁶ L’exutoire est, dans le cas du calcul de sensibilités, l’exutoire « interception des trajectoires vers la Marne », et dans le calcul de référence l’exutoire « Saulx ».

	Somme des combustibles usés Scénario S2		Somme des déchets C1+C2 Scénario S1b		Somme des déchets C3+C4 Scénario S1a		Somme des déchets B Scénario S1b	
	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)
1. Sensibilité aux paramètres du Callovo-Oxfordien, de la bentonite et du béton des alvéoles								
1.1	0,020 (idem réf.)	330 000 (idem réf.)	0,00047 (idem réf.)	490 000 (idem réf.)	0,00036 (idem réf.)	500 000 (idem réf.)	0,00047 (idem réf.)	310 000 (idem réf.)
1.2	0,020 (idem réf.)	330 000 (idem réf.)	0,00047 (idem réf.)	490 000 (idem réf.)	0,00036 (idem réf.)	500 000 (idem réf.)	0,00047 (idem réf.)	310 000 (idem réf.)
1.3	0,045	170 000	0,0037	200 000	0,0028	210 000	0,00079 ⁷⁷	220 000
1.4	Dose de l'iode 129 inférieure à celle du calcul de référence Date du maximum de dose de l'iode au-delà de 1 million d'années							
1.5	Doses cumulées maximales inférieures à celles du calcul de référence							
1.6	0,020 (idem réf.)	330 000 (idem réf.)	0,00047 (idem réf.)	490 000 (idem réf.)	0,00036 (idem réf.)	500 000 (idem réf.)	0,00047 (idem réf.)	310 000 (idem réf.)

⁷⁷ La dose cumulée maximale correspond uniquement à celle des colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (B1x), l'étude ayant été réalisée pour ces derniers. Dans le calcul de référence, la dose cumulée maximale associée à ces colis est de 0,00033 mSv/an ; elle survient à 310 000 ans.

	Somme des combustibles usés Scénario S2		Somme des déchets C1+C2 Scénario S1b		Somme des déchets C3+C4 Scénario S1a		Somme des déchets B Scénario S1b	
	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)
2 - Sensibilité aux colis								
2.1	Déchets B : Relâchement labile des colis types B1, B4, B5							
2.2	Déchets B : taux de relâchement conservatif de 10^{-3} par an des boues bitumées							
2.3	Déchets B : prise en compte d'un conteneurage durable pendant 10 000 ans pour les colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène gazeux (B1x)							
2.4	Déchets C : paramètres conservatifs du modèle V0.S \rightarrow V _r							
2.5	Déchets C : modèle pénalisant V0.S							
2.6	Combustibles usés : paramètres conservatifs (dissolution radiolytique)							
2.7	Combustibles usés : modèle de contrôlé par la solubilité de l'uranium							
	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	0,00047 (idem réf.)	310 000 (idem réf.)
	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	0,00047 (idem réf.)	310 000 (idem réf.)
	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	0,00047 (idem réf.)	310 000 (idem réf.)
	Sans objet	Sans objet	0,00047 (idem réf.)	490 000 (idem réf.)	0,00036 (idem réf.)	500 000 (idem réf.)	Sans objet	Sans objet
	Sans objet	Sans objet	0,00063	280 000	0,00049	290 000	Sans objet	Sans objet
	0,020 (idem réf.)	330 000 (idem réf.)	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet
	0,0024	310 000	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet

		Somme des combustibles usés Scénario S2		Somme des déchets C1+C2 Scénario S1b		Somme des déchets C3+C4 Scénario S1a		Somme des déchets B Scénario S1b	
		Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)
3 - Sensibilité sur la globalité du modèle de calculs									
3.1	Transferts pendant le hydraulique	0,019 ⁷⁸ (idem réf.)	330 000 (idem réf.)	-	-	-	-	0,00033 ⁷⁸	310 000
3.2	Propriétés diffusives des couches semi-perméables des encaissants sus-jacents Calcul réalisé pour l'iode 129 des CUI	0,011 ⁷⁹	510 000	Doses cumulées maximales inférieures à celles du calcul de référence					

Tableau 5.4-24 : *SEN – Dose totale – dates des maxima de dose pour les études de sensibilité à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien calcaire (cas le plus pénalisant) – modèles à 1 million d'années – tous déchets*

⁷⁸

La dose présentée correspond à celle de l'iode des combustibles usés CUI et des colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (B1x), le calcul ayant été réalisé pour ces colis

⁷⁹

La dose présentée correspond à celle de l'iode des combustibles usés CUI. Le calcul n'a été effectué que pour ce colis type dans la mesure où l'impact radiologique est inférieur à celui du calcul de référence. La dose associée à l'iode 129 des combustibles usés CUI est de 0,019 mSv/an et survient à 330 000 ans dans le calcul de référence.

5.5 Principaux enseignements de l'analyse des performances

Les études de performances du stockage mettent en valeur un nombre important de résultats pour l'analyse de sûreté.

Du point de vue des fonctions de sûreté, celles-ci sont assurées avec un bon degré de performance, que ce soit dans le calcul de référence ou dans les études de sensibilités.

Pour la fonction « s'opposer à la circulation d'eau », le régime de transport diffusif est dominant dans toutes les configurations au sein de la roche hôte, et dans la plupart des ouvrages. On note que cela n'est pas dû uniquement à l'efficacité des scellements : même quand celle-ci est dégradée en étude de sensibilité, les flux restent globalement limités, car le faible apport d'eau par le Callovo-Oxfordien ne peut les alimenter. La prise en compte d'une EDZ dégradée autour des ouvrages a de ce fait une influence limitée sur l'impact et sur la répartition des voies de transfert entre la barrière géologique et les ouvrages, même si les scellements sont peu efficaces. La barrière géologique reste la principale voie de transfert des radionucléides.

Pour la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage ». La faible solubilité de nombreux radionucléides au sein des alvéoles permet de limiter fortement leur impact, c'est en particulier le cas du Sélénium 79. Les conteneurs et surconteneurs apportent un confinement qui permet de retarder l'apparition des maxima de dose, mais sans influencer fortement sur le niveau de ceux-ci. Les propriétés du Callovo-Oxfordien atténuent en effet les flux même en cas de transfert en ambiance thermique.

Ces évaluations se fondent sur des premiers résultats acquis sur le transfert des radionucléides en température. Compte tenu des incertitudes sur ces paramètres, la présence de conteneurs et surconteneurs durables pendant la phase thermique est une option prudente.

La prise en compte de modèles et de paramètres conservatifs pour les matrices de déchets a peu d'influence en SEN dans la mesure où, dans le calcul de référence, les durées de relâchement des radionucléides par les colis sont relativement courtes devant le temps de transfert diffusif. On note cependant que le modèle de relâchement du verre, $V_0.S \rightarrow V_r$ a une influence visible sur la réduction des termes sources. Une dégradation du modèle de relâchement du combustible utilisé n'en a guère. En revanche, toujours pour les CU, le modèle de dissolution classique, s'il devait s'avérer à terme le modèle recommandé par la communauté scientifique, permettrait de réduire significativement les impacts associés à ce type de colis. Le rôle de confinement éventuellement apporté par un complément de colisage de déchets B ne serait pas significatif au regard de l'impact. Ces conclusions sur les conteneurs ne sont à ce stade du tome évaluation de sûreté que partielles : il convient d'attendre l'analyse des incertitudes (chapitre 6) et l'évaluation des scénarios altérés (chapitre 7) pour tirer des conclusions mettant en lumière l'apport complet de ces éléments de colisage.

Pour la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides », les temps de diffusion sont lents dans le Callovo-Oxfordien et permettent une décroissance de l'ensemble des radionucléides pouvant contribuer à l'impact, à l'exception de l'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79. Ces deux derniers sont cependant significativement atténués. Les paramètres de transport s'avèrent sensibles vis-à-vis de l'impact de ces trois radionucléides. Au niveau des argilites, les résultats mettent en évidence que les principaux éléments influents sont les paramètres de transport diffusif pour les éléments solubles et non sorbés comme l'iode et le chlore. Par ailleurs, l'influence des paramètres géochimiques conservatifs (solubilité et rétention) retenus dans les ouvrages et dans la barrière géologique est notable pour le sélénium 79. En ce qui concerne les études de sensibilité, menées à titre prospectif, on montre qu'une sorption limitée de l'iode dans les argilites engendre une diminution significative de l'impact qui lui est associé d'un facteur 50 environ. Cela décale également d'autant le maximum de dose qui apparaît alors à des dates se situant aux alentours de 10 millions d'années.

Cette analyse des fonctions montre que le Callovo-Oxfordien est un composant particulièrement important, dont les caractéristiques permettent d'assurer un bon niveau de performances des fonctions

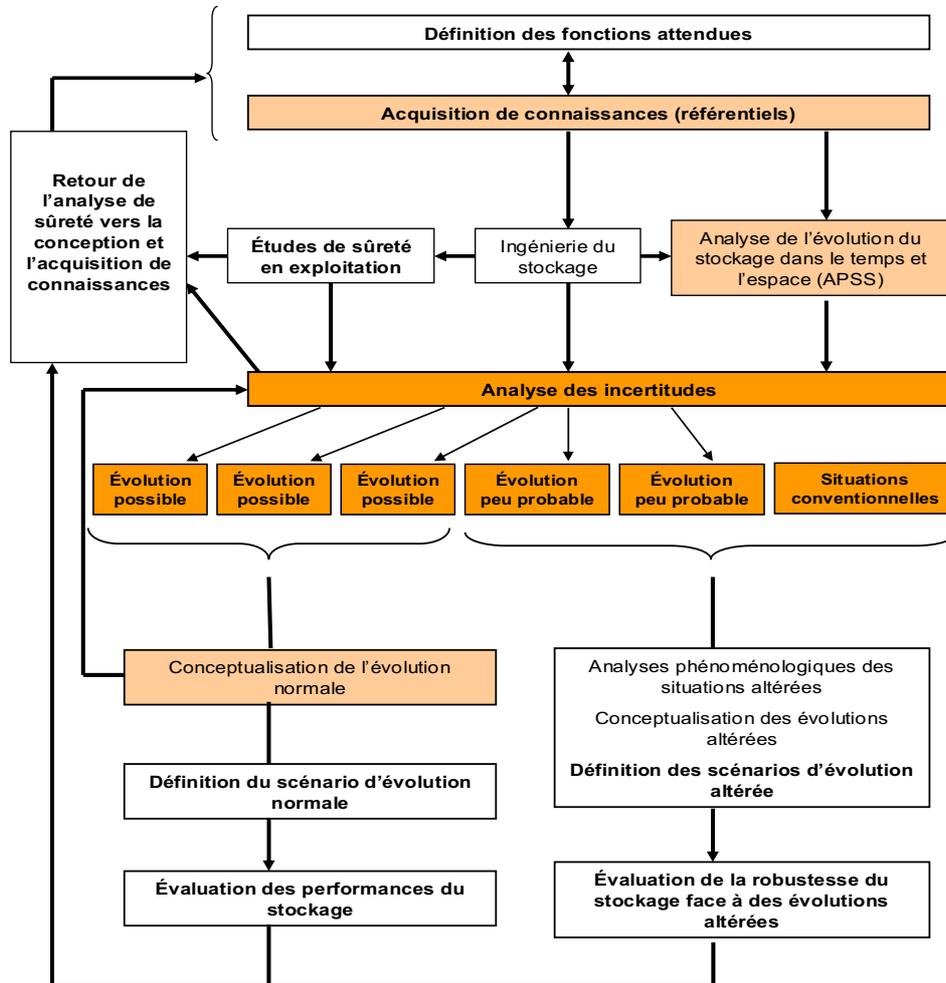
de sûreté, même en cas de fonctionnement médiocre des autres composants (conteneurs défaillants, scellements peu efficaces) ou même de propriétés dégradées du milieu géologique lui-même.

Du point de vue de l'impact, celui des zones B et des zones de déchets vitrifiés est, dans toutes les configurations de calcul, très inférieur à la contrainte de dose de 0,25 mSv/an (de l'ordre de 0,00047 mSv/an pour les déchets B et environ 0,0008 mSv/an pour tous les déchets C). Dans le modèle hydrogéologique à l'actuel, celui lié aux combustibles usés atteint au plus 0,022 mSv/an. En étude de sensibilité, ces impacts sont au plus doublés (en considérant une géochimie conservatrice dans la formation hôte, le béton et l'argile).

6

Gestion des incertitudes

6.1	Prise en compte des incertitudes dans le dossier 2005	351
6.2	Principaux résultats du recensement des incertitudes.....	362
6.3	Construction des situations altérées	450
6.4	Conclusions sur la maîtrise des incertitudes.....	460



THEME ABORDE EN TANT QUE DE BESOIN DANS LE PRESENT CHAPITRE



THEME TRAITÉ SPECIFIQUEMENT DANS LE PRESENT CHAPITRE

Synoptique 6-1

Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : analyse des incertitudes

L'évaluation de sûreté et l'atteinte des objectifs de sûreté sont indissociables de l'identification et du traitement des incertitudes. Le chapitre 3 a mis en exergue les dispositions de conception destinées à gérer les incertitudes, et le chapitre 5 a montré comment les modèles de calcul de performances incluaient des marges de prudence. Ce chapitre reprend les éléments déjà en partie exposés dans les chapitres précédents et les complète de manière à présenter une vue d'ensemble des principales incertitudes portant sur l'évolution en post-fermeture du stockage. Il détaille également la démarche mise en œuvre pour prendre en compte ces incertitudes.

6.1 Prise en compte des incertitudes dans le dossier 2005

Avant de développer plus complètement cette dernière, la notion d'« incertitudes » doit être replacée dans le contexte particulier d'un stockage en formation géologique profonde.

6.1.1 Typologie des incertitudes

En règle générale, l'incertitude naît d'un manque de données ou de connaissances précises sur un des éléments du système étudié, ou du caractère aléatoire de certains phénomènes. Dans le cas de l'analyse de sûreté du stockage en formation géologique profonde, cela peut recouvrir des lacunes sur la valeur de paramètres, l'absence de compréhension de certains mécanismes couplés, l'incapacité à prévoir la survenue de certains événements.

Pour permettre une approche aussi claire que possible de cette question, il importe en premier lieu de bien définir le champ couvert. La notion d'« incertitudes », dans toute sa généralité, recouvre de nombreuses questions. Il est nécessaire, préalablement à leur identification et à leur traitement, de dresser une typologie générale. La classification des incertitudes est en effet un des fondements de leur gestion (voir par exemple [81]).

On distingue :

- les incertitudes sur les données d'entrée du projet de stockage, c'est-à-dire en l'occurrence celles portant sur l'inventaire des colis et les caractéristiques de ceux-ci, indépendamment de leur comportement en stockage (par exemple : incertitude sur les quantités ou sur l'inventaire radiologique et chimique) ;
- les incertitudes portant sur les caractéristiques intrinsèques d'un composant du stockage. Elles sont elles-mêmes de plusieurs natures :
 - ✓ elles peuvent être liées aux imprécisions des techniques de mesure ;
 - ✓ elles peuvent également être attachées à un certain nombre de grandeurs qui ne sont pas directement accessibles à la mesure, et pour lesquelles on se réfère alors à des données disponibles dans la bibliographie, avec une incertitude sur la pertinence de leur application, par exemple ;
 - ✓ elles peuvent être dues à la variabilité du composant dans l'espace au regard d'un échantillonnage nécessairement limité. En particulier, dans le cas du milieu géologique, les données utilisées sont acquises à différentes échelles et à partir d'un nombre limité de mesures. Les informations acquises doivent ensuite être étendues à des espaces ou volumes plus importants, en maîtrisant les changements d'échelles. Il en va ainsi de la caractérisation de la roche sur échantillons ;
 - ✓ elles peuvent être liées au modèle qui sous-tend la définition de la grandeur que l'on cherche à caractériser. Les caractéristiques d'un composant du stockage ne sont en effet définies que dans le cadre d'un modèle donné. Ainsi, la perméabilité du milieu géologique, milieu dont la structure est complexe à l'échelle microscopique, traduit une propriété d'ensemble de ce milieu à l'échelle macroscopique au regard des transferts d'eau. Dans certains cas, si le modèle est trop simplifié pour rendre compte de la réalité physique, les grandeurs associées ne peuvent être définies qu'avec une marge d'erreur. Il s'agit d'une forme d'incertitude sur les modèles, qui fait le lien avec les incertitudes sur les processus eux-mêmes ;

- les incertitudes sur les processus régissant l'évolution du stockage. Une fois acquises les données concernant l'ensemble des composants du système, la représentation phénoménologique détaillée, il demeure à comprendre et à représenter la manière dont ces différents éléments entrent en relation et agissent sur l'évolution du système. La complexité des phénomènes ne permet pas nécessairement de disposer d'une compréhension détaillée de chaque interaction et contraint à adopter une représentation d'ensemble du milieu qui transcrit au mieux la compréhension du fonctionnement du système. La représentation par un modèle est entachée d'incertitudes dans la mesure où elle procède par simplification par rapport à une représentation plus détaillée des phénomènes. Il s'agit là aussi d'une incertitude portant sur des choix de modèles. C'est particulièrement le cas pour les phénomènes couplés, généralement plus difficiles à représenter. Entrent dans cette catégorie plusieurs types d'incertitudes :
 - ✓ celles dues à la nécessité de prévoir le comportement sur des temps longs, parfois jusqu'au million d'années, à partir d'observations qui sont en général pratiquées sur des durées beaucoup plus courtes ;
 - ✓ celles dues aux limites de validité des modèles ou à l'existence de plusieurs modèles rendant compte d'un même ensemble de constatations empiriques. On peut citer par exemple les incertitudes sur les modèles de comportement de certains colis de déchets, tels que les déchets vitrifiés. Au-delà de l'incertitude de mesure sur les paramètres du modèle (la vitesse initiale de dissolution, par exemple), existe une incertitude sur la nature même des phénomènes qui pilotent la dissolution de la matrice vitreuse ;
- les incertitudes technologiques. Au stade de la faisabilité, les dispositions technologiques à mettre en œuvre ne sont pas figées, et des choix existent entre différentes solutions qui peuvent ne pas avoir toutes les mêmes conséquences sur la sûreté à long terme du stockage. Par ailleurs, dans le cadre d'une gestion par étape du stockage, il est extrêmement peu probable que, même une fois le stockage défini plus complètement, il demeure exploité sur toute sa durée de la même manière. Il s'agit donc de prendre en compte :
 - ✓ les incertitudes dues à la variabilité des conditions possibles d'exploitation du stockage, soit parce que différentes techniques (par exemple de creusement) existent, soit parce que le schéma d'exploitation peut varier (ordre et rythme de livraison des colis, durée des phases d'observation et de réversibilité). Cette variabilité n'est une incertitude au regard de l'analyse de sûreté que si elle induit une indétermination sur l'état initial du stockage en phase de post-fermeture. Si, par exemple, la variabilité des techniques de creusement possible ou la durée d'exploitation induisent une indétermination sur l'extension ou la nature de la zone endommagée, il importe de la prendre en compte ;
 - ✓ celles dues à une limitation des connaissances sur les conditions de mise en œuvre d'une technologie particulière dans un contexte souterrain. Les concepts proposés par l'Andra faisant appel à des technologies éprouvées et bien connues, ces incertitudes sont très limitées et ne renvoient qu'à des opérations très particulières, qui n'ont pas leur équivalent exact dans d'autres secteurs industriels ;
- les événements externes. Ils constituent une forme d'incertitude particulière sur l'évolution du stockage. On distingue en général les phénomènes d'origine naturelle se produisant à la surface (événements climatiques, tectoniques, etc.) qui sont prédictibles dans leur principe mais souvent entachés de grandes incertitudes et les événements dus à l'action de l'homme (intrusion, effets anthropiques) qui sont, dans la plupart des cas, imprévisibles au-delà d'une échéance raisonnable. Ces événements sont assimilés à des incertitudes, au titre des perturbations qu'ils induisent. Des approches partiellement conventionnelles sont retenues classiquement pour limiter l'ampleur des incertitudes à prendre en compte. Conformément à la RFS III.2.f [2], on suppose en particulier que le comportement humain futur sera globalement le même qu'aujourd'hui. Il est possible en revanche d'adopter une démarche prédictive, fondée sur les évolutions passées, pour la plupart des phénomènes naturels. Même dans ce cas, les incertitudes sur le lointain futur sont à prendre en compte.

6.1.2 Maîtrise des incertitudes en phase de recherche

Pour pouvoir appréhender ces incertitudes, trois approches complémentaires ont été utilisées dans le cadre des recherches conduites :

- la constitution de référentiels de connaissances [17, 18, 19, 20, 21] permettant de disposer d'une vue aussi complète que possible à la date de rédaction des éléments disponibles sur les différents composants étudiés (milieu géologique, matériaux, colis...). Ces référentiels ont pour vocation de dresser un état de la connaissance disponible et de mettre en lumière, de manière corrélative, les lacunes de cette dernière. Ils contribuent ainsi à cerner les sources d'incertitudes et à orienter les actions à conduire pour réduire ces dernières le cas échéant ;
- la mise en œuvre de méthodes aussi systématiques que possible pour l'analyse du système et de son évolution. Tel a été l'objet de l'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) [27, 28]. Cette dernière est une approche de l'évolution du système de stockage dans le temps et dans l'espace. Pour chacune des situations de stockage identifiées dans ce cadre, un état des lieux des phénomènes et des modèles associés est dressé. Ce dernier permet en retour de mettre en évidence les limites de la connaissance ou de la compréhension et de cerner les incertitudes correspondantes. Par ailleurs, la détermination même des situations de stockage avec leur découpage dans le temps et dans l'espace peut souligner les incertitudes quant à la survenue d'un phénomène ou la limite chronologique exacte de ce dernier. Le travail systématique accompli dans le cadre de l'APSS a ainsi conduit au recensement d'une série d'incertitudes. Sans prétendre à l'exhaustivité, ce travail concourt à un repérage relativement détaillé des incertitudes ;
- le soin apporté à la traçabilité des choix de modèles et de paramètres, et à la définition des intervalles de variation pour ces derniers. Lors de l'établissement des modèles conceptuels représentant les grands processus au sein du stockage, les différents paramètres, modèles ou données utilisés sont répertoriés systématiquement, et sont qualifiés au regard des incertitudes (du « phénoménologique », correspondant à la valeur traduisant au mieux les données acquises et couvrant de manière raisonnable une éventuelle variabilité dans l'espace et le temps des données, au « conservatif » ou « pénalisant » tenant compte de l'ensemble des incertitudes, voir définition au chapitre 5, paragraphe 5.2.2).

6.1.3 Incertitudes et échelles de temps

Au delà de la phase d'exploitation, l'évaluation de sûreté doit être conduite sur une période de temps très longue (jusqu'au million d'années). Les incertitudes sur le comportement du stockage sur de telles périodes sont importantes. Le retour d'expérience sur l'évolution de systèmes naturels ou artificiels sur des échelles de temps pluriséculaires est limité aux analogues archéologiques, ou aux analogues naturels qui donnent pour leur part accès à des durées représentatives des échelles de temps géologiques. Cela ne signifie pas pour autant que ces incertitudes ne peuvent être maîtrisées avec un degré de confiance suffisant. Elles doivent être abordées de manière très systématique, leurs effets analysés et pris en compte dans les évaluations.

Les incertitudes ne sont pas de même nature selon les périodes ni les composants du stockage ou de son environnement qui sont considérés. Ainsi, à titre d'exemple :

- en champ proche, c'est-à-dire dans l'environnement immédiat des ouvrages de stockage, les incertitudes sur le comportement des matériaux et de la roche vont plutôt décroissant au fur et à mesure du temps, quand les processus thermiques, mécaniques et hydrologiques dus à la perturbation du stockage s'amenuisent ou atteignent un équilibre. Le temps d'atteinte de l'équilibre, et la nature exacte de cet équilibre, font en revanche l'objet d'incertitudes ;
- l'incertitude sur l'environnement de surface et les couches superficielles de la géosphère va globalement croissant, particulièrement quand on englobe dans l'évaluation des évolutions climatiques majeures, telles que les glaciations périodiques.

Dans le cas particulier du comportement des matériaux au sens large (y compris la roche), il est possible d'obtenir ou de fabriquer des échantillons représentatifs de la majorité des composants du

stockage (matrice de déchets, bentonite, béton, etc.). Il est également possible, en règle générale, de placer ces échantillons dans des conditions expérimentales représentatives de celles attendues en stockage (en termes de pH, Eh, etc.) compte tenu de la relative homogénéité de l'environnement du stockage. Cependant, les observations en laboratoire sont nécessairement limitées à quelques mois, voire quelques années, et l'extrapolation à de plus longues durées fait appel :

- soit à la compréhension des mécanismes de dégradation des matériaux sur une courte période, qu'il est possible d'extrapoler à long terme à condition de s'assurer qu'aucun phénomène nouveau, latent à court terme, ne se manifeste sur la durée ;
- soit à la transposition aux conditions du stockage d'observations effectuées dans des conditions plus défavorables, accélérant la vitesse des phénomènes (c'est le cas par exemple de la perturbation fer-argile, trop lente pour être observée en laboratoire à la température du stockage, mais qui est observable à haute température sur des temps courts). Cela suppose de disposer des données expérimentales permettant de déduire la cinétique des phénomènes en stockage à partir de celle observée dans des conditions de laboratoire ;
- soit à l'extrapolation d'observations effectuées sur des temps courts, dans des conditions d'environnement pénalisantes, vers des temps longs. Ce cas est différent du précédent, dans la mesure où on ne suppose pas qu'il existe une loi de transposition entre les observations expérimentales et la réalité en stockage, mais on se couvre par les conditions pénalisantes de l'expérimentation contre toute évolution possible du phénomène à long terme. C'est le cas par exemple du modèle « $V_0.S$ », étudiant l'altération du verre sur de courtes périodes dans des conditions défavorables (pas de silice dans le milieu extérieur, lixiviation par l'eau pure) pour en déduire un majorant de la vitesse de dissolution en stockage ;
- soit par l'étude de cas naturels, comme par exemple pour la perturbation cimentaire ou l'altération des matrices bitumineuses, ou d'analogues archéologiques.

6.1.4 Incertitudes et échelles d'espace

Les incertitudes liées aux échelles d'espace sont à considérer. Elles couvrent deux types de difficultés très différentes dans leur nature.

D'une part, certaines problématiques sont propres à la modélisation qui consiste à représenter des phénomènes individuellement bien compris et simples au-delà de l'échelle microscopique, au sein de milieux macroscopiques plus complexes (par exemple, l'évaluation de la perméabilité en grand de la zone endommagée à partir de la compréhension de sa structure). Ces questions se traitent par la confrontation des modèles théoriques aux expérimentations en laboratoire de surface ou in situ sur des milieux réels, à des échelles variées. La situation inverse peut également se présenter, où un phénomène est correctement représenté à l'échelle macroscopique sans que les mécanismes à l'échelle microscopiques soient connus de manière exhaustive. Il en va ainsi que la représentation de la sorption par un coefficient macroscopique « de partage », le K_d .

D'autres sont liées au fait d'appliquer des observations nécessairement locales à ce stade du projet à l'échelle d'un objet industriel tel qu'un stockage, beaucoup plus étendu. Sur l'étendue d'un stockage, le concepteur doit s'attendre à rencontrer localement des conditions géologiques présentant une certaine variabilité. Les dispositions de conception, et en premier lieu le choix même d'une formation géologique offrant de bonnes propriétés d'homogénéité physico-chimique sur une emprise large, contribuent à garantir que l'environnement des colis de stockage sera peu différent d'une alvéole à l'autre, ou au sein d'une même alvéole. Une variabilité résiduelle peut cependant demeurer, et doit dans ce cas être prise en compte dans l'analyse de sûreté.

L'analyse de la sûreté doit donc nécessairement prendre en compte les changements d'échelle de temps et d'espace. Elle impose un découpage spatio-temporel qui se retrouve dans tous les compartiments de l'analyse. On l'a vu apparaître au chapitre 3 lors de l'attribution des fonctions de sûreté. Il conditionne l'évaluation des performances (chapitre 5). Il fonde nécessairement également l'analyse des incertitudes. Le découpage temporel proposé par l'analyse phénoménologique des situations de stockage, lui-même fondé sur le comportement des composants du stockage (décroissance thermique et radioactive, dégradation des matériaux, retours à l'équilibre) est reconduit dans l'analyse de sûreté.

6.1.5 Gestion des risques et des incertitudes

6.1.5.1 Les modalités communes de gestion entre « risques » et « incertitudes ».

Les notions d'incertitudes et de risques sont nettement distinctes dans le cas de la sûreté opérationnelle : la notion de risque renvoie à des événements ponctuels dont l'occurrence présente une probabilité faible à moyenne (incendie, accident de criticité, etc.). La notion d'incertitude relève, quant à elle, d'une maîtrise insuffisante de paramètres techniques (incertitudes sur les plages de réglage des ventilations, par exemple).

Dans le cas de la sûreté à long terme, les deux notions sont largement confondues. Les risques à long terme correspondent à l'occurrence d'événements dont la probabilité est souvent difficilement quantifiable (probabilité d'une intrusion dans le stockage à long terme, par exemple), que l'on peut considérer comme une forme d'incertitude sur l'histoire future du stockage. Réciproquement, des incertitudes sur la connaissance phénoménologique peuvent induire un risque au sens classique du terme (par exemple, une incertitude sur les propriétés de la zone endommagée pourrait entraîner l'apparition d'un court-circuit de la barrière géologique dans certaines zones. Cette évolution divergente de la situation normale est assimilable à un « risque »).

Les risques et les incertitudes sont pris en charge de manière très similaire dans le dossier 2005. On choisit donc de ne pas chercher à les distinguer de manière systématique. On parlera de « risques et incertitudes » ou plus simplement d'« incertitudes », sans distinguer formellement les uns des autres.

6.1.5.2 Principes de gestion des incertitudes

Une incertitude ou un risque concerne la sûreté s'il peut être de nature à remettre en cause l'évaluation de la performance du stockage, telle que présentée au chapitre 5. Cette remise en cause peut prendre différentes formes.

En premier lieu, l'incertitude peut concerner purement l'évaluation quantitative de l'impact du stockage ou d'un indicateur de sûreté intermédiaire. Par exemple, il est possible que l'inventaire radiologique contenu dans un colis soit mal connu et puisse être supérieur à la valeur retenue en référence. Une telle incertitude, portant uniquement sur une donnée qui sert au calcul, se traite aisément par des techniques purement numériques : il suffit de réaliser une étude de sensibilité pour évaluer si ce paramètre est réellement important au regard de l'impact. S'il l'est, il convient d'adopter une valeur de ce paramètre permettant de s'assurer que le résultat du calcul est majorant. Ces évaluations ont été présentées au sein du chapitre 5, soit directement dans le calcul de référence, soit dans les analyses de sensibilité.

D'autres incertitudes peuvent porter sur la capacité d'un ou plusieurs composants à remplir une des fonctions attendues. Cela peut porter sur la performance de la fonction (le composant sera-t-il aussi efficace qu'envisagé ?), sur la disponibilité (la fonction pourra-t-elle être maintenue sur la durée nécessaire ?) ou sur sa fiabilité (la fonction n'est-elle pas trop dépendante des conditions d'environnement ?). Par exemple, l'incertitude sur la vitesse de corrosion des conteneurs en condition de stockage peut influencer sur la disponibilité de la fonction d'étanchéité attendue de la part de ceux-ci.

Une fonction de sûreté peut se trouver affectée de plusieurs manières :

- soit la performance (ou la disponibilité, ou la fiabilité) est dégradée, mais la fonction en elle-même est préservée. C'est le cas par exemple d'une variabilité locale de perméabilité de la formation hôte, qui n'induirait pas de changement de régime hydrologique. Ce type d'incertitude peut influencer sur les résultats quantitatifs des évaluations de sûreté (dans le sens d'une augmentation de l'impact calculé) mais n'induit pas d'évolution divergente du stockage par rapport à la situation considérée en nominal ;
- soit la performance est dégradée à un point tel qu'on considère possible que la fonction ne soit plus suffisamment remplie. C'est le cas par exemple d'une corrosion affectant un conteneur à un point tel qu'il n'est plus possible de prendre en compte la capacité de confinement de celui-ci ; on considère alors arbitrairement qu'il n'en a plus. Ce type d'appréciation relève en partie d'un jugement qualitatif de l'ingénieur de sûreté, dans la mesure où il existe un continuum de situations entre la pleine performance d'une fonction et sa perte totale. De manière prudente, on considère une fonction comme perdue dès que sa performance ou sa disponibilité sont susceptibles d'être significativement différentes de ce qui est prévu par le concepteur.

Le premier cas d'incertitude est similaire aux incertitudes d'ordre purement numérique, dans la mesure où il relève d'un traitement par analyse de sensibilité, et revient à envisager un cas de calcul plus défavorable dans le calcul de performances, ou à intégrer directement l'incertitude dans le calcul de référence sous forme d'un modèle ou d'un paramètre conservatif.

La deuxième situation est en revanche spécifique de l'analyse de sûreté au sens strict. A partir du moment où une fonction peut être perdue, le stockage peut ne plus se comporter comme prévu par le concepteur en référence. La vraisemblance d'une telle situation doit alors être évaluée.

Si elle apparaît comme suffisamment probable, alors la fonction elle-même n'est pas fiable et on doit revoir la conception du stockage, dans le cadre d'un processus itératif entre analyse des fonctions et analyse de sûreté. Par exemple, une incertitude existe à ce stade du programme de recherche sur la capacité de rétention du verre à des températures supérieures à 50°C. Un surconteneur a été prévu autour du verre, apte à maintenir une fonction de confinement redondante et plus fiable que celle du verre pendant la décroissance de la température de ce dernier.

Si, en revanche, la perte de la fonction relève d'une situation peu vraisemblable, faisant appel par exemple à une valeur de paramètre très rarement observée, ou à un enchaînement de phénomènes de très faible probabilité, alors il est possible de tolérer l'incertitude en question à condition d'en évaluer les conséquences. Une telle situation de perte d'une fonction, peu vraisemblable par nature, est qualifiée de situation altérée. Dans le cadre d'une démarche de défense en profondeur, il est nécessaire également de prendre des dispositions pour réduire autant que possible la vraisemblance d'une situation altérée, ou la gravité de ses conséquences. L'action du concepteur, même si elle est centrée sur la maîtrise de l'évolution normale, ne néglige pas les situations altérées. Ainsi, par exemple, le fractionnement du stockage par des scellements favorise la limitation des conséquences d'un forage intrusif venant traverser une galerie ou un module.

L'objectif de l'analyse de sûreté est d'identifier soigneusement le poids de chaque incertitude dans le comportement global du stockage, et de voir comment elle peut remettre en cause ou pas l'évolution nominale envisagée en scénario d'évolution normale.

La prise en compte des risques et des incertitudes passe en définitive par des modalités différentes :

- la première d'entre elles, qu'il convient de privilégier chaque fois que cela est possible, est la maîtrise des incertitudes (« risk management »), c'est-à-dire leur prise en charge par la conception même du stockage, par la définition de dispositions de conception qui permettent de rendre le système robuste face à l'incertitude en question (voir chapitre 1, principe de robustesse) ;
- la deuxième modalité est l'intégration du risque ou de l'incertitude dans l'évaluation « en évolution normale » des performances du stockage, c'est-à-dire d'en prendre en compte l'éventualité en effectuant un choix pénalisant dans le scénario d'évolution normale, soit dans le calcul de référence, soit en sensibilité. Ainsi, par exemple, s'il existe des incertitudes sur les

capacités de confinement apportées par une matrice de déchets particulière, on peut retenir dans l'évaluation que le relâchement des colis concernés est labile. Ce choix n'entend pas représenter une réalité, mais vise à se prémunir contre toute éventualité. Cela n'empêche bien évidemment pas de poursuivre les travaux de caractérisation pour mieux connaître le comportement d'une telle matrice, ni de prendre des mesures qui permettent, qualitativement, de favoriser le confinement ;

- pour les incertitudes qui ne peuvent être abordées par les deux méthodes précédentes, on doit identifier quelle séquence d'événements, constituant une situation altérée, serait induite par le risque en question et en évaluer les conséquences. Il convient alors de s'assurer que la vraisemblance de cette situation est faible. Comme il n'est pas possible d'évaluer individuellement toutes les situations altérées concevables, elles sont groupées par familles de situations similaires. Chaque famille est rattachée à un scénario d'évolution altérée qui décrit une situation altérée – type, comportant éventuellement des variantes et/ou des études de sensibilité, dont les effets sont similaires à ceux des situations qu'il entend représenter, et dont les conséquences sont plus graves. Le scénario d'évolution altérée représente donc une situation « enveloppe »⁸⁰ de situations altérées a priori diverses [2]. Il traduit ainsi des effets similaires, tout en retenant ceux qui ont les conséquences les plus graves.

6.1.5.3 Place de la gestion des incertitudes dans le dossier

L'objectif de ce chapitre est, conformément à la démarche générale, de porter un regard sur l'ensemble des incertitudes et risques qui pèsent sur le scénario d'évolution « normale » telle qu'il a été décrit et évalué dans les chapitres précédents.

Il convient de noter que la gestion des incertitudes fait partie intégrante de la définition même du scénario d'évolution normale. Lors de l'explication des choix ayant présidé à l'élaboration du modèle de calcul de sûreté (chapitre 5), on a vu que la plupart de ces choix est destinée à couvrir des incertitudes. Les modèles retenus sont « conservatifs » soit en référence, soit en analyse de sensibilité. Certaines marges ou réserves potentiellement disponibles sont négligées. Le scénario d'évolution normale constitue ainsi, aussi bien dans sa version de référence qu'en intégrant l'ensemble des sensibilités, une enveloppe d'un ensemble d'évolutions possibles : les colis pourraient se dégrader moins vite que ce qui a été représenté, les relâchements être plus lents, etc. Conformément à la RFS III.2.f, le scénario d'évolution normale, le cas échéant accompagné de ses études de sensibilité, doit être l'enveloppe des situations jugées certaines ou très probables. Il n'est pas une « prédiction » de l'évolution du stockage.

Le présent chapitre sur la gestion des incertitudes aurait donc pu précéder celui sur la définition du scénario d'évolution normale. Il est apparu plus commode de discuter les incertitudes une fois décrite la référence que constitue le scénario d'évolution normale, et une fois réalisée une première hiérarchisation des paramètres importants, de manière à :

- présenter plus clairement au lecteur quelles sont les incertitudes qui sont prises en compte en situation normale, identifier éventuellement celles qui ne le sont pas, et expliquer pourquoi ;
- juger, grâce notamment aux analyses de sensibilités déjà effectuées, de l'importance des différents paramètres et modèles de manière à porter un jugement plus argumenté sur la hiérarchie des incertitudes ;
- servir d'introduction à la définition des situations altérées envisageables, regroupées en scénarios d'évolution altérée, qui seront traités au chapitre 7.

Le recensement détaillé des incertitudes est l'objet de l'analyse qualitative de sûreté [33]. Elle permet de mettre en évidence les effets des incertitudes sur les fonctions de sûreté des différents composants du stockage, et plus généralement sur l'évolution du stockage.

⁸⁰ Voir définition au paragraphe 5.1.1

Sa méthodologie est rappelée succinctement dans le paragraphe suivant. Les principaux résultats sont ensuite exposés. Les incertitudes étant placées en regard des fonctions attendues et de l'évolution normale, ce chapitre assure un lien avec les chapitres 3 et 5 du présent rapport. Il introduit la définition des scénarios d'évolution altérée.

6.1.5.4 Méthodologie de l'analyse qualitative de sûreté

La méthode de l'analyse qualitative de sûreté (AQS), outil d'identification et de gestion des incertitudes, est détaillée dans un document spécifique [33]. Seuls les objectifs et la trame de la méthode sont rappelés ici.

L'objectif de l'analyse qualitative de sûreté, conduite en 2004 une fois les référentiels de connaissances établis, est en premier lieu un recensement des risques et des incertitudes.

L'ensemble des risques d'origine externe, ceux à dire ceux qui trouvent leur cause dans un élément extérieur au stockage (les risques d'intrusion humaine, les séismes, etc.) est identifié sur la base d'un recensement des interactions possibles entre le stockage et le milieu qui l'environne [82]. Cet examen est mené selon la méthode classique d'une analyse fonctionnelle externe, et conduit à identifier une liste d'événements possibles, a priori défavorables à la sûreté du stockage. On confronte par ailleurs les résultats de l'analyse aux risques que la RFS III.2.f recommande de prendre en compte, ou qui sont classiquement considérés dans les approches étrangères et les bases de données internationales [83, 84].

Parallèlement l'analyse s'intéresse aux incertitudes à proprement parler, en se fondant sur les référentiels de connaissance, les analyses phénoménologiques des situations de stockage (APSS) et la description des modèles conceptuels ; ceux-ci ont été rédigés par les différents experts, sensibilisés à la nécessité de relever les incertitudes de manière systématique. La démarche de l'APSS, et le cadre formel dans lequel ont été établis les modèles conceptuels (avec, en particulier, la nécessité de définir les intervalles de variation des paramètres) sont un gage du systématisme dans l'identification des incertitudes. L'analyse consiste à mettre en regard l'état des connaissances par rapport aux fonctions de sûreté attendues. Certaines incertitudes peuvent en effet directement influencer sur la confiance que l'on peut avoir dans une fonction de sûreté. Par exemple, une incertitude sur la perméabilité de la formation hôte peut être de nature, si elle est trop forte, à remettre en cause les performances de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau ».

L'incertitude fait l'objet d'une étude systématique qui identifie :

- quel(s) composant(s) est concerné par cette incertitude, avec éventuellement les effets induits d'un composant sur l'autre par le biais d'une perturbation ;
- quelle(s) performance(s) de quelle(s) fonction(s) de sûreté peut s'en trouver altérée(s). Une appréciation qualitative – mais argumentée, y compris en s'appuyant le cas échéant sur des calculs spécifiques – est portée sur le risque de diminution significative des performances attendues ;
- le cas échéant, si une telle information est utile, la période de temps concernée.

Le premier objectif est d'identifier si les incertitudes sont bien couvertes par le scénario d'évolution normale, soit dans sa version de référence, soit dans une des études de sensibilité considérées. Si certaines ne le sont pas, on doit s'assurer qu'elles ont peu d'effet sur l'impact du stockage, ou renvoient à des situations très peu vraisemblables.

Dans un deuxième temps, si l'incertitude n'est pas couverte en scénario d'évolution normale, on vérifie quelle(s) fonction(s) sur quel(s) composant(s) peut être atteinte(s). L'analyse systématique composant par composant permet en particulier d'identifier les causes communes de perte de plusieurs fonctions : par exemple, une évaluation erronée du comportement à long terme d'un matériau peut affecter l'ensemble des composants qui en sont constitués, qui peuvent avoir des fonctions différentes. L'analyse qualitative de sûreté permet de porter une appréciation sur le niveau d'indépendance des fonctions de sûreté, en identifiant les possibles incertitudes affectant plusieurs fonctions.

On décrit l'effet que peut avoir la prise en compte de chaque incertitude (c'est-à-dire le comportement du stockage si la valeur défavorable du paramètre en question était la valeur effective, ou si le risque envisagé s'avérait) en termes d'évolution du stockage. On se fonde pour cela sur les fonctions qui sont susceptibles d'être perdues. Par exemple, si un ensemble d'incertitudes peut remettre en cause la fonction « réguler le pH dans les alvéoles de déchets vitrifiés », on décrit la situation correspondante, c'est-à-dire les effets d'une augmentation non maîtrisée du pH. Si des dispositions de conception permettent d'annuler cet effet, ou si celui-ci est pris en compte en scénario d'évolution normale ou dans des calculs de sensibilité de celui-ci, l'analyse s'arrête à ce stade. Si une fonction de sûreté peut être affectée et une évolution divergente du stockage être amorcée, avec un impact éventuel sur d'autres composants, alors cet effet est identifié spécifiquement.

Un jugement qualitatif sur la vraisemblance de ces effets est également porté (le risque est-il vraisemblable ?). Ce jugement peut se fonder sur des éléments quantifiés – par exemple, si une situation repose sur des valeurs défavorables de paramètres, chacune rarement ou jamais mesurée en laboratoire, elle peut être qualifiée de peu vraisemblable sur une base objective. Ce type d'appréciation repose parfois également en partie sur un raisonnement plus qualitatif, faisant référence par exemple à des analogies avec des cas naturels. Compte tenu des échelles de temps considérées, on n'a pas cherché à chiffrer une probabilité précise pour des événements à caractère aléatoire, trop sujette à caution.

Outre la prise en compte des incertitudes une par une, on a tâché également d'identifier si leurs combinaisons pouvaient conduire à des effets qui s'écartent notablement de l'évolution normale. A titre d'exemple, on pourrait imaginer que le cumul des incertitudes portant sur l'efficacité d'une coupure hydraulique au niveau d'un scellement et sur les caractéristiques de la zone endommagée qu'elle intercepte pourrait conduire, considérées ensemble, à des performances significativement plus défavorables que celles que l'on obtiendrait en considérant individuellement chaque incertitude. On a écarté dans certains cas des combinaisons d'incertitudes sur la base d'un principe similaire à celui de « non double-défaillance », appliqué dans les installations nucléaires classiques. On a écarté à ce titre toute combinaison de défaillances relevant d'erreurs de conception cumulées. A titre d'exemple, bien qu'on ait envisagé d'une part la possibilité que des conteneurs soient mal réalisés et d'autre part que les scellements soient mal conçus, on n'envisage pas une combinaison de ces deux dysfonctionnements simultanément, bien entendu sous réserve que l'analyse ne mette pas en valeur une cause commune pouvant conduire à la perte des fonctionnalités de ces deux composants simultanément (ce qui pourrait être le cas, par exemple, s'ils étaient constitués d'un même matériau sur l'évolution duquel pèserait une incertitude).

L'analyse permet à la fois de vérifier que l'ensemble des calculs de sensibilités du scénario d'évolution normale est pertinent, mais également de construire des situations altérées jugées possibles, même si elles doivent, en tout état de cause, être peu probables pour mériter le qualificatif d'« altérées ». On compare les événements qui pourraient se produire dans la situation envisagée avec ceux de chaque scénario d'évolution altérée (SEA), afin de vérifier que les SEA « couvrent » bien la situation dans un de leurs cas de calculs. Le caractère enveloppe de ces scénarios, au regard des connaissances actuelles et du niveau de développement atteint par l'analyse de sûreté, est donc vérifié.

Les scénarios d'évolution altérée retenus par l'Andra sont au nombre de quatre : scénario de défaut de scellements, scénario de défaut de colis, scénario de forage, scénario de fonctionnement très dégradé. Ce choix se fonde sur une sélection a priori de grandes situations-types à traiter, selon une logique qui est présentée en introduction du chapitre 7. Cette sélection est par conséquent antérieure à la réalisation de l'AQS. Celle-ci, en rattachant les situations de défaillances possibles à l'un ou l'autre de ces scénarios, et en permettant de préciser les cas de calculs et les variantes à traiter, a validé la pertinence des SEA retenus.

*Encadré 8**Exemple d'illustration d'application de la méthodologie d'analyse qualitative de sûreté*

Pour illustrer la méthode, on présente ci-dessous un exemple – simplifié pour les besoins de la présentation – de la manière dont est conduite l'analyse qualitative du comportement d'un composant particulier, en l'occurrence le bouchon d'alvéole C.

On commence par décrire les limites du composant à couvrir : on appelle « bouchon d'alvéole de déchets C », dans le cadre de l'AQS, l'ensemble constitué par le bouchon en bentonite et l'EDZ qui peut l'entourer.

On recense les fonctions de sûreté attendues de ce composant. En s'appuyant sur l'analyse fonctionnelle, on identifie que le bouchon contribue à « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », en préservant des conditions physico-chimiques favorables dans l'alvéole : maintien d'un régime diffusif, limitation du pH en s'opposant à la progression du panache alcalin issu des éléments en béton extérieurs à l'alvéole. Il contribue également à empêcher les colloïdes éventuellement formés dans l'alvéole de progresser jusqu'à la galerie. A titre supplétif, il permet également de retarder et atténuer le flux de radionucléides sortant de l'alvéole, bien que sa contribution à cette fonction soit négligeable au regard de celle de la formation hôte.

On s'assure également que ce composant ne peut avoir un rôle perturbateur sur son environnement. En l'occurrence, on peut imaginer une action mécanique sur la formation hôte, dans l'hypothèse où le bouchon gonflerait de manière excessive.

Les caractéristiques du bouchon sont ensuite reliées aux fonctions de sûreté à assurer : perméabilité (pour les conditions diffusives), coefficient de diffusion et capacité tampon (pour le pH), porosité (pour les colloïdes), capacités de sorption (retarder et atténuer). Le dimensionnement mécanique du bouchon est également à considérer.

Ces caractéristiques sont passées en revue et les incertitudes identifiées de manière systématiques au travers de l'examen des résultats de la recherche. Par exemple, on peut relever des incertitudes sur la perméabilité en grand du bouchon, liées à des incertitudes sur celle de l'EDZ à son pourtour.

Dans un deuxième temps, l'environnement du composant est examiné : il est constitué par le massif d'appui en béton, le bouchon d'exploitation métallique, le contenu de l'alvéole (les déchets, les surconteneurs, le chemisage). Les actions d'ordre thermique, hydraulique, mécanique, chimique et radiologique que ces composants peuvent exercer sur les caractéristiques du bouchon sont identifiées en s'appuyant sur l'APSS. Ainsi, la chaleur dégagée par les déchets peut modifier la perméabilité, le coefficient de diffusion, les équilibres d'adsorption, etc. Les gaz issus de la corrosion des composants métalliques de l'alvéole peuvent agir sur le bouchon, etc. On étudie si ces phénomènes, et les incertitudes dont ils sont entachés, peuvent agir sur les fonctions de sûreté.

L'analyse est complétée in fine par l'étude des événements externes qui peuvent agir sur le composant. Par exemple : un séisme est-il susceptible d'affecter les fonctions du bouchon ?

Le systématisme du recensement des incertitudes s'appuie donc sur cette méthode, permettant de prendre en compte, en fonction du niveau de développement des concepts et de l'acquisition des connaissances, l'environnement de chaque composant et les interactions de toute nature.

Cette analyse permet ainsi de recenser les incertitudes et d'en effectuer un premier tri guidé par la manière dont elles peuvent affecter les fonctions de sûreté. On prend en compte, pour ce tri, notamment le fait que des dispositions de conception existent pour gérer l'incertitude. Ainsi, la longueur du bouchon peut être adaptée en fonction de sa plus

ou moins grande capacité à tamponner la perturbation alcaline. Cet élément est pris en compte pour hiérarchiser les incertitudes relatives à l'extension de cette perturbation, par rapport à d'autres éventuellement moins maîtrisables.

L'analyse transverse des incertitudes sur l'ensemble des composants permet ensuite d'identifier de possibles causes communes. Par exemple, si on a identifié que l'EDZ au droit des bouchons pourrait présenter une perméabilité plus forte que celle qui est attendue, la même incertitude affecte a priori les bouchons d'alvéoles de combustibles usés, voire les scellements de galeries. On s'assure alors que de tels effets sont bien couverts en scénario d'évolution normale, en référence ou le cas échéant par des études de sensibilité. Dans la négative, il conviendrait de les couvrir par un scénario d'évolution altérée, à condition que de tels effets apparaissent suffisamment peu probables.

6.1.5.5 Vérification de l'analyse qualitative de sûreté

L'analyse qualitative de sûreté a été réalisée par des ingénieurs de l'Andra n'ayant pas participé à la rédaction des documents scientifiques. De cette manière, un certain degré d'indépendance est apporté à l'analyse de sûreté, puisque les personnes en charge d'analyser les incertitudes et les possibles situations altérées (les ingénieurs de sûreté) ne sont pas les mêmes que celles qui ont établi le schéma phénoménologique de l'évolution normale.

L'Andra a de plus souhaité conforter l'analyse qualitative de sûreté en la comparant aux résultats d'analyses pratiquées à l'international. C'était une des recommandations importantes issues de la revue par les pairs conduite par l'OCDE/AEN [15]. L'Agence s'est appuyée pour cela sur les bases de « features, events and processes » disponibles à l'international, en particulier les bases FEPCAT [83] et FEP 2000 [84] de l'OCDE/AEN. Ces bases ont elles-mêmes été complétées par une confrontation avec la base OPALINUS de la NAGRA [85]. Les analyses de sûreté suisses sont en effet conduites dans un milieu géologique proche du contexte de Meuse / Haute-Marne, et sur des concepts de stockage présentant suffisamment de similarités pour qu'une comparaison soit possible.

Les bases de FEPs recensent des « caractéristiques, processus et événements » a priori importants pour l'analyse de sûreté, ce qui est une approche différente de celle de l'AQS qui s'intéresse aux incertitudes portant sur ces mêmes caractéristiques, processus et événements. L'AQS privilégie les incertitudes, l'approche par composant et par fonction ; une FEP peut par conséquent être présente dans plusieurs parties de l'AQS. Etablir le lien entre chaque FEP et chaque partie de l'analyse nécessite d'entrer dans le détail des argumentaires de l'AQS, mais s'est avéré en pratique possible, et utile pour vérifier et clarifier l'AQS. Par ailleurs, les FEPs ont vocation à englober une phénoménologie pouvant correspondre à des analyses de sûreté différentes, conduites dans des contextes géologiques différents, et certaines nécessitent d'être adaptées pour s'appliquer au dossier 2005. Cette adaptation a pu être pratiquée sans difficultés majeures, seules quelques FEPs concernant des phénomènes ne pouvant se produire dans le contexte particulier du site de Meuse / Haute-Marne ont pu être identifiées dans les bases, mais non abordées dans l'analyse qualitative.

La comparaison entre les bases de FEPs et les analyses propres à l'Andra a été un exercice important pour l'AQS, et a permis de la compléter sur plusieurs aspects, afin d'aboutir in fine à une cohérence des approches. La comparaison permet de conclure à la conformité de l'analyse qualitative de sûreté par rapport à la référence que constituent les FEPs. Elle est un élément de crédibilité pour le dossier 2005 [86].

6.2 Principaux résultats du recensement des incertitudes

Ce paragraphe décrit les résultats de l'analyse qualitative de sûreté. Il expose les principales incertitudes relevées au cours de l'analyse. Elles sont décrites succinctement, leurs effets possibles et leur mode de prise en compte dans l'analyse de sûreté sont identifiés.

Ce chapitre n'a pas pour objectif de décrire l'ensemble de l'évolution phénoménologique du stockage, ni même de présenter l'état des connaissances scientifiques acquises jusqu'à ce jour sur l'évolution du stockage. Le lecteur qui souhaite approfondir ces aspects est invité à se reporter au tome « évolution phénoménologique du stockage géologique » [7] ainsi qu'aux référentiels de connaissances [17, 18, 19, 20, 21]. Ne sont présentés ici que les caractéristiques des composants, les phénomènes physico-chimiques et les événements externes qui font l'objet d'incertitudes significatives et peuvent influencer sur l'évolution normale du stockage. Les résultats scientifiques ne sont rappelés qu'afin d'assurer une facilité de compréhension pour le lecteur. Leur présentation est par conséquent nécessairement partielle.

Le paragraphe 6.2 présente les principales incertitudes, et comment elles sont couvertes par conception, ou comment elles sont prises en compte dans le scénario d'évolution normale dont les résultats ont été présentés au chapitre précédent. Ce paragraphe contribue donc à définir de manière plus complète le « domaine d'évolution normale » qui a été esquissé précédemment.

L'identification des incertitudes s'est faite selon la classification présentée au paragraphe 6.1.1. Pour la clarté de la restitution, on a opté pour une présentation légèrement différente, conduisant à retenir une approche par thèmes. On aborde successivement :

- les incertitudes sur la connaissance physique du milieu : formation hôte, formations encaissantes, environnement de surface. On distingue celles qui sont dues à la variabilité naturelle des caractéristiques du milieu géologique à l'échelle de l'emprise d'un stockage, celles qui sont dues aux limites du programme de caractérisation, et celles liées à l'extrapolation sur de longues échelles de temps (évolution géomorphologique à long terme) ;
- les incertitudes sur l'inventaire et la connaissance des colis de déchets, qui sont classées par grand thème : inventaire, contenu radiologique, contenu chimique ;
- les incertitudes sur les phénomènes régissant l'évolution interne du stockage, en distinguant celles qui relèvent majoritairement de processus hydrauliques, puis mécaniques, puis chimiques, puis radiologiques, puis affectant le transport des radionucléides. La thermique, pour laquelle on traite essentiellement de son influence sur les autres phénomènes, est abordée en dernier. Les couplages sont traités au stade où cela paraît le plus naturel ;
- les incertitudes dites « technologiques », c'est-à-dire celles liées à un mauvais usage des techniques mises en œuvre pour construire et exploiter le stockage (risque de mauvaise contrôle qualité, risque d'oubli d'une procédure critique) ou liées aux effets des différentes techniques de construction / exploitation possibles sur l'évolution du stockage en phase de post-fermeture. On distingue dans un paragraphe à part la problématique liée à la durée et aux modalités de la phase d'exploitation – observation, dans la mesure où elle peut influencer sur la sûreté en post-fermeture ;
- les risques externes, c'est-à-dire la possibilité que surviennent un séisme, un phénomène climatique de grande ampleur, etc. ou les risques d'intrusion humaine suite à une perte de mémoire du stockage.

Le but est, à chaque fois, de porter un jugement sur la criticité potentielle de chaque incertitude, en s'appuyant sur les moyens qui ont été mis en œuvre pour en prévenir les effets (dispositions de conception déjà largement évoquées au chapitre 3, programmes de recherche passés ou en cours) et sur son effet potentiel sur l'évolution du stockage. Une hiérarchisation de ces incertitudes est effectuée, visant à retenir de manière privilégiée celles qui pourraient remettre en cause les fonctions de sûreté. Les résultats de calcul présentés au chapitre 5 ont déjà permis de hiérarchiser les grandes caractéristiques, notamment du milieu géologique, qui influent le plus sur l'impact potentiel du

stockage. Ces résultats apportent une clé de lecture utile pour classer en retour les incertitudes ; c'est une des raisons pour lesquelles les résultats du SEN ont été introduits avant le présent chapitre.

La liste des incertitudes est issue de l'analyse qualitative de sûreté et présente celles qui y ont été sélectionnées comme potentiellement importantes, à des degrés divers. Certaines incertitudes ont été écartées lors de l'analyse qualitative, car jugées soit de peu d'importance quantitative ou qualitative, soit sans effet ou avec un effet très faible sur la sûreté, en situation normale et en situation altérée. Elles ne sont pas nécessairement rappelées ici.

Le paragraphe 6.3 constitue un résumé et une mise en perspective de celles des incertitudes qui ont été identifiées au paragraphe 6.2 comme relevant d'un traitement par un scénario d'évolution altérée ; il sert d'introduction au chapitre 7, qui présente la quantification des SEA.

6.2.1 Incertitudes sur la connaissance du milieu géologique : la formation hôte

La formation du Callovo-Oxfordien est accessible à l'observation directe en laboratoire souterrain depuis 2004. Toutes les mesures acquises précédemment l'ont été par un important programme de prélèvements d'échantillons, à partir de carottages ou de mesures en forages (voir Figure 6.2-1).

De nombreuses précautions ont été prises pour minimiser les possibles biais liés à ces mesures : confinement mécanique des échantillons, conditionnement en atmosphère inerte pour éviter les phénomènes d'oxydation. Un examen des protocoles de mesures est pratiqué de manière systématique par l'Andra, de manière à rejeter les résultats expérimentaux qui pourraient être par trop influencés par les conditions de prélèvement.

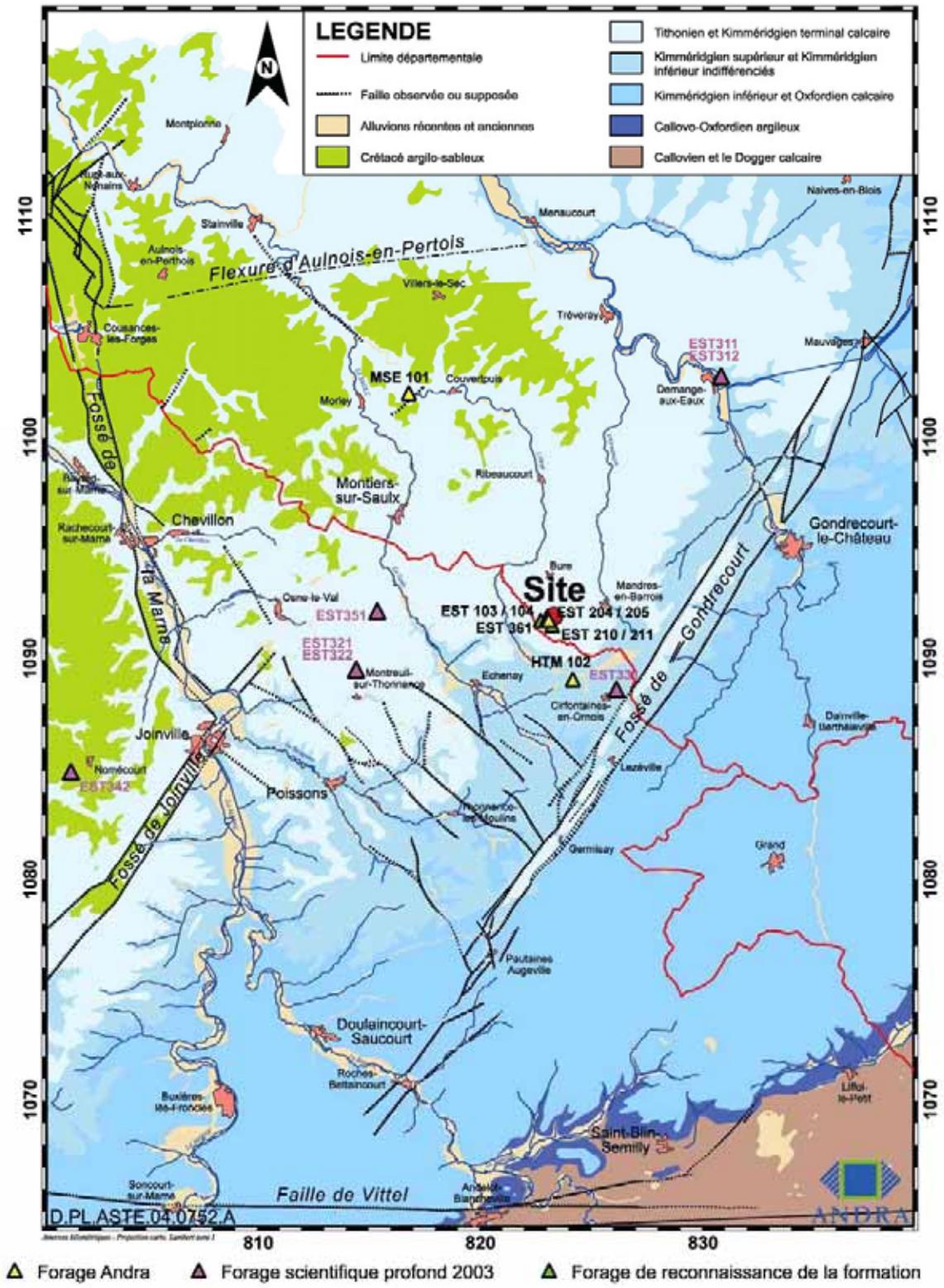


Figure 6.2-1

Site Meuse / Haute-Marne – Localisation des principaux forages

6.2.1.1 Homogénéité latérale de la formation

Une limite intrinsèque du programme de caractérisation de la formation est liée à la technique même de l'échantillonnage par sondage, qui pose la question de zones pouvant présenter localement des propriétés plus favorables ou plus défavorables que celles qui ont été observées, et qui auraient échappé aux investigations. Ces zones non détectées n'ont d'importance pour l'analyse de sûreté qu'à partir du moment où elles pourraient induire une dégradation des performances de sûreté attendues de la part de la formation hôte, au niveau global ou local. La variabilité « attendue » est couverte en représentant la formation hôte comme un milieu homogène et uniforme, et par la définition d'intervalles de variation (définition d'une valeur « phénoménologique » et d'une valeur « conservative ») pour l'ensemble des paramètres introduits dans le scénario d'évolution normale. Quand un nombre suffisant de mesures existe, la valeur « phénoménologique » est utilisée en référence et la valeur « conservative » en sensibilité, sinon seule la valeur conservative est prise en compte (voir paragraphe 6.2.1.4).

Dans ces conditions, l'incertitude sur la représentation de la formation hôte sous forme d'un milieu homogène renvoie à l'éventualité de zones particulières, se démarquant plus ou plus fortement des propriétés moyennes du Callovo-Oxfordien, assimilables à des structures (fractures, fissures...) ayant pu se former au sein de la roche, et ayant échappé jusqu'ici aux investigations.

Au stade actuel du programme de recherche (campagnes de forages sur le secteur de la Meuse / Haute-Marne, sismiques 2D et 3D, forages de reconnaissances), aucune fracture ou fissure conductrice n'a été détectée sur le site du laboratoire. Par ailleurs, les forages déviés effectués en 2004 n'ont mis en évidence que des micro-cassures qui présentent des géométries et des remplissages correspondant à des phénomènes diagénétiques précoces. Par ailleurs, les tests hydrauliques effectués à l'aplomb de ces structures n'ont pas mis en évidence de variation de perméabilité. Des diaclases (micro-structures sans déplacement des lèvres) peuvent être présentes dans la formation hôte mais elles sont en général colmatées et n'affectent ni la géométrie de la couche, ni sa perméabilité [17]. La RFS.III.2.f, qui traite de sites génériques, évoque la possibilité de lentilles de sables. La reconstitution des conditions de formation du Callovo-Oxfordien rend celles-ci très improbables ; elles n'ont d'ailleurs jamais été observées.

Il demeure possible que, dans le cadre de la réalisation d'un stockage, une structure puisse échapper à des investigations de surface, à condition que ses propriétés soient suffisamment peu contrastées. En particulier, sa perméabilité serait limitée. Lors de la reconnaissance du milieu, à mesure de la construction du stockage, les éventuelles structures recoupées ou simplement détectées pourraient être gérées en adaptant l'architecture du fait de sa modularité [25]. Selon l'importance de la structure en question, dont les caractéristiques hydrauliques seraient évaluées in situ, on choisirait de poursuivre le creusement ou non, et l'option serait ouverte de sceller la structure si besoin. La reconnaissance ne s'arrêterait pas aux structures recoupées, mais couvrirait le cas échéant celles pouvant être à proximité des alvéoles. Le risque est donc couvert par conception.

L'analyse qualitative de sûreté s'est attachée à identifier quel serait le type de structure qui pourrait mettre en échec l'ensemble de ces dispositions. On a exclu l'hypothèse qu'une erreur de mesure conduise à mésestimer l'importance d'une fracture détectée à l'avancement et à ne pas prendre les mesures appropriées pour la sceller. En effet, la présence d'une structure conductrice dans cette formation, alors qu'aucune n'a jamais été identifiée jusqu'ici, constituerait un événement rare dans la construction du stockage. Elle ferait l'objet d'une attention soutenue de la part de l'exploitant du stockage comme des autorités de contrôle. L'hypothèse qu'elle puisse être insuffisamment caractérisée apparaît extrêmement peu probable dans un tel cadre.

L'analyse qualitative s'est donc focalisée sur les structures qui peuvent échapper aux techniques de détection en œuvre actuellement, depuis la surface ou depuis le fond. Elle conclut qu'il ne pourrait s'agir que d'une structure mineure présentant une extension et un rejet limités. Pour n'être pas détectée depuis la surface, avec les meilleures techniques de sismique 3D disponibles, une éventuelle structure devait avoir un rejet inférieur à 2 mètres. Pour n'être pas vue depuis le fond, elle devrait de plus être à

une distance importante de l'alvéole. On estime qu'il y aurait plus d'un mètre de garde d'argilite saine entre cette structure et l'alvéole la plus proche.

Une telle structure pourrait avoir des effets en termes de transport : elle pourrait constituer une voie de transfert privilégiée pour les radionucléides qui l'atteindraient. Outre une transmissivité plus élevée et une capacité de rétention plus faible, elle pourrait aussi constituer un chemin privilégié, mettant en cause localement la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ». Dans la mesure où elle serait suffisamment peu conductrice pour n'être pas détectée, elle ne pourrait pas avoir une influence hydraulique majeure sur l'évolution du stockage.

Le risque de présence d'une hétérogénéité non détectée près du stockage se manifesterait par une perméabilité localement augmentée. Un tel cas de figure est indirectement envisagé dans les études de sensibilité du scénario d'évolution normale, qui dégrade d'un facteur dix la perméabilité de l'ensemble de la formation, et aboutit à la conclusion qu'une telle modification n'a que peu d'influence sur l'hydraulique globale du stockage. On procédera au chapitre 7 (dans le « scénario de fonctionnement très dégradé ») à un calcul plus pénalisant encore, envisageant une perméabilité uniforme de 10^{-12} m/s. On notera qu'un tel cas de calcul envisageant une dégradation uniforme de la perméabilité de la roche a potentiellement des conséquences bien plus importantes qu'une dégradation locale.

On note enfin que la présence purement hypothétique d'une structure non détectée et dont l'influence sur les circulations dans le Callovo-Oxfordien serait importante, est couverte par un scénario d'évolution altérée. En effet, en accord avec la RFS III.2.f, la liste des SEA inclut une situation où la barrière géologique est traversée par un forage intrusif. Celui-ci est doté d'une perméabilité très forte ; il est beaucoup plus pénalisant qu'une structure qui, si elle n'est pas détectée, serait probablement en partie colmatée, d'extension faible, à une certaine distance des ouvrages.

6.2.1.2 Caractéristiques géochimiques de la formation

Du fait des faibles teneurs en eau des argilites et la faible dimension des pores, la composition des eaux porales ne peut être déterminée par analyse directe de l'eau, qui ne peut être obtenue sur échantillons carottés que par pompage ou lixiviation. La composition des eaux est évaluée par modélisation selon une méthodologie éprouvée au Mont Terri. La méthode permet de contraindre, à partir d'observations et mesures sur échantillons carottés (chlorure, pression de CO_2 , capacité d'échange cationique), un certain nombre de paramètres à l'équilibre thermodynamique. La méthodologie repose en grande partie sur l'identification des espèces et composants chimiques du système (incluant les phases minérales). Le nombre de mesures sur échantillons prélevés à pas réguliers a permis d'apprécier la variabilité verticale de diverses propriétés de l'argilite influant sur le modèle de composition des eaux de pore (teneur en eau, teneurs et concentrations totales en chlorures, phases minérales présentes et leurs caractéristiques morphologiques, teneurs en site d'échange cationique, populations de cations sorbés, activité de l'espèce H_2CO_3). L'incertitude résiduelle concerne essentiellement les concentrations en chlorures où la méthode de lixiviation appliquée sur échantillons carottés peut être perturbée par les boues de foration. Cependant, l'ensemble des mesures sur différents forages indique une très bonne cohérence : il n'existe qu'un facteur trois entre les valeurs minimales et maximales.

La composition des eaux de pores est sensible aux éventuelles variations minéralogiques susceptibles de contrôler un paramètre. Le Callovo-Oxfordien a ainsi été découpé verticalement en trois sous-unités fondées sur un renseignement détaillé de la minéralogie des argilites, notamment des interstratifiés illite-smectite (R0_A , R0_B et R1) (voir Figure 6.2-2). Compte tenu de la similitude des phases minérales entre les faciès R0_A et R0_B , la modélisation de la composition des eaux de pores ne retient qu'un seul faciès R0 . La caractérisation complète a été menée sur échantillons représentatifs des faciès R0_A et R0_B . La composition a été calculée pour un échantillon du faciès R0_B . Concernant le faciès R1 , l'influence du changement de nature de l'interstratifié (R0 vers R1) ne devrait avoir que peu d'influence, les autres hypothèses relatives au Eh, pH, constantes d'échange, étant applicables à ce faciès. Les premières analyses conduites sur site confirment cette appréciation.

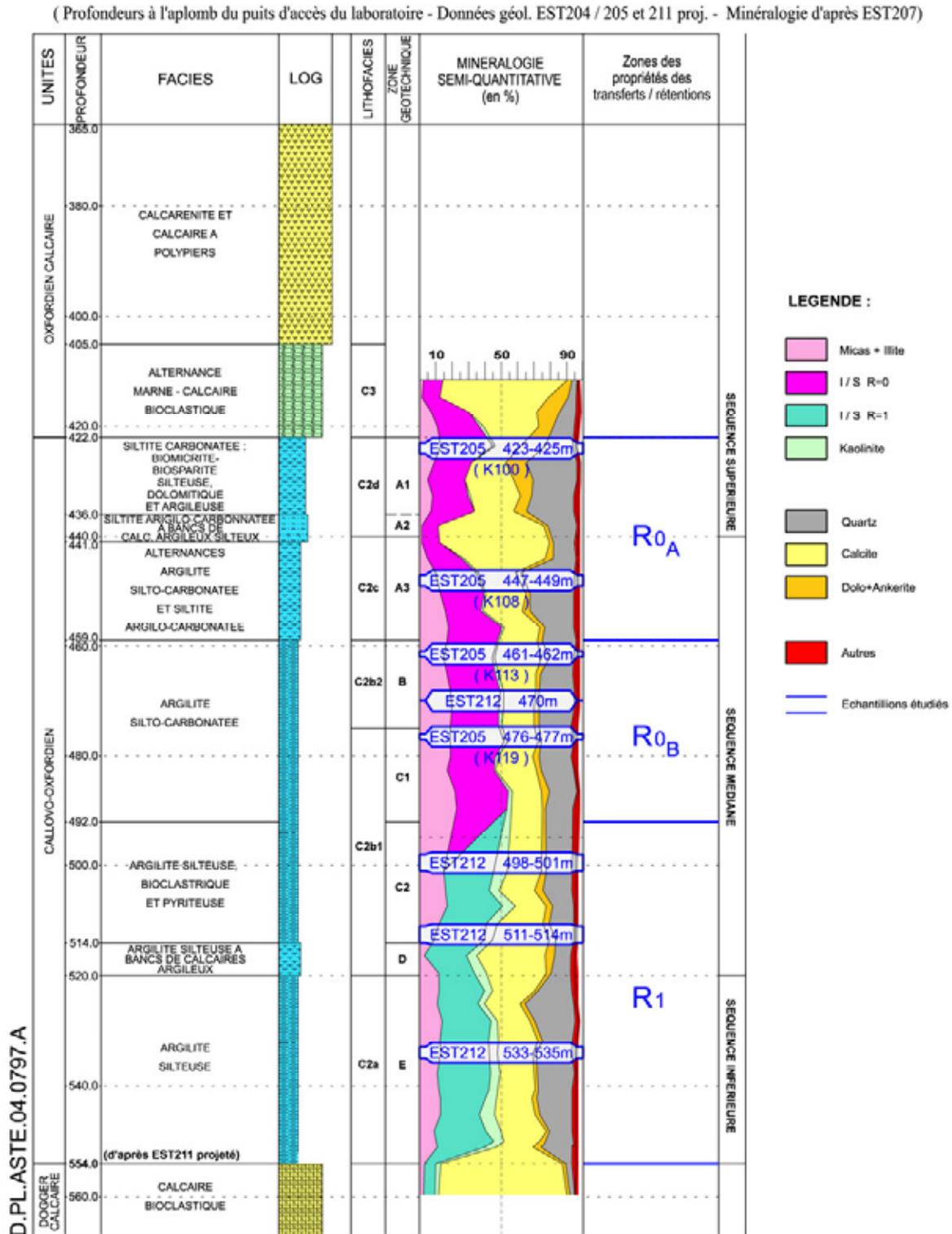


Figure 6.2-2 Variation lithologique et minéralogique verticale du Callovo-Oxfordien

Les données minéralogiques acquises sur l'ensemble des forages indiquent que les phases considérées dans les modèles thermodynamiques sont présentes et non altérées sur l'ensemble de la zone de transposition. Seules les teneurs en chlorure et la force ionique sont susceptibles de varier significativement à l'échelle de la zone de transposition. En revanche, les autres caractéristiques majeures de la composition des eaux de pore retenues pour les zones R0 et R1 devraient être applicables sur l'ensemble de la zone de transposition. Vis-à-vis des paramètres utiles au projet, qui

sont prioritairement : le pH, le potentiel Eh, la force ionique, les cations majeurs (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , et Mg^{2+}), les teneurs en chlorures (pour la corrosion), les espèces du soufre (notamment les sulfates vis-à-vis des bétons), les espèces du carbone inorganique dissous (HCO_3^-), le fer dissous et la silice dissoute, « des valeurs extrêmes⁸¹ » ont été évaluées [87]. Elles ne correspondent pas, considérées toutes ensemble, à un état d'équilibre possible du point de vue chimique, mais couvrent les incertitudes.

L'objectif de l'expérimentation PAC (prélèvement pour analyses chimiques et isotopiques), prévue dans le laboratoire souterrain, consiste à recueillir par écoulement naturel les eaux de pores dans un forage réalisé selon les méthodes les moins perturbantes possibles. Cette technique éprouvée au Mont Terri doit permettre de mesurer directement dans le forage les paramètres sensibles aux conditions environnantes (en particulier la pression partielle de CO_2) et de mesurer en ligne en système fermé les autres paramètres tels que le pH ou l'Eh. Les fluides sont recueillis selon des protocoles limitant toute perturbation et analysés. Ces analyses sont ensuite comparées aux compositions évaluées par modélisation. Un deuxième dispositif expérimental a également été mis en œuvre dans le cadre de PAC, avec pour objectif la mise à l'équilibre d'une solution avec la roche.

Les incertitudes sur les caractéristiques géochimiques de la formation sont ainsi prises en compte dans les études de dimensionnement, pour les ions d'intérêt, en fonction des « valeurs extrêmes » : « valeur extrême » de la concentration en chlorure prise en compte pour les études de corrosion, « valeur extrême » en sulfate vis-à-vis de la résistance des bétons, etc.

6.2.1.3 Gradient hydraulique dans la formation

Le gradient de charges au sein du Callovo-Oxfordien est déterminé par la mesure des charges dans les encaissants et dans la formation hôte. Les mesures effectuées sur le site 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 0,3 m/m sur la zone de transposition). Elles montrent également de manière constante une surpression du Callovo-Oxfordien par rapport aux formations qui l'encadrent (de l'ordre de 20 mètres de colonne d'eau équivalente) (voir Figure 6.2-3).

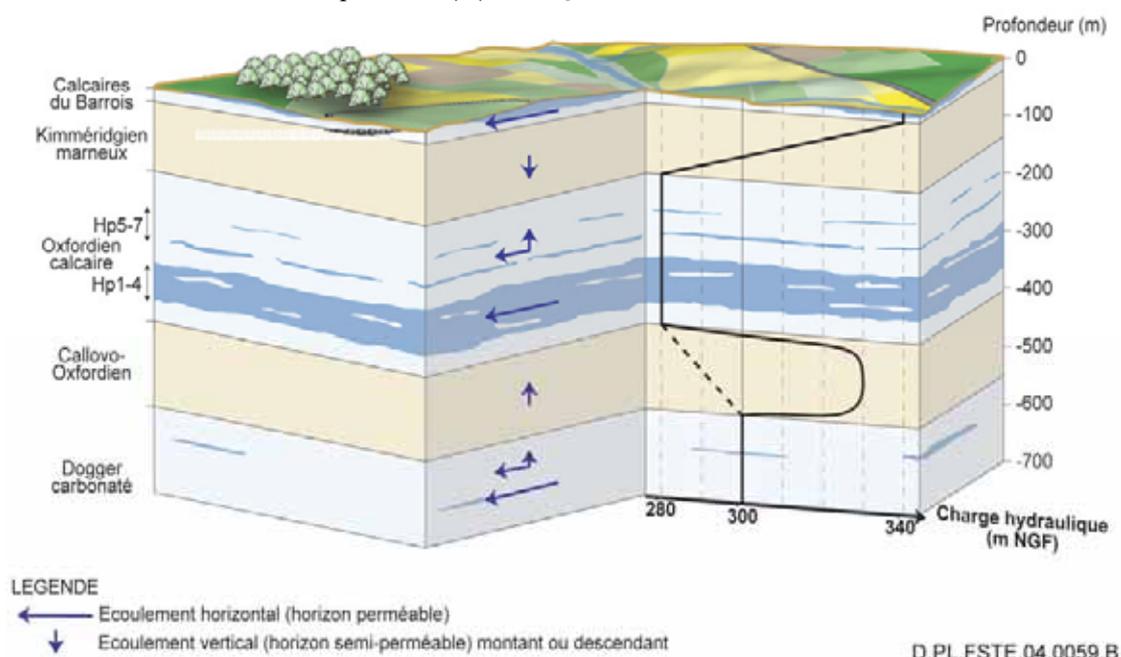


Figure 6.2-3

Représentation schématique de la charge hydraulique dans les différentes couches

⁸¹ Elles sont qualifiées d'« extrêmes » car correspondant à une « extrémité » - le minimum ou le maximum selon le cas - de l'intervalle de variation possible, et non de « conservatives », car en l'absence de la référence à un phénomène donné, il n'est pas possible de déterminer si ces valeurs sont effectivement défavorables au regard de la sûreté. Une valeur de concentration en chlorures « extrême maximale » est ainsi « conservative » au regard, par exemple, de la corrosion.

De telles surpressions sont fréquemment observées dans les formations argileuses. Elles peuvent avoir plusieurs explications, dépendantes du contexte [17]. Les principales causes a priori envisageables dans une formation telle que le Callovo-Oxfordien sont :

- une cause liée à des contraintes tectoniques brutales pour lesquelles l'eau n'a pas eu le temps de se mettre à l'équilibre avec le squelette de la roche ;
- une modification transitoire du régime de charges des encaissants, non encore équilibrée par les circulations d'eau au sein de la roche ;
- la rémanence d'une charge mécanique plus forte dans le passé, due au poids d'une colonne sédimentaire ou de glaces qui s'est érodée ou a disparu depuis, et dont la roche conserve transitoirement la trace ;
- un artefact de mesures, lié par exemple à un fluage de la roche exerçant une contrainte mécanique additionnelle, ou toute autre erreur d'interprétation des résultats ;
- une cause liée aux effets de membrane semi-perméable des argilites qui provoque une baisse de l'activité chimique de l'eau du fait de la mobilité réduite de certains solutés. Ce phénomène peut globalement s'interpréter à l'échelle macroscopique comme un phénomène osmotique.

Le Callovo-Oxfordien n'a jamais été recouvert par un glacier, ce qui exclut une modification brutale de sa charge mécanique, et donc de sa charge hydraulique, par le poids d'un tel objet.

D'autres phénomènes peuvent être écartés sur la base de leurs temps caractéristiques, au regard de celui qui serait nécessaire pour induire une surpression, réelle ou issue d'un artefact de mesure. Ainsi, les phénomènes d'érosion sont trop lents, vis-à-vis des temps caractéristiques d'équilibrage de la charge, pour permettre une telle surpression. De même, à l'échelle du temps caractéristique de mesure, une évaluation du fluage de la roche montre que celui-ci ne peut induire de telles pressions. Un artefact de mesure ne peut donc expliquer l'ampleur de la surpression mesurée.

L'hypothèse d'une persistance, au sein de la roche, d'une contrainte tectonique à laquelle l'eau porale ne se serait pas adaptée nécessite une évaluation plus détaillée. Dans cette hypothèse, la mise en charge continue du squelette solide de la roche ne permettrait pas de dissiper cette même charge sur l'eau porale : tandis que la roche se réorganise pour dissiper l'excédent de contrainte, l'eau ne peut évacuer sa pression qu'en sortant de la roche. Les vitesses de déformation estimées, de l'ordre de 10^{-17} s^{-1} , sont négligeables en terme de moteur d'une surpression.

Par ailleurs, l'hypothèse d'une persistance d'une contrainte tectonique brutale ne s'applique pas non plus. En effet, le temps caractéristique d'évacuation d'une sollicitation en pression à travers la formation étant de l'ordre de 10 000 à 100 000 ans (la diffusivité hydraulique du milieu étant de l'ordre de $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$), il faudrait faire appel à un événement tectonique récent pour expliquer ce phénomène. Or aucun événement d'une telle nature ne s'est produit dans le secteur depuis le soulèvement alpin (-23 Ma). Une telle surpression de la roche ne peut s'expliquer à elle seule, ni même majoritairement, par un événement tectonique aussi lointain.

Seul, le phénomène d'osmose semble être en mesure d'expliquer l'amplitude des surpressions mesurées. Un grand nombre d'études a évoqué l'osmose et le comportement semi-perméable des milieux argileux pour expliquer les surpressions observées dans le milieu géologique. En première approche, la surpression pourrait résulter d'un déséquilibre dans la composition en solutés de l'eau libre contenue dans la porosité de la formation hôte, qui jouerait un rôle de membrane semi-perméable par rapport aux formations encaissantes. Néanmoins, un modèle pour l'osmose dans lequel on tient compte uniquement des teneurs en solutés dans l'eau de pore (eau libre) conduit à prévoir une surpression osmotique très faible par rapport à celle qui est mesurée.

Il existe cependant d'autres processus, et d'autres populations de solutés, pour maintenir des concentrations en solutés plus élevées dans le Callovo-Oxfordien que dans ses encaissants [88]. En effet, les différentes études menées sur l'eau de pore du Callovo-Oxfordien montrent que la composition de cette solution (et donc au final, l'activité de l'eau dans les argilites) est contrôlée par :

- la compensation des excès (ou déficit) de charges des phases argileuses par des ions de charge opposée ;
- les équilibres de solubilité imposés par le cortège minéral local ;
- les flux en régime permanent d'espèces dont les teneurs ne sont pas contrôlées par les interactions fluides-roches [87].

Les différentes évaluations menées [88] montrent qu'une fraction seulement des ions compensateurs (ceux qui ne sont pas directement accolés à la surface des argiles, soit de l'ordre de 5 à 15 % environ de l'ensemble de ces ions) a un effet sur l'activité de l'eau mobile et donc sur les pressions interstitielles résultant de phénomènes osmotiques.

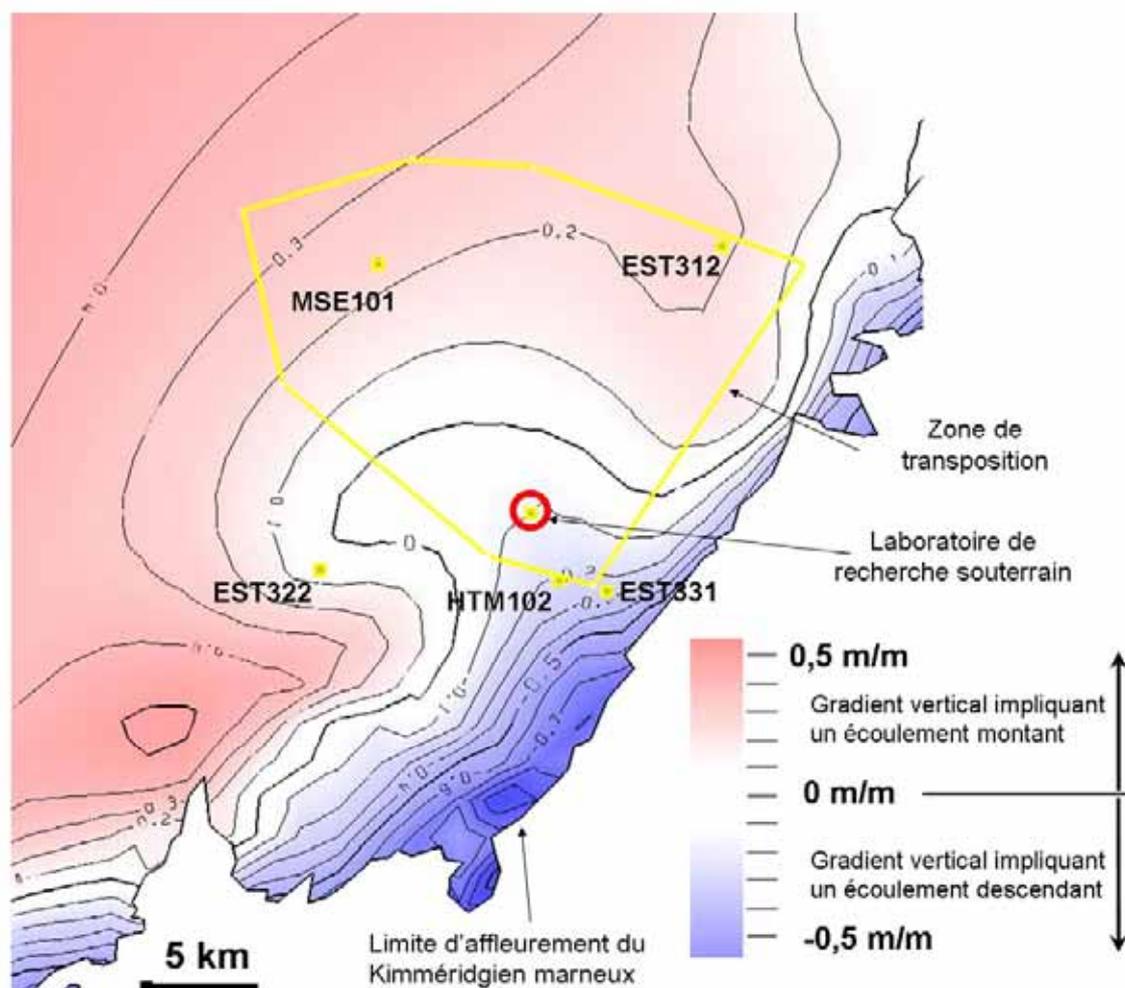
La concentration totale en solutés de l'eau porale, si on y inclut cette fraction des ions compensateurs, devient alors très supérieure à celle de l'eau de pore mobile des argilites. Si l'on considère que 15 % des ions compensateurs ont un effet sur l'activité de l'eau mobile, l'activité totale de l'eau apparaît alors nettement plus faible dans les argilites que dans les deux encaissants. Le profil de surpression osmotique calculé sur cette base est cohérent avec celui mesuré.

Selon cette explication, cette surpression s'est mise en place très tôt dans l'histoire de la couche : dès que celle-ci a acquis ses caractéristiques telles qu'elles sont observées actuellement soit il y a environ 100 millions d'années. Par la suite, le profil de cette surpression n'a évolué que faiblement, en liaison avec les modifications chimiques de l'eau dans les encaissants, jusqu'à environ -30 millions d'années. En l'absence de modifications majeures dans le système, il est resté très stable depuis cette date.

Dans la mesure où le régime d'écoulement est permanent au sein du Callovo-Oxfordien, ce phénomène d'osmose n'influence pas les écoulements puisque la somme des potentiels chimique et mécanique dans le Callovo-Oxfordien créés par l'osmose est nulle. Les perturbations induites par le creusement du stockage, puis par les différents phénomènes de remise à l'équilibre (transitoire thermique, chimique, hydraulique) n'induisent pas de déplacement massif de solutés et donc ne perturbent pas l'équilibre dû à l'osmose. Dans toutes les situations, le régime d'écoulement reste par conséquent contrôlé uniquement par les champs de charges imposés par les encaissants. Cet écoulement peut donc être représenté par une loi de Darcy basée uniquement sur les conditions aux limites hydrauliques dans les encaissants.

La charge dans l'Oxfordien varie sensiblement sur la zone de transposition, mais elle est bien contrainte et a été mesurée par de nombreux forages. Celle dans le Dogger a fait l'objet de moins de mesures, mais elle varie peu.

Aucune source d'incertitude identifiée sur la valeur du gradient n'est de nature à la remettre en cause de manière importante. Pour couvrir de telles incertitudes, on retient dans l'ensemble des évaluations une valeur correspondant, en tout point du modèle du SEN, à une gamme de gradients parmi les plus forts estimés sur la zone de transposition, soit 0,2 m/m dans le modèle actuel (voir Figure 6.2-4) et 0,4 m/m en tenant compte de la prospective à un million d'années, pour le modèle de transport vertical ascendant, et - 0,2 m/m pour le modèle de transport descendant.



Au sein de la zone de transposition, les champs de charge dans les encaissants déterminent un gradient vertical responsable d'un écoulement essentiellement montant au travers du Callovo-Oxfordien (en moyenne de 0,1 à 0,2 m/m)

Figure 6.2-4 Evaluation du gradient de charge hydraulique verticale, déduit des charges dans les encaissants, au travers du Callovo-Oxfordien

6.2.1.4 Caractéristiques hydrauliques et de transport de la formation

● La perméabilité

Les mesures de perméabilité se situent dans des gammes allant de 10^{-12} à 10^{-15} m/s. Une fois éliminées les valeurs présentant un caractère trop incertain du fait des conditions de mesure, et en se fondant prioritairement sur les mesures par sondes EPG ou équivalentes, qui sont les plus représentatives, on a pu définir avec une bonne confiance les valeurs « phénoménologiques » et « conservatives » de la perméabilité du Callovo-Oxfordien, cohérentes entre les prélèvements sur échantillons et les mesures in situ (5.10^{-14} et 5.10^{-13} m/s respectivement). Toutes les mesures de perméabilité à l'eau effectuées sur échantillons indiquent que le ratio d'anisotropie ne peut excéder 10 entre la perméabilité horizontale et la perméabilité verticale, et reste dans la fourchette d'incertitude des mesures. Ce facteur d'anisotropie est néanmoins pris en compte en augmentant la perméabilité horizontale d'un facteur 10, en SEN.

L'incertitude sur la perméabilité est couverte par une étude de sensibilité en SEN. Comme on l'a vu, ce paramètre est peu sensible en scénario d'évolution normale, le régime de transport dans la formation hôte restant diffusif tant que la perméabilité n'avoisine pas 10^{-12} m/s. Au vu des mesures réalisées, il est donc possible de conclure que l'existence d'un régime diffusif, toute choses égales par

ailleurs (c'est-à-dire sous l'hypothèse d'une efficacité des scellements) est assurée même en prenant en compte les incertitudes sur la perméabilité du Callovo-Oxfordien.

Par ailleurs, quelques diaclases ont été observées au sein de la formation hôte. Il est montré par les mesures en forage dévié que ces éléments n'ont pas d'impact sur la perméabilité du Callovo-Oxfordien. Les rares microstructures trouvées en forages sont des fentes de tension, colmatées. Vu la faible extension verticale et horizontale de ces structures et leur colmatage (par fluage ou cristallisation de calcite), leur rôle est négligeable au regard de la perméabilité d'ensemble, et couvert en tout état de cause par l'étude de sensibilité.

● Les coefficients de diffusion

Les valeurs des coefficients de diffusion proposées à ce jour résultent d'essais de diffusion au tritium, aux anions (Γ et Cl^-) et aux cations (Li^+ , Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+) menés sur des échantillons de dimension centimétrique prélevés essentiellement dans la zone R0 (partie supérieure du Callovo-Oxfordien).

Les deux sources principales d'incertitudes des valeurs de coefficient de diffusion des anions et des cations sont [88] :

- l'effet de l'hétérogénéité spatiale des propriétés de la roche. Les valeurs de coefficient de diffusion mesurées sur des échantillons provenant d'une même carotte peuvent varier ; à titre illustratif, un ensemble de 13 mesures de coefficient de diffusion pour le tritium a été réalisé sur plusieurs échantillons provenant d'une même carotte. La valeur moyenne obtenue est de $2,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ avec un écart type de $4,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;
- d'origine purement expérimentale, observée lors d'une série de répliques de la même mesure sur un même échantillon.

Globalement les valeurs moyennes de coefficient de diffusion calculées à partir des différentes mesures réalisées sur échantillons présentent des incertitudes de l'ordre de 30 à 40 %.

Par ailleurs :

- pour les anions, la force ionique de l'eau de pore, qui présente des incertitudes, semble avoir un effet sur les valeurs de coefficient de diffusion effectif des anions (coefficient de diffusion d'autant plus fort que la force ionique est élevée) ;
- pour les cations, on constate l'existence d'un mécanisme qui induit une augmentation du coefficient de diffusion des cations sorbés. Ainsi, il est observé des coefficients de diffusion pour le césium (cation le plus sorbé dans les argilites parmi les cinq étudiés) dix fois supérieurs à ceux du tritium.

La majorité des résultats de mesure provenant de la zone R0 (partie supérieure du Callovo-Oxfordien), des incertitudes pourraient exister sur l'extrapolation des données acquises dans la zone R0 aux valeurs de coefficient de diffusion dans la zone R1 (partie inférieure). Néanmoins, compte tenu de la relative homogénéité de la porosité et de la composition minéralogique des zones R1 et R0, aucun élément ne laisse penser que les coefficients de diffusion seraient significativement différents d'une zone à l'autre. Les premiers résultats obtenus sur le laboratoire, pour les anions, dans la partie basale du Callovo-Oxfordien confirment bien cette tendance. Les coefficients de diffusion effective (D_e) obtenus pour le chlore sur trois échantillons du faciès R1 du forage Est 212 se situent dans la même gamme de valeur que ceux obtenus pour le faciès R0_A ou R0_B. De même, les valeurs obtenues pour l'eau tritiée ne montrent aucune corrélation avec le faciès minéralogique.

L'objectif général du programme expérimental de l'expérience DIR, prévue au sein du laboratoire de Meuse / Haute-Marne, est de vérifier la justesse, pour des conditions in situ et à des échelles spatiales de temps plus étendues, des valeurs de paramètres de diffusion et de rétention chimique déterminées en laboratoire de surface sur des échantillons de petite taille. Cet objectif doit être atteint pour trois types de comportement : la diffusion de solutés inertes (HTO), la diffusion de solutés influencés par l'exclusion anionique (chlorure, iodure, bromure), la diffusion d'espèces subissant une rétention chimique significative (sodium, césium, lithium...). Ces essais seront conduits pour trois faciès de l'argilite : i) le faciès R0, ii) le faciès R1, et iii) des phases plus carbonatées.

Les valeurs de coefficient retenues pour le calcul de référence du SEN sont des valeurs phénoménologiques correspondant aux valeurs moyennes des mesures effectuées pour :

- les anions avec une solution présentant une force ionique de 0,1M (située au milieu de la gamme d'incertitudes) ;
- le césium présentant les valeurs les plus élevées des coefficients de diffusion des cations.

On a donc retenu 5.10^{-12} m²/s pour les anions et $2,5.10^{-10}$ m²/s pour les cations.

L'effet des incertitudes sur les valeurs de coefficients de diffusion est évalué en scénario d'évolution normale par des études de sensibilité dans lesquelles on considère des valeurs conservatives pour les anions et les cations égales à deux fois la valeur de référence. Ces valeurs sont supérieures ou équivalentes aux valeurs maximales de coefficient de diffusion mesurées et couvrent également les incertitudes relatives à la force ionique de l'eau (ayant un effet sur le coefficient de diffusion des anions). Cette étude, intégrée à une analyse de sensibilité plus générale sur la géochimie du Callovo-Oxfordien et de l'argile gonflante, montre que la modification des valeurs a une influence modérée sur les temps de transfert des anions, mais peu d'influence sur le niveau de l'impact. Cette incertitude est donc couverte par le SEN.

● **La porosité**

Il convient de distinguer la porosité accessible, paramètre qui conditionne la diffusion respectivement des cations et des anions, et la porosité cinématique, c'est-à-dire la porosité associée à l'eau mobilisable par un gradient de charges (donc à la convection).

La porosité accessible a été déterminée à partir des différentes expériences de diffusion d'eau tritiée, d'anions et de cations. Ces valeurs sont sujettes à des incertitudes significatives, en particulier pour les cations, dont les deux sources principales sont :

- l'effet de l'hétérogénéité spatiale des propriétés de la roche à l'échelle de l'échantillon,
- une origine purement expérimentale.

Pour les anions, les résultats expérimentaux donnent des valeurs de porosité accessible qui varient de 4 à 7 %. Pour les cations, compte tenu des incertitudes expérimentales, c'est la valeur de porosité totale qui est retenue. Celle-ci varie de 10 à 21 %.

Dans le SEN, les valeurs de porosité accessibles utilisées correspondent à 5 % (valeur issue de la moyenne des valeurs obtenues sur les chlorures) et pour les cations de 18 % (valeur moyenne de la porosité totale mesurée). L'étude de sensibilité effectuée en SEN sur la géochimie du Callovo-Oxfordien prend en compte des valeurs plus faibles pour les anions, pour privilégier leur vitesse car ce sont eux qui présentent les temps de transfert les plus rapides. Les cations étant sujets à des phénomènes de sorption forts, leur temps de transfert est moins influencé par la porosité. On a retenu dans leur cas une sensibilité vers une valeur de porosité plus forte, pour augmenter les flux. Concernant la porosité cinématique (porosité associée à l'eau mobilisable par un gradient de pression), la valeur retenue en SEN suppose que 50 % de l'eau est sous forme liée, ce qui est une hypothèse pénalisante pour les argilites, mais qui couvre les incertitudes.

Les incertitudes sur la porosité des argilites sont largement couvertes en scénario d'évolution normale, à la fois en référence et dans les études de sensibilité.

● **Les propriétés de solubilité et de sorption**

Les valeurs de solubilité des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien ont été déduites de calculs d'équilibre, effectués avec la base de données thermodynamiques ThermoChimie v5., suivant une démarche d'analyse de sensibilité. Ces calculs considèrent les conditions aqueuses jugées les plus représentatives et tiennent compte du solide dont la stabilité est la mieux établie.

Des valeurs conservatives sont définies en considérant des conditions aqueuses extrêmes, ou en retenant dans les calculs le produit de solubilité le plus élevé pour le solide de référence, ou par rapport aux mesures les plus grandes disponibles dans la littérature ou par les programmes de

recherche menés par l'Andra. Ces valeurs ont été prises en considération dans les études de sensibilité du SEN.

Le modèle de sorption des radioéléments retenu est fondé sur un modèle d'isotherme d'adsorption linéaire (Kd constant). Les Kd ont été évalués pour 30 éléments [71]. Ils ont été estimés :

- soit à partir d'études expérimentales menées sur des échantillons du Callovo-Oxfordien. Les incertitudes sur la composition interstitielle sont prises en compte par la matrice d'expérience définie pour chaque radionucléide. Elle rend compte de la sensibilité du Kd à la variabilité des conditions aqueuses et couvre l'ensemble des conditions possibles en terme de composition d'eau à l'équilibre avec la roche non perturbée. Dans le SEN, ce sont les valeurs de Kd les plus faibles qui ont été retenues en référence quand il y avait une différence entre les Kd mesurés sur deux échantillons ;
- soit par défaut, quand aucune donnée expérimentale n'était disponible, à partir d'analogies par études mécanistiques réalisées sur des pôles purs argileux (smectites et illites) ou avec l'argile à Opalinus.

L'ensemble des incertitudes sur les valeurs de Kd liées tant à leur mesure dans le cadre du programme expérimental qu'à la notion même de Kd qui représente à l'échelle de la roche des mécanismes de sorption complexes à l'échelle microscopique, est pris en compte dans le SEN par des valeurs « phénoménologiques » et par l'étude de sensibilité utilisant des valeurs de Kd conservatives, définies aux bornes du domaine expérimental, à partir de données issues des argiles à Opalinus, ou fixées arbitrairement à des valeurs pénalisantes (nulles ou très basses).

6.2.1.5 Synthèse sur les incertitudes relatives à la formation hôte

L'état des connaissances sur le milieu géologique a permis de retenir des paramètres « phénoménologiques » pour sa représentation en vue du calcul de performances. Ces valeurs apparaissent robustes au regard des incertitudes résiduelles à ce stade du programme d'investigations.

Des incertitudes sont néanmoins inévitables sur ce type de paramètre. Elles ont été couvertes :

- par une étude de sensibilité sur la perméabilité du Callovo-Oxfordien, augmentée d'un facteur 10 ;
- par une étude de sensibilité groupée sur l'ensemble des paramètres liés à la géochimie : coefficient de diffusion, porosité, Kd, solubilités conservatifs.

Cela permet de prendre en compte notamment les indéterminations liées :

- aux techniques de mesures sur échantillon ;
- aux limites du programme de caractérisation de la roche au regard de son extension ;
- à la représentation des phénomènes de sorption pas le biais d'un coefficient Kd ;
- au rôle hydraulique de potentielles diaclases ;
- à l'éventuelle présence de structures mineures non détectées.

On notera que la dernière incertitude est de plus couverte en SEA par une situation de forage dans une alvéole.

Par ailleurs, les études de sensibilité du SEN ont montré que les incertitudes sur la perméabilité ne pouvaient mettre en cause la prédominance du régime diffusif, même avec un gradient fort de 0,4 m/m ascendant. A titre de précaution complémentaire, on étudiera spécifiquement l'influence du gradient de charges, en testant une valeur supérieure à celles qui ont pu être mesurées ou prévues par les modèles, dans les situations où la convection est susceptible de devenir dominante dans les ouvrages (en scénario d'évolution altérée « défaut de scellements », voir chapitre 7).

6.2.2 Incertitudes sur la connaissance du milieu géologique : les formations encaissantes

Rappelons que les encaissants, supérieurs et inférieurs, n'ont pas à assurer de fonction de sûreté. Les incertitudes dont ils font l'objet doivent être mises en relation avec les enjeux au regard de la sûreté ; elles n'affectent pas directement une performance du système de stockage, celui-ci s'arrêtant à la formation hôte. Les encaissants n'interviennent dans les évaluations qu'au titre de voie de transfert des radionucléides vers la surface, ce sont en premier lieu leur représentation globale dans le scénario d'évolution normale, ainsi que les paramètres relatifs au transport (convectif et diffusif) qui sont importants, ainsi que leur évolution dans le temps (géodynamique). Aucune propriété de rétention chimique ne leur est affectée, leur géochimie ne présente donc pas la même importance que celle du Callovo-Oxfordien, au regard de la sûreté.

Subsidiairement, on note que leurs caractéristiques en tant qu'aquifères sont importantes pour le choix d'exutoires du scénario d'évolution normale. C'est en fonction des possibles ressources en eau dans les encaissants qu'est définie la position des pompes qui alimentent le groupe critique hypothétique, utilisé en vue des calculs de dose.

6.2.2.1 Caractérisations des failles/fractures dans les encaissants

Selon leurs extensions et rejets, trois échelles principales de fracturation sont susceptibles d'être présentes sur le secteur de la Meuse / Haute Marne (voir Figure 6.2-5).

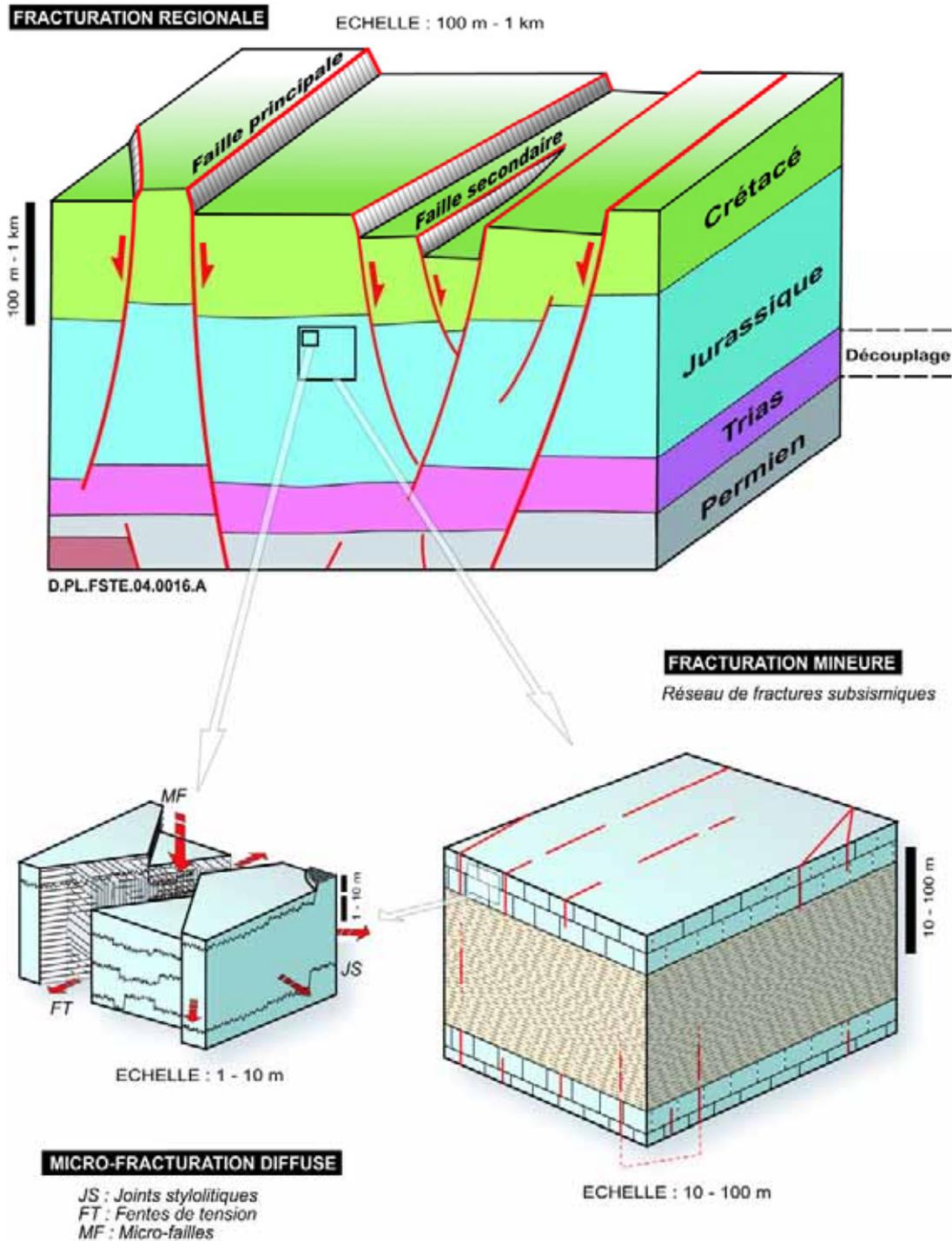


Figure 6.2-5 Différentes échelles de fracturation

● Les fracturations majeures

Les fracturations majeures ont été précisées à partir de données de cartographie géologique et structurale ainsi que de profils sismiques 2D (et bloc sismique 3D). Elles ont permis de positionner les failles en X et Y avec une précision décimétrique. Elles mettent en évidence à l'échelle du secteur deux grandes familles de structures (les structures de la Marne et de Poissons (N140 à N160°E) et les fossés de Gondrecourt et de Joinville (N40°E)).

A l'échelle du site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne, aucune faille majeure n'est mise en évidence dans les formations sus-jacentes. Il n'y a pas d'incertitude à ce sujet.

Au sud du site, il est mis en évidence une série de failles de direction N140°-150°E à rejets verticaux décimétriques et montrant un espacement kilométrique.

Au nord de cette zone, et à l'échelle de plusieurs kilomètres autour du site, les données de cartographie, de géophysique sismique et les corrélations entre forages ne permettent pas d'envisager de faille de rejet vertical supérieur à 5 mètres.

● **Les fracturations mineures**

On désigne par ce terme d'éventuelles structures de rejet vertical inférieur ou proches de 5 mètres, qui pourraient n'être pas identifiées par la sismique 2D classique.

L'interprétation de la sismique 3D acquise sur le site en 1999, sur un périmètre de 4 kilomètres carrés, retraitée en 2003 et donnant accès à une résolution de 3 mètres pour le rejet vertical, n'a mis en évidence aucune structure de ce type, ni dans la couche du Callovo-Oxfordien ni dans les encaissants supérieurs [17]. Ces constatations ont été confirmées par les forages de reconnaissance de la formation [89].

Du fait de l'absence de détection d'une telle structure, il n'est pas possible d'évaluer cette fracturation et ses conséquences de façon déterministe. L'approche se fait par analogie avec les éléments structuraux de taille différente : une structure mineure éventuellement non détectée aurait vraisemblablement un rejet vertical de l'ordre de 2 mètres au plus, et se trouverait vraisemblablement dans l'environnement d'une fracture majeure. C'est ce constat qui a conduit à définir la « zone de fracturation diffuse », dans l'environnement proche des failles de la Marne, pour rendre compte de la plus forte perméabilité de l'Oxfordien à cet endroit (voir paragraphe suivant).

De telles structures auraient en tout état de cause des rejets verticaux insuffisants pour mettre en regard des formations aux propriétés hydrauliques différentes [72]. Divers indices convergents montrent que la présence de telles structures ne serait a priori pas compatible avec les données recueillies.

● **Les microfracturations**

Des objets tectoniques de petite dimension sont susceptibles de se trouver dans l'ensemble des formations du site : diaclases, microfailles, fentes de tension, joints stylolitiques tectoniques [17].

La caractérisation des microstructures présentes dans le secteur repose sur les études de forages et la cartographie de surface, complétées par des observations réalisées lors du suivi du fonçage des puits d'accès du laboratoire souterrain. Les diaclases apparaissent globalement comme les structures les plus fréquentes. Deux familles principales de diaclases sub-verticales ressortent sur le secteur et son environnement proche : N°30°-50°E et N130°-150°E. Ces directions sont cohérentes avec celles des grands accidents tectoniques. Si ces structures peuvent être relativement bien connectées à l'affleurement, elles sont en général colmatées dans les encaissants supérieurs et inférieurs, dès que la profondeur est suffisante. Lors du creusement des puits du laboratoire, ceux-ci n'ont recoupé que deux structures dans l'Oxfordien présentant des suintements.

6.2.2.2 Modèle de représentation des encaissants

Si on considère l'Oxfordien calcaire dans son ensemble, sa transmissivité globale évolue peu dans la zone de transposition : les variations principales concernent la répartition des débits de production d'un point à un autre. La représentation d'horizons poreux individualisés (Hp1-Hp4 et Hp5-Hp7) correspond aux observations pratiquées sur le site du laboratoire, mais ils ne peuvent être corrélés avec les niveaux producteurs de l'ensemble des autres forages [17]. L'étude par diagraphie des forages de 2003 montre que ces horizons poreux seraient plutôt développés dans la partie nord-est et centrale du secteur [72].

Le choix du scénario d'évolution normale est donc conservatif car l'on considère que ces horizons sont continus sur le secteur d'un point de vue sédimentologique alors que les diagraphies montrent à ce jour une disparition vers l'ouest.

Pareillement, le modèle représente dans le Dogger des horizons plus transmissifs, afin de prendre en compte des variations constatées au sein du Bathonien supérieur.

Pour ce qui relève de la perméabilité des encaissants dans leur ensemble, les données ont été acquises par des mesures sur cuttings issus des différents forages réalisés, des essais de pompage en forage ont été complétés par les mesures en puits lors du creusement des ouvrages d'accès du laboratoire. Les perméabilités globales en forage sont très cohérentes, aussi bien pour le Dogger que pour l'Oxfordien, et varient dans des intervalles restreints. Un seul forage fait exception (EST 322), qui montre une perméabilité plus forte. Elle correspond à la traversée dans l'Oxfordien d'une fracture ouverte, dont la perméabilité a été évaluée sur la base d'un pompage de courte durée, ce qui conduit à la majorer. Ce point singulier est pris en compte dans le scénario d'évolution normale en définissant une hypothétique « zone de fracturation diffuse » incluant ce point, dans la proximité immédiate des failles de Poissons, Joinville et de la Marne, en dehors de la zone de transposition.

Les incertitudes sur les perméabilités des encaissants sont ainsi entièrement prises en compte dans le modèle de référence du SEN.

Les porosités totales ont été estimées à partir de mesures réalisées sur échantillons carottés et sur cuttings prélevés sur différents forages effectués dans le secteur de Meuse / Haute Marne. La porosité cinématique, c'est-à-dire celle effectivement connectée et correspondant au volume de vide où l'eau peut circuler sous l'effet d'un gradient de charge, est évaluée comme une fraction de la porosité totale. Elle a été définie à partir d'essais de traçage dans l'Oxfordien calcaire, et a été extrapolée pour les formations sus-jacentes, pour lesquelles aucune mesure n'existe. Notons que la porosité cinématique influe directement sur les temps de transfert des radionucléides depuis la formation hôte jusqu'aux exutoires. En effet, la vitesse moyenne de l'eau, vecteur de transport des radionucléides par convection chimique est inversement proportionnelle à la porosité cinématique. Dans la mesure où les encaissants ne présentent pas de fonctions de sûreté et ne sont représentés que pour le calcul de la dose engagée aux exutoires potentiels, le choix a été de retenir parmi les données disponibles des valeurs qui tendent à réduire le temps de transfert jusqu'aux exutoires. La stratégie de gestion des incertitudes a alors consisté à retenir des valeurs faibles de porosité totales, donc a fortiori de porosité cinématique, dans les gammes basses de échantillons disponibles, afin de ne pas surestimer les temps de transfert des radionucléides dans les encaissants depuis leur sortie du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires potentiels. La même stratégie a été appliquée à la porosité dans le Dogger.

Concernant la diffusion, seules quelques données de coefficients de diffusion existent résultant d'analyses ponctuelles menées dans l'Oxfordien calcaire. Les valeurs de coefficients de diffusion obtenues par ces mesures varient entre 10^{-12} m²/s et 10^{-10} m²/s. Il reste néanmoins des incertitudes quant à l'extrapolation de ces données à l'échelle de l'Oxfordien calcaire, du fait de la variabilité de son faciès sur le secteur. Compte tenu de ces incertitudes, il a été retenu dans le scénario d'évolution normale des valeurs de coefficient de diffusion pénalisantes vis-à-vis de la diffusion (correspondant à la diffusion d'une molécule d'eau dans de l'eau). Des calculs de sensibilité (voir chapitre 5) ont montré que l'hypothèse consistant à prendre des coefficients de diffusion plus faibles dans l'Oxfordien basal et dans le Kimméridgien conduisait à un impact inférieur.

La même stratégie (coefficient pénalisant de l'eau dans l'eau) a été adoptée pour le Dogger, pour lequel aucune mesure n'a été réalisée sur site.

Concernant la dispersivité, quelques données sont actuellement disponibles dans les formations calcaires de l'Oxfordien. La dispersivité longitudinale est estimée à 200 mètres et la dispersivité transversale est estimée à 20 mètres. Dans le SEN, ce sont ces valeurs qui sont retenues. Elles sont proches de celle des rapports de dispersivités mentionnés dans la bibliographie. Pour les autres formations, la valeur retenue se fonde uniquement sur des données bibliographiques pour ce type de formation. Néanmoins, l'effet des incertitudes associées à la dispersivité dans les encaissants est limité du fait de l'étalement déjà important en temps et en espace du débit d'activité arrivant dans les encaissants, et des faibles distances de parcours jusqu'à l'exutoire conventionnel à la Saulx. Ce paramètre apparaît donc de peu d'influence sur la représentation du scénario d'évolution normale.

6.2.2.3 Écoulements à l'échelle du secteur

Les écoulements à l'échelle du secteur dans les formations calcaires de l'Oxfordien ont été caractérisés à partir des mesures de charge dans différents forages effectués sur le secteur.

La construction du modèle hydrogéologique de secteur repose en premier lieu sur une vision en trois dimensions du Bassin de Paris dans son ensemble puis du secteur de Meuse / Haute-Marne. Il part de l'hypothèse que la perméabilité actuelle des formations dépend de leurs faciès (nature et arrangement des minéraux suivant les modes de dépôt) et de leur histoire.

Le modèle comprend une première étape de reconstruction des différents faciès en fonction de l'historique. Cette étape conduit à la génération de cartes de faciès pour chaque niveau stratigraphique (soit 147 niveaux) avec leur épaisseur, permettant d'estimer la variation de porosité en fonction de l'évolution des faciès, puis leur perméabilité à partir de corrélations.

La deuxième étape consiste à réduire le nombre de niveaux pour permettre les calculs d'écoulement (en passant de 147 à 27). Les perméabilités sont moyennées dans chaque couche. Une vérification est menée en comparant les résultats des calculs avec des données disponibles dans le bassin de Paris (en l'occurrence les trois aquifères utilisés dans la zone proche de Paris). Elle a conclu à la bonne cohérence du modèle.

Le modèle est ensuite comparé avec les études détaillées menées sur le secteur de Meuse / Haute-Marne. Elles comprennent des mesures obtenues en forage et sur échantillons. Pour être représentatif de la réalité des mesures obtenues sur le site, ce sont les valeurs phénoménologiques qui sont retenues.

En ce qui concerne l'Oxfordien calcaire, la cohérence des résultats de mesures sur échantillons et en forage conduit à une faible incertitude, qui apparaît uniquement liée à la marge d'erreur de la mesure de la perméabilité et de la corrélation du flux avec la perméabilité. Elle est autour d'un ordre de grandeur, atténuée par la gamme de valeurs mesurées qui n'est pas très large.

La modélisation montre dans la partie Nord du secteur une direction d'écoulement nord - nord ouest à nord ouest, et au sud des forages EST 351 et EST 331 des écoulements orientés plutôt vers l'ouest, conformes aux observations. Du point de vue de l'hydrodynamique, le modèle reproduit bien les données mesurées sur le secteur.

L'influence des fractures régionales et de leur environnement immédiat est plus difficile à établir, du fait de difficultés liées à la modélisation numérique. Dans le modèle, seules les grandes failles (failles de la Marne et de Poissons) semblent avoir une influence.

Afin de couvrir cette incertitude, la zone de fracturation diffuse hypothétique a été définie en amont des failles de la Marne, et l'exutoire du modèle utilisé en SEN placé juste en amont de cette zone. Le calcul de dose est effectué en « rabattant » les radionucléides circulant dans l'Oxfordien vers un pompage, sans tenir compte des directions d'écoulement.

Pour ce qui concerne le Dogger, à l'échelle du secteur, le sens de l'écoulement, orienté vers la direction ouest – sud ouest, a été caractérisé à partir de différents forages EST 312, EST 322, EST 342, EST 210 et deux autres forages captant le Bathonien (HTM 102 et MSE 101). Le champ de charges actuel du Dogger a été déduit des différentes mesures réalisées en forage autour de la zone de transposition et sur le site. Les incertitudes sur les mesures des charges du Dogger sont estimées à 1 mètre et jusqu'à 4 mètres pour les forages artésiens. Le gradient hydraulique en amont du site est estimé plus faible (0,6 ‰ ou inférieur à 1 ‰) que celui en aval du site (0,2 ‰). Étant donné les faibles gradients mesurés sur le site et en amont, et le nombre de points de mesure, les incertitudes principales portent sur la direction réelle des écoulements en aval. Dans le SEN, cette incertitude est gérée en prenant en compte pour les calculs la direction conduisant à l'exutoire conventionnel retenu, et en dirigeant conventionnellement l'ensemble des flux convectifs dans cette direction.

Globalement, il apparaît que les incertitudes sur les directions et vitesses d'écoulement dans les encaissants sont couvertes par :

- dans les encaissants supérieurs, une modélisation en bon accord avec les mesures par traceur, et la définition d'une zone de fracturation diffuse hypothétique, dans laquelle est placé un pompage, ce qui permet de s'affranchir des écoulements en aval ;
- un « forçage » des écoulements dans la direction la plus proche de l'exutoire pour le Dogger.

6.2.2.4 Présence de ressources en eau

En ce qui concerne le Kimméridgien, quand ce dernier est quasi-affleurant aux alentours du site du laboratoire, environ un tiers des forages traversant cette formation a, soit eu des pertes d'eau totales ou partielles, soit rencontré des petites venues d'eau, notamment dans un banc calcaire situé 15 à 20 mètres sous le toit. L'incertitude sur l'origine de ces venues d'eau est prise en compte par un des exutoires qui couvre la possibilité d'un pompage réalisé à terme dans le Kimméridgien karstifié (à l'affleurement).

Vis-à-vis de l'Oxfordien, la stratégie adoptée a été de retenir toutes les ressources en eau identifiées, même si elles étaient profondes ou peu productrices, à condition que leur exploitation n'apparaisse pas par trop invraisemblable. Cela conduit notamment à :

- retenir systématiquement des forages comme exutoires, au détriment de l'utilisation directe des cours d'eau, pourtant plus probable. Les forages diluent moins la radioactivité et peuvent être placés plus près du site que les cours d'eau ;
- considérer un forage d'exploitation d'eau juste en amont de la zone de fracturation diffuse, sur toute la hauteur de l'Oxfordien, pour couvrir le cas où les aquifères de surface ne seraient pas jugés propres à la consommation d'eau de boisson.

Le Dogger ne présente pas d'exutoire vraisemblable à l'échelle de la zone étudiée. Afin d'interrompre néanmoins les écoulements dans le Dogger et de les prendre en compte dans le calcul d'impact, à titre purement spéculatif, on a retenu un forage au même emplacement que celui placé dans la « zone de fracturation diffuse » de l'Oxfordien. Ce choix est en grande partie conventionnel.

6.2.2.5 Synthèse sur les incertitudes relatives aux formations encaissantes

Le modèle retenu en scénario d'évolution normale, en référence, et les études de sensibilités effectuées autour de ce modèle couvrent les incertitudes sur :

- la caractérisation des propriétés, en termes de perméabilité, porosité, coefficient de diffusion ;
- la direction des écoulements dans le Dogger ;
- l'extension latérale des aquifères.

Par ailleurs, certaines incertitudes non formellement couvertes, du fait de l'impossibilité à définir dans l'absolu des configurations dont il puisse être démontré qu'elles sont pénalisantes, sont également prises en compte :

- pour ce qui concerne la dispersivité, bien que des valeurs conservatives soient difficiles à déterminer, ce paramètre apparaît de second ordre au regard des distances de transfert ;
- le calage du modèle hydrogéologique permet d'obtenir des temps de transfert cohérents avec l'ensemble des mesures de traceurs effectuées sur le site. Les directions d'écoulement s'avèrent de plus en plus sensibles à des variations dans les hypothèses.

Enfin, de manière plus globale, les incertitudes de toute nature sur le transfert dans les formations encaissantes sont couvertes par un choix d'exutoires très proches du site, minimisant les temps de transfert dans les formations encaissantes par rapport aux durées de résidence dans la formation hôte (un facteur au moins 5 de différence), et le choix d'exutoires profonds plus pénalisants que ceux suggérés par la RFS III.2.f.

6.2.3 Incertitudes sur la modélisation de la biosphère

On a vu au chapitre 5 comment a été définie la biosphère. Celle-ci repose sur un certain nombre d'hypothèses, dont plusieurs sont purement conventionnelles, notamment le choix d'habitudes de vie similaires aux nôtres pour les populations vivant dans un lointain avenir. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une incertitude, dans la mesure où c'est le seul choix raisonnable pour évaluer la dose. On ne cherche pas non plus à reproduire avec une grande précision tous les types de comportement humain possibles, mais on retient des hypothèses moyennes correspondant à une population-type considérée comme stable dans le temps. Cette population-type est en revanche choisie de manière conservative vis-à-vis de son exposition parmi celles qu'il est possible de choisir a priori.

Une fois posé ce cadre, les incertitudes sur la biosphère se ramènent donc :

- au choix du groupe critique, parmi ceux qui sont possibles compte tenu de son caractère conventionnel et des caractéristiques du site, notamment climatiques ;
- à la quantification des facteurs de transfert des éléments dans la biosphère.

On rappelle que le calcul de dose ne sert qu'à vérifier la conformité aux objectifs de radioprotection, afin de porter une appréciation sur la sûreté d'ensemble du stockage. La démarche de sûreté de l'Andra est une démarche d'optimisation sous contrainte, conforme aux recommandations de la CIPR, qui cherche à réduire l'impact autant que possible, sans référence à un seuil a priori. Ainsi, une incertitude sur le calcul de dose, même d'un facteur significatif, n'a pas de conséquence pratique en terme de dimensionnement du stockage, mais peut uniquement influencer l'appréciation finale de l'impact. Quel que soit le résultat du calcul, les meilleures options techniques raisonnables sont mises en œuvre pour réduire l'impact.

On s'intéresse uniquement aux incertitudes portant sur le calcul du facteur de dose du radionucléide qui domine l'impact, en l'occurrence l'iode 129. On mentionne également autant que nécessaire les incertitudes qui concernent le chlore 36 ou le sélénium 79, sachant que même un facteur 10 ou plus d'incertitude sur la dose qui leur est associée n'aurait pas d'influence sur le résultat de l'analyse de sûreté.

Les paramètres liés à la biosphère font appel à deux types de données. Certains sont relatifs au site (climat, sols, habitudes de vie), mais indépendants du radionucléide ou toxique chimique considéré. D'autres sont dépendants de l'espèce chimique en question : ils caractérisent les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui permettent le transfert des éléments.

6.2.3.1 Choix du groupe critique et des paramètres de site (climat, sols, habitudes de vie)

On a vu que le choix avait été fait d'une biosphère tempérée, stable dans le temps. Si un climat de type « froid » régnait sur le site, en effet, le groupe d'agriculteurs défini dans un contexte de biosphère tempérée continuerait d'être le groupe critique le plus pénalisant, mais il serait bien moins probable dans un tel contexte. Des modes de comportement de pasteurs semi-nomades, plus réalistes en climat glaciaire, conduiraient à des doses inférieures [73].

Différents groupes de référence ont été envisagés par l'Andra. Dans l'absolu, le choix du groupe qui peut conduire à la dose la plus importante dépend du radionucléide étudié. Ont été envisagés successivement :

- des éleveurs de bœufs et de vaches laitières,
- des éleveurs d'ovins,
- des éleveurs de porcs,
- des éleveurs de volailles,
- des producteurs de céréales,
- des chasseurs/cueilleurs.

La principale différence entre ces groupes est qu'ils consomment préférentiellement la production dont ils se sont fait une spécialité et qu'ils sont autarciques pour le produit en question. Une combinaison de ces groupes, représentant un agriculteur vivant pour l'essentiel de ses cultures, a été retenue parce qu'elle regroupe le plus grand nombre de voies d'exposition pertinentes.

Les études de sensibilité et l'évaluation de l'incertitude montrent qu'un changement de groupe critique, et notamment d'habitudes alimentaires, n'occasionne qu'une variation d'un facteur au plus 1,5 sur l'iode 129 par exemple. Elle est de 2,1 sur le sélénium 79 et de 3 sur le chlore 36.

Par ailleurs, si on décide de considérer une autarcie totale pour l'agriculteur, situation jamais observée dans la pratique mais majorante pour l'impact, la dose due à l'iode 129 ne change pas, celle due au chlore 36 est multipliée par un facteur 2,6 et celle due au sélénium 79 un facteur 2,1.

Cette grande stabilité du facteur de conversion biosphère de l'iode 129 est due à l'impact dominant de la voie de contamination par l'eau de boisson. Il est donc peu dépendant du choix des autres compartiments et des habitudes alimentaires.

On rappelle par ailleurs que l'individu critique est un adulte, les enfants ayant fait l'objet d'évaluations qui ont montré qu'ils étaient soumis à un impact moindre du fait de leur ration alimentaire.

6.2.3.2 Incertitudes globales sur le facteur de conversion biosphère

Des études de sensibilité ont été conduites pour caractériser la variation de l'impact en fonction des valeurs de facteurs de transfert entre les différents compartiments de la biosphère [75].

Il en ressort que l'iode est particulièrement peu sensible à ce type de paramètres. Cela est dû, comme dans le cas de la sensibilité au groupe critique, à la simplicité de la chaîne de contamination (l'eau de boisson majoritairement).

L'incertitude maximale, prenant en compte l'ensemble des variations possibles (habitudes du groupe critique, paramètres de transfert) et intégrant une incertitude sur la consommation de l'eau, ne fournit en définitive qu'une incertitude globale d'un facteur 2 au plus.

L'incertitude du facteur de conversion biosphère pour le chlore 36 comprend celles liées aux paramètres spécifiques du modèle (par exemple, les concentrations en chlore stable dans le milieu environnant), du site, et de la consommation. L'incertitude n'est pas significative (un facteur 2,2) et ne conduit pas à dépasser les objectifs d'impact, même dans les situations les plus pénalisantes. Pour le sélénium 79, l'incertitude globale liée aux paramètres de transfert, de site et de consommation est d'un facteur 4,1 et ne conduit pas non plus à remettre en cause les conclusions du calcul d'impact.

6.2.3.3 Conclusions sur la prise en compte des incertitudes relatives à la biosphère

La biosphère est un des compartiments du calcul qui peut présenter a priori l'incertitude la plus forte, du fait du nombre important de paramètres qui la caractérisent et de la multiplicité de ses évolutions possibles. Ces incertitudes sont cependant limitées par des choix conventionnels, partagés au niveau international, qui limitent le domaine d'étude. Il demeure cependant une incertitude, atteignant pour certains radionucléides, un facteur 10. C'est la raison pour laquelle il n'est fait appel à la biosphère que dans le seul but de procéder à un calcul de dose. Il ne lui est attribué aucune fonction de sûreté.

Une étude très large et détaillée des incertitudes, portant sur les radionucléides qui contribuent majoritairement à l'impact dans le cadre spécifique du dossier 2005 (essentiellement l'iode 129) montre que l'incertitude sur les facteurs de dose est, dans leur cas, bien plus limitée. La comparaison par rapport à la pratique internationale montre par ailleurs que les valeurs retenues par l'Andra sont conformes aux usages.

6.2.4 Incertitudes sur l'inventaire des colis

Les colis de déchets sont placés sous la responsabilité de leur producteur et/ou détenteur. A de rares exceptions près (cas de déchets de haute activité issus d'anciennes activités telles que la production d'objets au radium), l'inventaire des colis HAVL est issu de l'industriel électronucléaire, de la recherche qui lui est associée, et des activités de défense nationale. Les interlocuteurs de l'Andra pour les questions relatives à la maîtrise de l'inventaire sont EDF, COGEMA et le CEA. La manière dont l'Andra a recueilli auprès d'eux les données nécessaires à ses études, et s'est assurée de leur représentativité, est décrite au paragraphe 1.5.3.

6.2.4.1 Inventaire quantitatif des colis

Les quantités de déchets existants sont bien maîtrisées, mais des incertitudes demeurent pour les déchets à produire dans le futur, pour lesquels le nombre et/ou les caractéristiques dépendent de la stratégie adoptée par leur producteur. On note que, dans d'autres cas, l'affectation à une filière de type MA-VL pour certains déchets est en balance avec une autre, ce qui induit une incertitude sur l'inventaire à prendre en compte.

Pour couvrir ces incertitudes, l'Andra s'est attachée à entretenir un dialogue constant avec les producteurs de déchets, et à adopter les meilleures hypothèses disponibles ou des hypothèses enveloppes pour définir un modèle d'inventaire des déchets (MID – modèle d'inventaire de dimensionnement). Plus particulièrement, la stratégie a consisté à :

- retenir des hypothèses de production de déchets futurs cohérentes avec celles annoncées par les producteurs à l'Autorité de sûreté nucléaire, en particulier le « dossier cycle combustible » d'EDF [18] ;
- en cas d'incertitudes sur des quantités de colis à produire, retenir des hypothèses majorantes. En particulier, le MID a cherché à englober différentes stratégies industrielles possibles vis-à-vis de l'aval du cycle. Deux modèles de production (S1, avec retraitement du combustible et S2 avec arrêt du retraitement à partir de 2010) sont définis pour fonder les prévisions quantitatives. Le modèle S1 maximise le nombre de colis de verre à produire, le modèle S2 celui des combustibles usés. Le modèle S1 envisage différents scénarios de manière à prendre en compte des variations dans les modes de gestion des produits de fission et du plutonium à l'aval du cycle. Le SEN retient en règle générale l'inventaire maximal ou un inventaire très proche du maximum, pour l'ensemble des scénarios et pour chaque type de déchet. Il est en ce sens pénalisant, puisqu'une partie significative de l'inventaire en produits de fission est potentiellement comptabilisé au moins deux fois, une fois dans les verres au titre d'un scénario S1 et un fois dans le modèle S2 ;
- en cas d'incertitudes sur la répartition entre la filière MA-VL et une autre filière, retenir des hypothèses majorant les familles MA-VL ; c'est par exemple le cas des fûts d'enrobés bitumineux anciens de Marcoule, pour lesquels l'ensemble de l'inventaire a été pris en compte dans le MID.

Le MID présente ainsi de nombreuses garanties quant à son caractère enveloppe. Il n'en demeure pas moins qu'il peut exister des inflexions dans les procédés prévus par les producteurs conduisant à produire des quantités de déchets différentes de ce qui est estimé aujourd'hui. Par ailleurs, il peut se présenter des cas de déchets anciens aujourd'hui destinés à une autre filière, mais que leur caractérisation future conduirait à considérer comme MA-VL. Le caractère parfaitement enveloppe du MID ne peut donc être démontré.

Le MID couvre cependant l'ensemble des types de conditionnements (verres, bitumes, compactés, cimentés, bitumes-ciments, déchets homogènes et hétérogènes, mélanges de déchets organiques et non organiques, sources...) aujourd'hui connus. Il couvre également des hypothèses de concentrations de radioactivité dans les colis (et donc de thermique, de débit de dose, d'auto-irradiation, etc.) à la fois conformes aux pratiques actuelles, mais également prenant en compte les possibles évolutions de procédé chez les producteurs : prise en compte de verres à thermique augmentée (colis-type C2), prise en compte des futurs bitumes de STE2 selon les intentions de COGEMA. Les quantités sont issues d'estimations majorantes, et d'éventuelles inflexions de l'inventaire MA-VL ou HA, toujours possibles, ne conduiraient vraisemblablement pas à les remettre significativement en cause.

Le MID, et donc l'inventaire pris en compte dans le scénario d'évolution normale au travers des colis-types, est considéré comme enveloppe avec une bonne marge de confiance.

6.2.4.2 Caractérisation radiologique des colis

La caractérisation du contenu radiologique des colis s'appuie en règle générale sur des valeurs moyennes d'activité par colis, assorties de fourchettes d'incertitudes. Ces valeurs sont employées pour les calculs d'impact mobilisant l'ensemble de l'inventaire. Pour d'autres usages (par exemple les études de sûreté d'exploitation faisant intervenir un seul colis à la fois, ou un petit nombre, dans des situations normales ou accidentelles de manutention), des compositions radiologiques majorantes sont définies.

Les inventaires radiologiques peuvent être issus :

- du suivi de production, particulièrement pour les colis dont la production est soumise à des normes d'assurance qualité, ce qui est le cas de la totalité des productions depuis le milieu des années 1990. Il peut s'agir de prélèvements d'échantillons avant conditionnement, ou plus simplement de mesures de débit de dose des colis à partir desquelles on remonte à un inventaire radiologique fondé sur un spectre-type, lui-même validé par des échantillonnages préalables ou des calculs ;
- de calculs, ce qui est en particulier le cas des déchets dont l'inventaire radiologique peut être rattaché sans ambiguïté aux conditions d'irradiation des combustibles en réacteur. Les colis de combustibles usés de la filière REP entrent à l'évidence dans ce cadre, ainsi que les colis de déchets vitrifiés moyennant la définition de facteurs de corrélation entre le contenu des combustibles et celui des verres. Il convient dans ce cas de connaître l'historique d'irradiation des combustibles, au moins globalement ;
- d'opérations de caractérisation particulières, pour des déchets anciens faisant l'objet de prélèvements d'échantillons. Ces opérations peuvent s'effectuer en plusieurs phases. Ainsi, les déchets anciens actuellement entreposés par les producteurs ont pu faire l'objet d'opérations ponctuelles d'analyse, mais pourront être caractérisés plus systématiquement lors de leur reprise pour conditionnement ;
- de la connaissance de l'historique du procédé, même si celui-ci n'a pas toujours été suivi selon les normes de l'assurance qualité.

Ces différentes approches peuvent être confrontées les unes aux autres pour conforter les évolutions. Ainsi, l'inventaire des déchets vitrifiés a pu être établi à partir des mesures effectuées par COGEMA et comparé aux résultats de calculs d'irradiation des combustibles correspondants.

L'incertitude principale porte, dans ce contexte, à la fois sur les stocks de déchets anciens n'ayant pas encore fait l'objet d'une caractérisation détaillée ou dont la caractérisation n'a porté, à l'époque, que sur quelques radionucléides particuliers, mais également sur les colis futurs, dont les caractéristiques peuvent ne pas être totalement définies à ce jour.

Les colis anciens (en particulier la sous-famille B2.2 et une partie du colis-type B3), dont certains doivent faire à l'avenir l'objet d'opérations de reprise et conditionnement, sont connus par des prélèvements d'échantillons et par l'historique du procédé. La représentativité de ces données n'a pas encore été confrontée à la réalité individuelle des colis par des opérations systématiques de caractérisation, qui sont prévues dans le cadre des opérations de reprise. Celles-ci devraient permettre d'affiner la connaissance des colis.

L'inventaire des sources et objet assimilés (colis-types B7 et B8) susceptibles de faire l'objet d'un stockage profond est mal connu, tant du point de vue des quantités en jeu que de la diversité des radionucléides impliqués. Cet inventaire reste cependant très marginal à l'égard de celui des autres colis, et cette incertitude n'apparaît pas dimensionnante pour l'établissement d'un projet de stockage.

Les colis à venir (en particulier colis-types C2, C3, C4 et certains colis B2) font l'objet d'une définition de leur contenu radiologique fondée sur ce qui peut être imaginé à ce stade du procédé à mettre en œuvre. Cette définition peut être plus ou moins proche d'une réalité industrielle : pour les

colis de bitumes issus du traitement des boues de la station STE2, par exemple, dont le contenu radiologique est supérieur à celui des bitumes actuels, la réalisation effective des colis dépend de l'accord de l'Autorité de sûreté nucléaire. Certains colis, tels que les verres contenant 1 % de plutonium, sont définis de manière purement conventionnelle, dans le seul but d'élargir la gamme des types de colis pris en compte.

Le scénario d'évolution normale prend en compte, pour chaque colis-type, un inventaire radiologique correspondant à un majorant du contenu en radioéléments de chaque famille, ou le cas échéant type de déchet, constituant le colis-type. Au sein de chaque famille, l'inventaire pris en compte correspond à l'inventaire moyen multiplié par le nombre de colis. Cette manière de procéder garantit le caractère globalement majorant de l'inventaire total en radionucléides utilisé pour le calcul.

Le niveau de connaissance du contenu radiologique des colis s'apprécie en définitive en fonction de son utilisation pour les études de sûreté. La priorité porte sur les radionucléides qui peuvent contribuer à l'impact en situation normale à long terme (chapitre 5) ou en exploitation (chapitre 4), y compris dans le cadre des études de sûreté-criticité. A titre complémentaire, on peut également s'intéresser aux radionucléides pouvant engendrer un impact en situation altérée (voir chapitre 7). De ce point de vue, les colis les plus actifs (verres et combustibles usés), les plus chargés en éléments mobiles ou les plus susceptibles de provoquer un accident de criticité (combustibles usés de la filière REP, UOx et MOX) sont les plus préjudiciables ; ce sont aussi les mieux caractérisés du point de vue radiologique.

Chaque fois que les données disponibles n'étaient pas suffisantes, l'Andra s'est attachée à définir ses propres inventaires enveloppes, en complétant les spectres au moyen de calculs (à partir du contenu en radionucléides calculé des combustibles, à partir de ratios employés dans le cadre des agréments de colis FMA similaires).

L'impact maximal est issu des combustibles usés, dont l'inventaire est déterminé sur la base de calculs d'irradiation. Les autres colis contribuent significativement moins à l'impact. Les incertitudes sur l'inventaire radiologique ne sont donc pas de nature à remettre en cause la dose évaluée au chapitre 5. L'incertitude sur le contenu radiologique est ainsi raisonnablement maîtrisée.

6.2.4.3 Caractérisation chimique des colis

La caractérisation chimique des colis recouvre plusieurs problématiques :

- la connaissance des éléments susceptibles de constituer des toxiques chimiques. Ceux-ci sont définis à partir des toxiques classiquement considérés dans la réglementation sur la toxicité des déchets, adaptée aux spécificités des procédés mis en œuvre dans l'industrie nucléaire. Il s'agit de l'uranium, le plomb, le mercure, l'antimoine, le cadmium, le sélénium, l'arsenic, le nickel, le bore, le béryllium, le chrome total, le chrome VI, le cyanure libre et l'amiant. On n'a traité dans le calcul d'impact que ceux qui présentaient les quantités les plus importantes ;
- la connaissance des éléments susceptibles d'être des complexants facilitant la migration des radionucléides ou des toxiques chimiques en situation de stockage. Il peut s'agir de complexants organiques (molécules issus par exemple du procédé de traitement : tributyl-phosphate, etc.) ou non (sulfates, etc.) ;
- la connaissance des éléments susceptibles d'être agressifs à l'égard de leur environnement (aluminium, nitrates...)
- les matériaux qui peuvent, suite à une dégradation, donner naissance à des composés complexants, ou former des gaz. Il s'agit principalement des composés organiques et des métaux (à cause de la corrosion).

La caractérisation chimique des colis s'appuie sur la déclaration par les producteurs, dans les dossiers de connaissances, des matériaux constitutifs. Il s'agit ensuite de connaître la teneur en éléments chimiques de ces matériaux. En particulier, la connaissance des nuances d'acier utilisées pour les conteneurs ou pour la fabrication des objets mis en déchet (morceaux de gaines, déchets technologiques, etc.), les différents types de matériaux cimentaires employés, les spécifications d'approvisionnement en bitume, les formulations des matrices vitrifiées permettent de reconstituer un inventaire. La connaissance de l'histoire des procédés permet également d'identifier d'éventuels ajouts

de produits particuliers qui peuvent se retrouver dans les déchets (par exemple le mercure et le tributyl-phosphate dans les bitumes anciens). L'inventaire fait l'objet d'incertitudes liées tant à la nature de certains matériaux présents (particulièrement pour les déchets résultant du conditionnement d'objets en vrac) qu'aux éventuelles variations de formulation.

Dans l'état actuel des connaissances, les inventaires chimiques n'ont pas atteint le même niveau de fiabilité que les inventaires radiologiques. On retient globalement que :

- les inventaires des combustibles usés et des verres sont bien connus, la composition chimique étant un paramètre suivi en production. On notera des inconnues sur la composition en matériaux de certains combustibles usés de la Défense, l'information correspondante étant classifiée. Mais ces imprécisions ne soulèvent pas de difficulté particulière à ce stade, compte tenu de la faible ampleur des volumes concernés ;
- les inventaires des déchets B produits depuis le début des années 1990 (B1, une partie des B2, colis B4, B5, B6) sont en général précis, du fait du suivi sous assurance qualité ;
- les inventaires de déchets plus anciens (colis B2, colis B3) sont moins complets, mais peuvent être en grande partie reconstitués à l'aide de valeurs moyennes représentatives. On notera cependant que les déchets les plus anciens parmi les colis B3, issus de la recherche, posent encore des difficultés liées à la multiplicité des matériaux mis en œuvre à l'époque (verre, amiante-ciment, etc.) ;
- les inventaires chimiques des colis de déchets B7 et B8 sont très préliminaires, du fait d'une connaissance moindre de ces déchets dont l'origine est « ancienne » au regard des autres types de déchets, et dont la nature est plus variée. Ils représentent cependant une quantité faible par rapport au reste de l'inventaire des colis.

Du point de vue de la sûreté, les inventaires en espèce agressives à l'égard des compléments de colisage sont à prendre en compte ; au stade de la faisabilité, ils n'apparaissent pas comme soulevant de difficulté spécifique.

Les espèces chimiques issues des colis de déchets B sont une des sources possibles de colloïdes, de même que le milieu géologique, la bentonite, le béton. Ils sont tous gérés globalement par la fonction « filtrer les colloïdes », qui consiste à établir autour des alvéoles un milieu à faible porosité (le milieu géologique, le bouchon). L'incertitude se reporte donc sur la capacité du milieu à gérer le transport colloïdal, évoquée au paragraphe 6.2.10.

6.2.4.4 Synthèse sur les incertitudes relatives à l'inventaire

La prise en compte des incertitudes relatives à l'inventaire fait apparaître quelques catégories distinctes :

- des incertitudes qui relèvent strictement de l'inventaire (en nombre de colis, en radionucléides ou en toxiques chimiques) et dont l'influence est limitée aux données d'entrée du calcul d'impact. Elles sont couvertes largement par des choix enveloppes au sein du modèle d'inventaire de dimensionnement. Le caractère totalement majorant de ce dernier ne peut cependant pas être démontré. En tout état de cause, des variations sur telle ou telle famille de colis ne seraient pas de nature à remettre en cause significativement les calculs ;
- des incertitudes qui peuvent influencer, par le biais des modes de conditionnement, sur la thermique, le taux d'irradiation des colis ou le taux d'émission de gaz de radiolyse. Elles sont aussi largement couvertes par les hypothèses du modèle d'inventaire ;
- des incertitudes sur le rôle de certaines substances, soit complexantes, soit agressives envers leur environnement, pouvant être présentes dans des familles du modèle d'inventaire. Elles sont couvertes au premier ordre par la conception du stockage – milieu cimentaire dans les alvéoles B, dimensionnement possible des colisages de déchets B pour résister à une attaque sulfatique par exemple - et par la fonction « filtrer les colloïdes ». Elles ne seraient pas de nature à remettre en cause le calcul de performances. Des propriétés géochimiques dégradées ont cependant été considérées en SEN pour les alvéoles contenant des déchets cellulose. La caractérisation des

déchets dont la nature chimique particulière peut poser problème devra se poursuivre pour continuer à réduire les incertitudes.

Une fois détaillées les incertitudes portant sur la description du milieu d'accueil et de l'inventaire des colis, on s'attache dans les paragraphes suivants aux processus qui régissent l'évolution du stockage, tant les phénomènes en jeu que les modèles qui les décrivent. Le recensement des incertitudes s'appuie sur les acquis du travail de recherche, conduit par l'Andra et ses homologues à l'international.

L'exhaustivité du recensement au regard de l'ensemble de la phénoménologie n'est pas recherchée, le document d'AQS [33] présentant une vision plus détaillée. On aborde ici ceux des phénomènes pour lesquels des incertitudes éventuellement significatives pour la sûreté ont pu être identifiées au terme du processus d'analyse qualitative de sûreté, sur la base de leur influence potentielle sur les fonctions de sûreté et/ou la représentation du scénario d'évolution normale.

6.2.5 Incertitude sur les phénomènes hydrauliques en champ proche

6.2.5.1 Incertitudes sur l'influence de la resaturation sur le transport des radionucléides

Les incertitudes relatives à l'hydraulique en champ proche portent essentiellement sur la durée de la phase de resaturation des ouvrages de stockage, en fonction des différents phénomènes qui peuvent l'influencer. Avant d'évoquer ces différentes incertitudes, il est nécessaire de rappeler en quoi elles peuvent être importantes pour l'analyse de sûreté.

Dans le scénario d'évolution normale, le stockage est représenté dans un état saturé dès l'origine. Il s'agit d'une hypothèse de calcul destinée à simplifier la représentation du stockage. Cette hypothèse ne concerne que le calcul à proprement parler. Toutes les analyses sur l'évolution du stockage, sur le comportement des composants, sur leur évolution, etc. prennent en compte l'évolution du degré de saturation dans le temps.

L'objectif n'est donc pas d'évaluer de manière précise les durées de resaturation pour elles-mêmes, mais d'étudier si les incertitudes qui peuvent peser sur ces durées sont de nature à influencer sur la phénoménologie des composants, à un point tel que des fonctions de sûreté pourraient être défaillantes, ou non effectives à un moment où elles seraient nécessaires. Il importe également de s'interroger sur l'hypothèse retenue en SEN, consistant à considérer le stockage resaturé dès l'instant initial, afin de vérifier si elle est conservative, si elle conduit à négliger des phénomènes qui pourraient tendre à accélérer la migration des radionucléides, et dans l'affirmative si ces phénomènes sont quantitativement importants.

Trois questions différentes peuvent se poser :

- en elle-même, la phase où le stockage n'est pas resaturé peut-elle induire des phénomènes de nature à accélérer le transfert des radionucléides ? On a vu qu'elle avait peu d'influence sur le transfert des radionucléides à l'échelle du stockage dans son ensemble ;
- si des parties du stockage sont plus rapidement saturées que d'autres, les gradients hydrauliques induits peuvent-ils provoquer des déplacements d'eau contaminée par des radionucléides ?
- les gaz qui sont produits après fermeture du stockage (par corrosion, par radiolyse), et qui influencent le transitoire hydraulique, influencent-ils également les fonctions de sûreté et le transport des radionucléides ?

Pour ce qui relève de la première question, il apparaît que la désaturation des milieux qui environnent les déchets est favorable au ralentissement de leur migration, voire à leur immobilisation. La dépendance notamment du coefficient de diffusion au degré de saturation est encore un domaine sur lequel pèsent des incertitudes. Mais de ce seul point de vue, il apparaît que l'hypothèse d'un stockage resaturé dès la fermeture est une hypothèse conservative.

La deuxième question se réfère à la possibilité que des gradients hydrauliques se forment entre les alvéoles et les galeries attenantes du fait de degrés de saturation moindres. Les alvéoles B étant plus étendues, contenant plus de vides, et étant de plus soumises plus fortement à l'action des gaz que les

galeries qui les jouxtent, elles se resatureront plus tardivement, et des gradients hydrauliques éventuels seraient orientés vers l'intérieur de l'alvéole.

La situation peut être inverse dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés, qui ont un diamètre plus petit que celui de la galerie attenante. On s'attend donc à ce qu'elles se resaturent plus vite. Pendant une période de temps courte, un gradient hydraulique peut exister entre l'alvéole et la galerie. Cependant, à l'échelle du siècle, les bouchons d'alvéoles C et de combustibles usés sont saturés et constituent un obstacle à la convection. Dans un contexte de transport rendu diffusif, des gradients horizontaux, par ailleurs faibles, ne peuvent avoir d'influence. De plus, une telle situation de gradient forcé hors des alvéoles de combustibles usés a été traitée en étude de sensibilité du SEN. Elle est destinée à couvrir l'effet des gaz (voir paragraphe suivant) mais est enveloppe a fortiori d'une situation de saturation différenciée.

La question de l'influence des gaz est abordée au paragraphe 6.2.5.2.

6.2.5.2 Incertitudes sur les cinétiques de resaturation, de production et de transfert de gaz, et le couplage entre les deux

La resaturation n'est un phénomène important vis-à-vis de l'analyse de sûreté qu'à la condition qu'elle puisse influencer les fonctions de sûreté du stockage, soit directement, soit par le biais de perturbations. Le comportement de certains composants peut en effet être fonction de leur taux de saturation. L'incertitude sur le comportement d'un composant, ou sur ses fonctions de sûreté, renvoie donc dans ce cas à l'incertitude sur l'évolution de son degré de saturation en fonction du temps. Or, il apparaît que le phénomène qui peut influencer le plus significativement la resaturation est la production de gaz au sein du stockage.

Ceux-ci sont majoritairement dus à la production d'hydrogène par la corrosion en condition anoxique, bien que d'autres sources (radiolyse de l'eau ou de la matière organique, production par des microorganismes, air occlus au sein du stockage à la fermeture...) puissent s'y ajouter. Les cinétiques de production de gaz sont donc directement fonction des cinétiques de corrosion. Celles-ci ont été prises en compte dans la production de gaz [61] selon les modalités suivantes :

- en retenant des vitesses hautes (2 à 3 microns par an) part rapport à celles généralement constatées en milieu anoxique (généralement inférieures au micron) ;
- en négligeant la dépendance de la vitesse de corrosion par rapport à la teneur en eau du milieu, qui l'influence pourtant fortement. Les vitesses retenues correspondent à des milieux saturés à plus de 80 % ;
- en négligeant un éventuel effet de rétroaction sur la réaction de corrosion dû à l'hydrogène lui-même. Cet effet est cependant a priori négligeable, ce dernier point n'offre donc pas de marge de sûreté significative.

Les pressions de gaz possibles, évaluées en fonction des quantités d'acier, des vitesses de corrosion et de la capacité de l'hydrogène à diffuser dans le milieu, peuvent s'élever à 7 MPa dans les alvéoles de déchets B, à 6 ou 7 MPa dans les alvéoles de déchets C et autour de 9 MPa dans les alvéoles de combustibles usés.

Le devenir des gaz peut s'envisager selon différents processus déjà évoqués au chapitre 5 :

- en quantités faibles, ils peuvent se dissoudre dans l'eau et migrer avec elle par convection et/ou diffusion. On notera que ce processus est peu efficace dans des milieux très peu perméables comme les argilites ;
- en quantité plus importante, ils peuvent s'évacuer par écoulement biphasique, c'est-à-dire sous forme d'une phase gazeuse différenciée, au sein de la porosité des matériaux. Dans un tel cas, ils sont susceptibles d'interagir avec l'eau libre présente dans cette porosité et de la déplacer à partir du moment où ils parviennent à vaincre la pression capillaire. Un tel phénomène porte le nom de « suction ». Il se produit à partir d'une pression seuil, dépendante de la taille des pores du milieu, qualifiée de « pression d'entrée de gaz » ;

- si on atteint des quantités de gaz encore plus importantes, ils peuvent agir sur le milieu dans lequel ils circulent et en ouvrir la porosité, de manière à augmenter leur écoulement. Dans un tel cas, la perméabilité aux gaz du milieu augmente mais la perméabilité à l'eau chute, le gaz occupant tout l'espace poral disponible. L'ouverture de la porosité, qualifiée de « microfissuration » bien que le phénomène soit différent de l'endommagement mécanique dans l'EDZ, est considérée comme réversible, ce point ayant été vérifié expérimentalement par l'Andra et à l'international [7] ;
- pour des quantités de gaz très importantes, ceux-ci sont susceptibles de provoquer un endommagement irréversible, assimilable à une fracturation. On parle dans ce cas de l'atteinte de la « pression de fracturation », qui a été évaluée expérimentalement (en forage) à 12 MPa dans les argilites.

La courbe en Figure 6.2-6 montre l'évolution de la pression nécessaire au déplacement de l'eau, et le taux de désaturation que cette pression provoque, pour différents matériaux en fonction de leur teneur en eau, en échelle logarithmique. On voit que la pression dans les argilites saturées à moins de 90 % est de plusieurs ordres de grandeur plus forte que les pressions de gaz qui peuvent être engendrées dans le stockage. La courbe est similaire pour la bentonite. Dans ces matériaux, les gaz ne peuvent provoquer de désaturation importante. En revanche, la pression de succion est beaucoup plus faible dans le béton ou dans les milieux très poreux tels que le sable. Cette distinction joue un rôle important dans l'étude du devenir des gaz au sein du stockage.

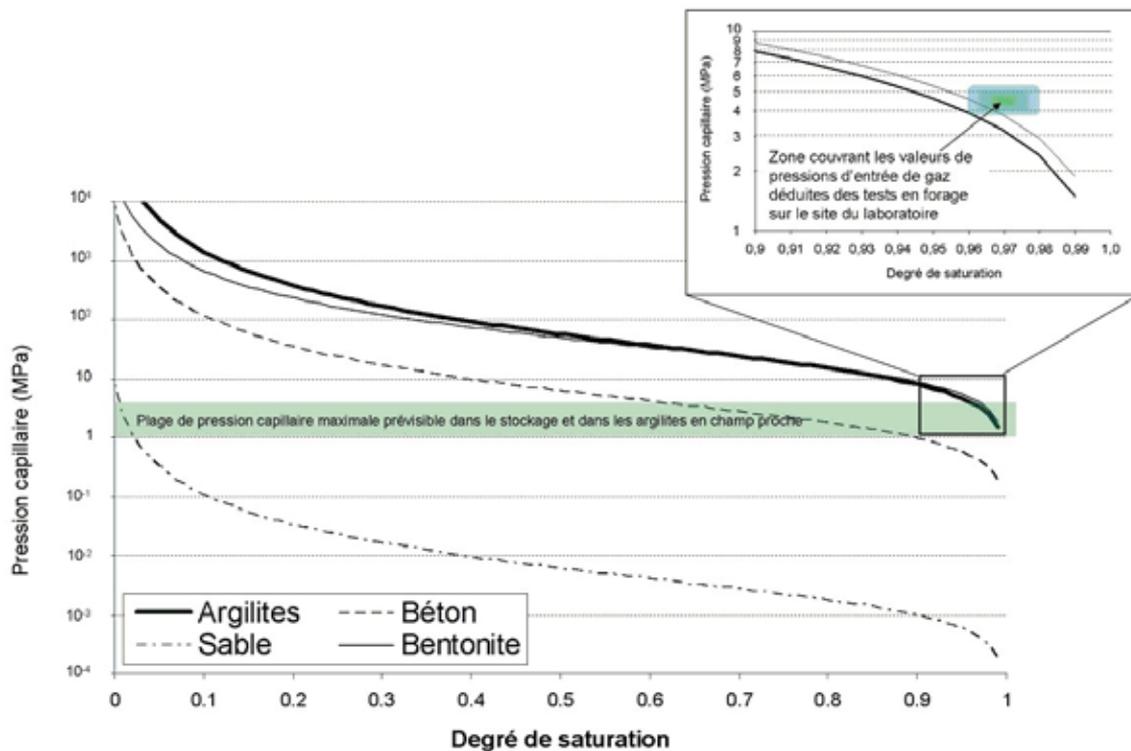


Figure 6.2-6 Succion dans différents milieux poreux en fonction du degré de saturation en eau

Les composants dont le comportement dépend directement de leur niveau de saturation sont :

- la formation hôte, dont les propriétés notamment mécaniques ainsi que thermiques sont influencées par sa teneur en eau. Cependant, dans la mesure où les gaz ont une influence faible sur son degré de saturation, l'hypothèse de resaturation complète est une approximation valable ;
- les argilites fracturées, dont la porosité peut être plus forte et qui peuvent présenter des pressions d'entrée de gaz plus faibles que les argilites saines ou microfissurées. Cependant, la désaturation éventuelle de la zone fracturée aurait tendance à limiter son évolution et à réduire sa perméabilité,

effets en tout état de cause positifs au regard de la sûreté. Ces effets, incertains, ne sont pas pris en compte en SEN ;

- les scellements en bentonite, qui ne peuvent exercer pleinement leurs fonctions qu'à partir du moment où leur saturation est suffisante pour qu'ils développent une pression de gonflement apte à assurer la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » ; eux aussi se resaturent rapidement (la centaine d'années pour les bouchons d'alvéoles C et de combustibles usés, de l'ordre du millier d'années pour les autres scellements) et les gaz les influencent peu ;
- le remblai, qui selon son degré de compaction – qui influence directement sa porosité – peut être partiellement désaturé par les gaz ;
- les composants en béton, dont la dégradation est fonction de leur teneur en eau. Pour ces éléments, l'hypothèse d'un stockage resaturé dès l'instant initial est une hypothèse conservatrice ;
- les éléments métalliques (soutènement des alvéoles de déchets thermiques, chemisages, conteneurs, etc.), dont la corrosion est activée à partir de taux de saturation faible (30 %), devenant maximale à partir d'un taux de 80 % environ. Vis-à-vis de la dégradation de ces composants, l'hypothèse d'un stockage resaturé dès l'instant initial est conservatrice, puisqu'elle revient en fait à accélérer la corrosion et maximiser les débits de production de gaz associés.

Une fois posée cette distinction, il convient d'étudier le déroulement dans le temps du processus d'interaction entre le gaz et l'eau, ce qui est l'objet des paragraphes suivants, qui abordent chaque compartiment du stockage.

● **Au niveau des alvéoles C et de combustibles usés**

Le schéma de circulation des gaz prend en compte leur capacité à se dissoudre dans l'eau porale et à y diffuser. Cependant ce mode d'évacuation s'avère insuffisant pour gérer l'ensemble du gaz produit au sein des alvéoles de déchets vitrifiés et de combustibles usés, et une montée en pression apparaît inévitable. Celle-ci s'arrête lorsque le gaz peut s'évacuer par le milieu lui offrant le moins de résistance.

Tant que les bouchons d'alvéoles ne sont pas suffisamment resaturés, plusieurs chemins s'offrent au transfert des gaz : l'interface entre le bouchon et la roche, non encore colmatée, les interstices au sein du bouchon lui-même, voire la zone microfissurée. Les évaluations montrent que la durée avant saturation du bouchon (jusqu'à un taux élevé, supérieur à 97 %) est de l'ordre de la centaine d'années.

Dès que le bouchon a développé une pression de gonflement suffisante, le gaz s'accumule dans l'alvéole et désature les jeux autour des colis, ce qui contribue à freiner leur corrosion. Cet effet n'est pas pris en compte dans le SEN, qui est conservatif de ce point de vue.

Le gaz peut emprunter la zone endommagée, continuer à s'échapper par le bouchon (bien que la pression d'entrée au gaz élevée de celui-ci et sa faible surface n'en fasse pas une voie privilégiée), ou s'échapper radialement par la formation hôte qui offre une surface importante bien que peu perméable (voir Figure 6.2-7).

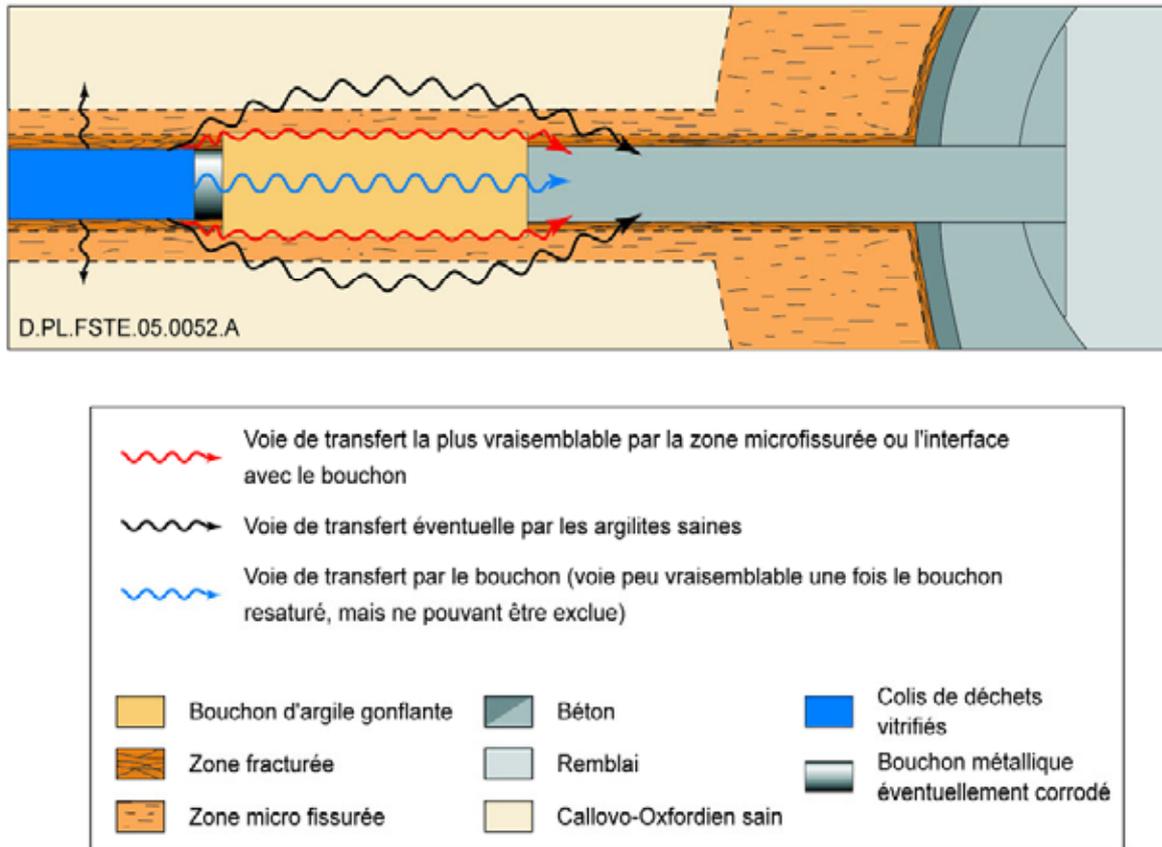


Figure 6.2-7

Schéma illustrant les trois modes d'évacuation des gaz dans les alvéoles de déchets C

Dans les alvéoles de combustibles usés, le gaz produit par le revêtement métallique perforé peut suivre le même chemin ; au-delà, les gaz engendrés par la corrosion du chemisage et du conteneur montent en pression jusqu'à atteindre la pression d'entrée de gaz dans la barrière ouvragée. L'effet des gaz sur la barrière ouvragée a fait l'objet de plusieurs essais à l'international, qui ont montré sa capacité à se cicatiser ([90] et [91]) ; le passage transitoire de gaz ne remet pas en cause les fonctions qui sont attendues d'elle. Le gaz s'évacue ensuite par les différents chemins évoqués précédemment.

L'alvéole est ainsi mise en pression par le gaz pendant quelques milliers d'années. Cette pression ne désature significativement ni les bouchons, ni la roche. Des gradients hydrauliques peuvent cependant être transitoirement imposés par le gaz à la roche, à une période où les conteneurs sont encore étanches (pour les combustibles usés, le dimensionnement impose 10 000 ans au minimum ; pour les déchets vitrifiés, il est de 4 000 ans en milieu totalement resaturé, mais significativement plus long en prenant en compte l'effet de désaturation des gaz).

La part de chaque voie de transfert du gaz dépend des pressions d'entrée relatives, des surfaces offertes, et demeure donc relativement incertaine. Ces incertitudes sont cependant sans effet significatif sur la représentation du SEN, dans la mesure où celui-ci considère une alvéole resaturée.

Le SEN suppose les alvéoles de déchets C et de combustibles usés instantanément resaturées, et les bouchons immédiatement efficaces. La description précédente permet de vérifier que cette représentation est pertinente au regard des incertitudes induites par la resaturation sur les gaz :

- elle est sans influence majeure sur le bouchon, qui est efficace avant 100 ans, et ne peut ensuite être désaturé par la pression de gaz du fait de sa très faible porosité ;
- elle est sans influence non plus vis-à-vis de la désaturation du milieu géologique, qui reste faible ;

- elle est conservatrice au regard de l'intérieur de l'alvéole, qui peut être significativement désaturé, mais dans une telle configuration la durée de vie des conteneurs et surconteneurs ne peut qu'être supérieure à celle évaluée en vue du scénario d'évolution normale.

L'incertitude résiduelle concerne l'occurrence d'un possible défaut d'étanchéité des conteneurs de combustibles usés ou des surconteneurs de déchets C, au moment du transitoire hydraulique. Un tel événement n'aurait a priori pas de conséquence. La majorité du terme de production de gaz provenant du chemisage (ainsi que du revêtement métallique qui entoure la barrière ouvragée dans le cas des alvéoles de combustibles usés), un défaut pendant la phase de montée en pression correspond à une phase où le conteneur n'est pas encore corrodé et n'est pas en milieu saturé. Le défaut ne serait pas susceptible d'évoluer et les relâchements s'en trouveraient empêchés.

On a cependant pris en compte une incertitude sur ce raisonnement qualitatif, en envisageant en sensibilité du SEN un défaut de conteneur conduisant à un relâchement pendant le transitoire thermique et hydraulique. Les pressions de gaz imposées dans le Callovo-Oxfordien en champ proche sont respectivement de l'ordre de 7 MPa au plus dans les alvéoles C et de 9 MPa dans les alvéoles de combustibles usés, au maximum, pendant des durées inférieures à 10 000 ans. L'occupation de la porosité par le gaz empêche la migration de l'eau, effet favorable qui n'est pas pris en compte dans la modélisation retenue. Malgré ces choix, on a vu que cet événement n'a pas de conséquence sur l'impact, du fait de sa durée faible. On a reconduit cette même étude de sensibilité dans le scénario d'évolution altéré « défaut de colis ».

Rappelons cependant qu'on traite à ce stade uniquement des incertitudes sur la durée de la resaturation et sur le transport : l'effet mécanique des gaz sur les composants du stockage est traité dans une section dédiée (voir paragraphe 6.2.6.2).

● **Au niveau des alvéoles de déchets B**

Dans les estimations actuelles, le gaz (essentiellement l'hydrogène de corrosion, mais les gaz de radiolyse participent également de manière quantitative au bilan des déchets B2) s'évacue d'abord au travers du bouchon d'alvéole. La durée de saturation totale du bouchon d'alvéole, est estimée à quelques milliers d'années. Cependant, le bouchon est suffisamment efficace dès l'échéance de quelques siècles pour s'opposer à la circulation d'eau et de gaz. Dans une évaluation conservatrice de la production de gaz, les modélisations conduisent en 500 ans à des pressions de l'ordre de 6 à 7 MPa [61]. Dans ces conditions, l'intégralité du gaz ne pourra s'échapper par diffusion, et une partie migre soit par la zone endommagée en contournant les scellements, soit par la formation hôte, soit par le scellement lui-même.

Au niveau du pourtour du colis, le milieu présentant une macroporosité importante, celle-ci va être occupée rapidement par les gaz, qui seront à même d'empêcher l'eau de pénétrer à proximité ; la saturation reste faible, pendant toute la période de production des gaz. Pour ce qui est des déchets eux-mêmes, dans la mesure où ils sont isolés de l'eau par le colis et par le gaz ambiant, ils se maintiennent à des niveaux de saturation proches de leur niveau initial : forts pour les colis comportant du béton, faibles pour ceux composés de déchets compactés.

La chute de la pression de gaz s'effectue après un temps dépendant de la cinétique de production et s'étend sur la centaine de milliers d'années.

Du point de vue de la représentativité du SEN, et de l'hypothèse de resaturation immédiate, on observe que cette hypothèse est :

- conservatrice au regard de certains modèles de relâchement, en particulier ceux des colis de type CSD-C, qui ne devraient pas être exposés à un taux de saturation significatif pendant tout le temps où la pression de gaz peut se maintenir dans les vides de l'alvéole. Pour les autres déchets, l'hypothèse est peu sensible ;
- conservatrice au regard de l'endommagement des colis en béton. Dans une atmosphère sèche et dominée par l'hydrogène, le béton est moins susceptible de subir les processus de dégradation chimique ;

- très pénalisante au regard des transferts au sein de l'alvéole, celle-ci restant sèche pendant des temps importants. Les radionucléides ne peuvent que très difficilement migrer au sein de la macroporosité (en particulier les interstices entre colis) dépourvus d'eau ;
- sans influence majeure sur la formation hôte, que le gaz désature peu. Elle peut être l'objet de gradients de pression imposés par les gaz sur les premiers mètres, mais ces gradients connaissent leur maximum très tôt (au bout de 500 ans dans les modélisations), avant que les radionucléides n'aient pu migrer hors des colis. De plus, comme pour les alvéoles de déchets C et de combustibles usés, la désaturation faible et l'occupation de quelques pourcents de la porosité de la roche par les gaz sont des phénomènes a priori favorables qui s'opposeraient à la circulation de l'eau ;
- sans influence majeure sur le scellement de l'alvéole B. En effet, tout le temps où il pourrait ne pas être efficace (dans les tout premiers siècles, le temps qu'il se sature suffisamment), il offre une voie de passage au gaz. A l'échéance de 500 ans, au moment où se fait la montée en pression, il n'est pas stricto sensu totalement resaturé, mais suffisamment efficace du point de vue hydraulique.

Malgré ces éléments favorables, il a été retenu de traiter en sensibilité du SEN une incertitude sur l'ensemble des points précédents, c'est-à-dire sur la capacité des radionucléides à migrer tôt au sein de l'alvéole et jusque dans la formation hôte. On rappelle que la représentation du calcul est pénalisante, puisqu'elle suppose le milieu à la fois saturé et soumis à la pression des gaz. Ces calculs ont conclu que le transitoire en question est trop court pour entraîner des effets sur la migration des radionucléides.

Rappelons qu'on ne traite ici que de l'interaction entre les gaz et la resaturation. Les effets mécaniques des gaz dans l'alvéole B sont abordés au paragraphe 6.2.6.2.

● Dans les ouvrages d'accès

Les évaluations du terme source gazeux montrent que les ouvrages d'accès, jusqu'au puits, peuvent être le lieu d'une production de gaz moins importante que dans les alvéoles. Les évaluations, effectuées dans des conditions simplifiées et conservatives, montrent que le gaz émis par la corrosion des boulons métalliques devrait se dissoudre en totalité [61] ; quant aux armatures et plaques métalliques du revêtement, elles peuvent contribuer à une production de gaz, mais ne sont pas suffisantes pour mettre en pression les galeries.

La galerie est donc principalement un lieu de transit pour les gaz issus des alvéoles. Elle comporte des milieux relativement poreux (le revêtement une fois qu'il s'est suffisamment dégradé, la zone fracturée), le gaz s'y épand rapidement, mais doit, pour continuer à progresser, franchir les scellements. Il peut désaturer au passage la zone fracturée et/ou le revêtement, ce qui n'a pas d'impact sur la sûreté (en toute rigueur, la désaturation freine même l'hydrolyse du béton, et rigidifie la zone fracturée). Le fait que le gaz progresse dans les remblais est plus incertain. Si ce dernier s'avérait suffisamment mal compacté, il pourrait être partiellement désaturé par le gaz, pendant les premiers milliers d'années. Dans une vision pessimiste, on pourrait envisager que cette désaturation altère momentanément ses propriétés mécaniques. Notons cependant que, si le remblai s'avérait désaturé, alors il est vraisemblable que le béton le serait aussi, et le revêtement des parois de la galerie ne serait pas soumis à une dégradation significative et continuerait d'assurer sa fonction de protection mécanique de la roche. Celle-ci serait donc toujours assurée.

Si jamais la mauvaise saturation du remblai n'était pas compensée par le revêtement, et que la roche non soutenue venait à connaître une dégradation irréversible de sa zone endommagée, le cas serait couvert par l'étude de sensibilité du scénario d'évolution normale qui envisage une zone fracturée et une zone microfissurée aux caractéristiques dégradées. On a vu que ce cas de figure a une influence limitée sur le transport des radionucléides.

Du point de vue du transport, pour les raisons évoquées précédemment dans le cas des alvéoles, il est peu vraisemblable que des radionucléides aient pu atteindre les galeries au moment de la montée en pression des gaz. Un éventuel déplacement d'eau libre par la pression de gaz dans les remblais ou

l'EDZ ne concernerait pas de l'eau contaminée. Un transport dans les galeries sous l'effet d'une pression de gaz issue des alvéoles de déchets a néanmoins été envisagé au titre des incertitudes, en étude de sensibilité du scénario d'évolution normale. Cette étude a montré que le déplacement de radionucléides induit ne conduisait pas à augmenter l'impact.

● Synthèse

En résumé, il apparaît globalement que les cinétiques de production de gaz et de resaturation sont entachées d'incertitudes, liées essentiellement au couplage de ces différents phénomènes entre eux dans les milieux présentant une porosité suffisante pour être influencés (zone endommagée, remblais, en particulier). Ils ne peuvent désaturer significativement la roche, ni les scellements. Ceux-ci sont donc aptes à assurer leur fonction de sûreté dans de bonnes conditions.

L'évolution du système de stockage pendant la phase de resaturation, et sa représentation à travers le scénario d'évolution normale, est robuste face à ces incertitudes, qui ne remettent pas en cause le caractère conservatif du scénario.

Au titre de la gestion des incertitudes et pour vérifier la robustesse du stockage, on a cependant identifié une situation possible de transfert de radionucléides pendant le transitoire hydraulique et sous l'effet de la pression de gaz, déjà traitée en SEN et à considérer en scénario d'évolution altérée « défaut de colis ».

6.2.6 Incertitudes sur les phénomènes mécaniques

6.2.6.1 Extension et caractéristiques de la zone endommagée

Ce paragraphe et les suivants abordent, selon le même principe que pour les phénomènes hydrauliques, les incertitudes les plus significatives dans le domaine mécanique, ainsi que les incertitudes sur les couplages hydro-mécaniques. On aborde le comportement mécanique d'ensemble du stockage, ainsi que celui de la roche hôte en particulier. Le comportement mécanique des composés ouvragés étant très dépendant de leur évolution chimique, il n'est abordé que succinctement ici. Les couplages chimie-mécanique seront abordés à partir du paragraphe 6.2.8, et les couplages thermo-mécaniques au paragraphe 6.2.11.3.

● Endommagement initial

Le comportement des argilites lors du creusement, et leur évolution immédiate, sont au stade du dossier 2005 évalués d'une part par modélisation, d'autre part à partir des observations pratiquées lors du creusement des puits et au sein des galeries expérimentales. Les expérimentations se poursuivent dans les ouvrages du laboratoire souterrain pour acquérir des données complémentaires, données qui viendront compléter les évaluations. Elles permettront d'ajuster les dimensionnements des soutènements et revêtements, et d'évaluer plus précisément les extensions et perméabilités des zones éventuellement fracturées et microfissurées par le creusement, ainsi que leur évolution dans le temps. Ces évaluations permettront notamment de confirmer ou d'affiner les modèles, et le cas échéant de revoir le dimensionnement des scellements en fonction de l'extension des différentes zones. Elles permettront de préciser les conditions dans lesquelles le soutènement pourra être posé, puis déposé si besoin.

Dans l'état actuel, les grands mécanismes qui pilotent le comportement mécanique du stockage (endommagement initial de la roche, gonflement des matériaux en argile gonflante et des produits de corrosion, fluage des argilites, rééquilibrage global à terme) sont bien identifiés. Les incertitudes portent plutôt sur l'amplitude et la cinétique de chaque phénomène, et donc en particulier sur les modèles qui permettent de les prédire. En particulier, l'évaluation de l'extension de l'EDZ est liée essentiellement au choix du modèle rhéologique des argilites. S'y ajoutent de possibles effets d'échelle, dus à la transposition à partir d'échantillons centimétriques. Ces incertitudes sont couvertes dans le scénario d'évolution normale par l'utilisation de valeurs d'extension pessimistes, fondées sur un modèle de comportement rhéologique issu de l'exercice international MODEX-REP [17]. Ce

modèle est jugé le plus « phénoménologique », mais il est associé à des jeux de paramètres conservatifs.

Il est à noter que, pour tenir compte du fait que la profondeur du stockage est indéterminée, puisque dépendant de sa localisation sur la zone de transposition, on a appliqué pour l'évaluation en scénario d'évolution normale un modèle d'extension de l'EDZ à 630 mètres, profondeur maximale possible sur la zone de transposition (voir chapitre 5). Ce choix volontairement pessimiste (qui n'est représentatif que d'une portion restreinte de la zone de transposition) permet de contribuer à couvrir toutes les formes d'incertitudes sur l'extension de l'EDZ, en conduisant à utiliser dans l'évaluation des valeurs d'extension de la zone fracturée et de la zone microfissurée maximales au regard des valeurs attendues, et ne pouvant se manifester que dans une zone restreinte.

● **Comportement différé de la zone endommagée**

Le comportement à long terme de l'endommagement des argilites est décrit dans [17]. Il peut être marqué par un processus de fluage, qui reprend à partir du moment où les argilites sont suffisamment saturées. L'évolution mécanique à long terme de la zone endommagée est un processus dont la cinétique est très lente, et qui accompagne l'évolution des matériaux placés à proximité. En section courante de galerie, cela concerne le revêtement en béton, et le remblai. Au droit du scellement, le fluage lent de l'argilite est accompagné par le gonflement de la bentonite sous l'effet de la saturation.

Le modèle d'évaluation de la zone endommagée à court terme, lors de la décharge mécanique, ne fait appel à aucun soutien de la roche, et se fonde sur l'hypothèse d'un déconfinement complet, en négligeant la présence du soutènement, puis du revêtement mis en place au fur et à mesure du creusement. A l'issue de la resaturation et de la perte de la fonction mécanique du revêtement, et en fonction du gonflement de la bentonite et d'un fluage très lent des argilites, la zone endommagée est supposée ne plus évoluer. Cette hypothèse revient :

- à négliger les effets de l'auto-cicatrisation des argilites, qui est possible et même attendue dans le contexte. Il s'agit là d'une vision pénalisante de l'évolution des argilites. La zone endommagée à long terme est supposée équivalente à celle qui se développe lors du creusement ;
- à prendre en compte en revanche le fait que les argilites sont contraintes dans leur évolution. En section courante de galerie, elles sont soutenues par le revêtement tant que celui-ci peut assurer une fonction mécanique. Le remblai prend le relais à long terme. Au droit des scellements, la présence de la bentonite, qui gonfle en se resaturant, accompagne les évolutions de l'EDZ. Dans les alvéoles de déchets B, l'EDZ est au contact du béton de revêtement. Dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés, elle jouxte soit la barrière ouvragée, soit le chemisage métallique (cas des alvéoles de déchets C dans le concept de référence).

Ces hypothèses génériques, prises en compte dans le scénario d'évolution normale, permettent de couvrir les incertitudes éventuelles sur :

- l'ampleur du phénomène d'auto-cicatrisation, très vraisemblable dans les argilites et déjà observé, mais qui n'a pas encore fait l'objet d'une évaluation détaillée ;
- l'évolution à court terme de l'EDZ et les techniques mises en place pour la soutenir.

En revanche, l'évolution à long terme de la zone endommagée suppose que les matériaux qui sont en contact avec elle assurent son soutien. On aborde successivement les incertitudes portant sur les différents cas de figure possibles.

On notera que, à proximité des alvéoles de déchets C et de combustibles usés essentiellement, l'EDZ est soumise à des actions d'origine thermomécanique dans les premiers siècles de son évolution. Celles-ci sont abordées au paragraphe 6.2.11.3, avec l'ensemble des effets thermomécaniques.

Comportement mécanique au contact des ouvrages en béton

L'évolution du béton est décrite comme une succession d'états chimiques allant du béton « sain » au béton « altéré » puis « dégradé » (voir paragraphe 6.2.8.2). On considère que le béton « dégradé » perd ses propriétés mécaniques. Compte tenu des conditions du milieu, il est évalué que les revêtements et

massifs d'appui se dégradent lentement de manière concentrique depuis l'extérieur du massif vers l'intérieur. La perte de tenue mécanique suit un tel schéma, avec une perte progressive en couronne tandis que le cœur du massif préserve ses propriétés (pas d'effondrement). Cette évolution est représentée sur la Figure 6.2-8.

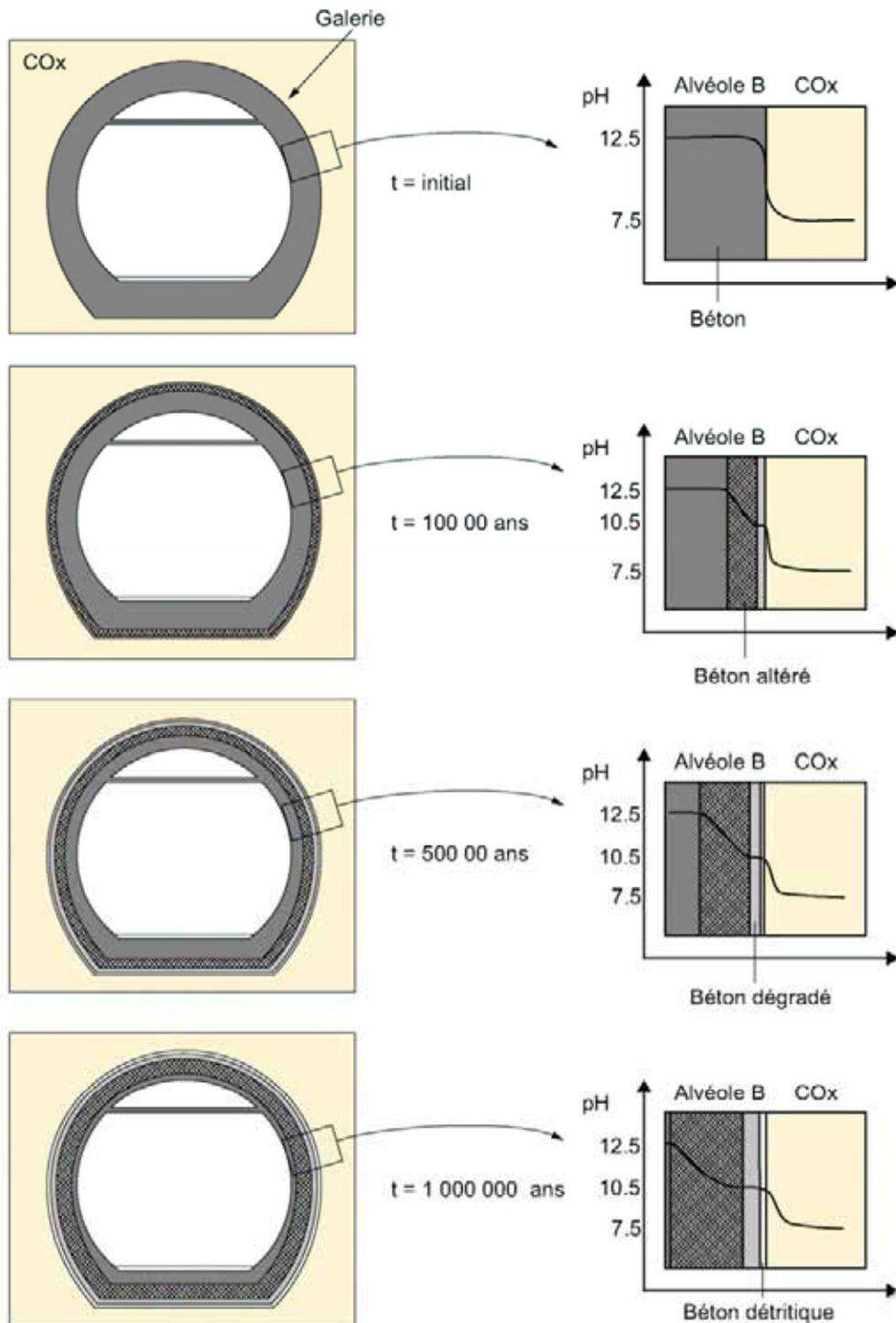


Figure 6.2-8 Représentation schématique de la progression de l'hydrolyse des matériaux cimentaires en paroi de galeries.

Le report de charge du Callovo-Oxfordien suit un schéma identique, il se fait progressivement vers le cœur du massif au fur et à mesure de la dégradation. Notons qu'il commence dès la phase

d'exploitation. Cependant le revêtement apparaît largement dimensionné pour des périodes séculaires ou plus [22]. La réduction de l'incertitude sur les vitesses de fluage de la roche permettrait, dans une éventuelle phase ultérieure du projet, de préciser les conditions d'évaluation de cette durée et d'optimiser le dimensionnement du revêtement.

Après dégradation du béton, l'évolution de la roche est contrainte par la présence du remblai en galeries, et des colis eux-mêmes dégradés dans les alvéoles de déchets B. Dans le premier cas, seul un comportement inattendu du remblai pourrait conduire à une évolution non attendue de l'EDZ. Dans le deuxième cas, la maîtrise des vides au sein de l'alvéole permet d'empêcher un sur-endommagement de la roche. Ces points sont dépendants de la qualité de mise en place des remblais et des colis, sujet qui sera abordé dans le cadre des incertitudes technologiques (paragraphe 6.2.12).

Si malgré tout la dégradation du béton venait à se produire plus vite que prévue, sans que le remblai puisse en prendre le relais, l'EDZ pourrait se trouver temporairement déconfinée, et voir sa perméabilité ou son extension s'accroître. Cette situation est peu vraisemblable, compte tenu du fait qu'elle suppose à la fois une saturation forte du revêtement (pour qu'il se dégrade) et faible du remblai. Elle est de ce fait difficilement quantifiable. On l'a « couverte » par une étude de sensibilité en scénario d'évolution normale, envisageant une perméabilité dégradée pour la zone fracturée (équivalente à 10^{-6} m/s, soit la perméabilité d'un sable, et à 5.10^{-9} m/s pour la zone microfissurée, moins directement exposée).

Comportement mécanique au contact des ouvrages en bentonite

La réhydratation de la bentonite des scellements provoque son gonflement. Après resaturation, le noyau argileux exerce une pression sur l'argilite. Cette pression de gonflement radiale contribue à limiter la convergence. Il ne pourrait donc y avoir déconfinement de la roche qu'en situation extrême de dégradation du noyau argileux qui ne pourrait alors plus développer la pression de gonflement. Compte tenu de la capacité de gonflement de la bentonite, cette situation est très peu vraisemblable, même en supposant que le scellement puisse être perturbé par des conditions chimiques peu favorables (ce point sera abordé au paragraphe 6.2.8.1). On a cependant choisi de retenir une situation de mauvais gonflement de la bentonite parmi les situations pouvant conduire au scénario d'évolution altérée « défaut de scellements ». Dans un tel cas, le défaut de soutien de la roche est représenté par un sur-endommagement (prise en compte de paramètres défavorables pour la zone fracturée et la zone endommagée) autour de l'ensemble des scellements.

On notera qu'un gonflement excessif du scellement pourrait endommager la roche. Cependant, les pressions estimées pour que cela se produise sont très fortes (supérieures à 15 MPa). Les caractéristiques de la bentonite permettent d'empêcher un tel phénomène. Les incertitudes sont très faibles à ce sujet. Si une telle situation se produisait néanmoins, elle se traduirait par une zone fracturée continue autour des scellements. Une telle situation de dimensionnement non maîtrisé des scellements, bien que très peu vraisemblable, est retenue pour la définition du scénario d'évolution altérée « défaut de scellements ». Elle conduit à un sur-endommagement de l'EDZ autour de l'ensemble des scellements.

Contact avec les éléments métalliques (alvéoles de déchets thermiques)

Dans le cas particulier des alvéoles de déchets C, la zone endommagée est au contact direct du chemisage métallique, lui-même proche du conteneur. Dans les alvéoles de combustibles usés avec barrière ouvragée, un revêtement métallique est également présent au contact de l'argilite. Les produits de corrosion de ces matériaux sont expansifs, et pourraient développer des pressions s'exerçant sur le milieu géologique. Les coefficients d'expansion attendus pour ce type de produits, ainsi que les jeux résiduels au sein de l'alvéole, sont a priori suffisants pour empêcher des actions mécaniques défavorables.

En tout état de cause, le calcul de sensibilité effectué en SEN vers des valeurs pénalisantes de perméabilité de la zone fracturée en section courante d'alvéole (10^{-6} m/s, zone fracturée assimilée à un sable) couvre tout effet non anticipé. En effet, par conception, on démonte le chemisage métallique à

proximité du bouchon avant de poser celui-ci. La pression de gonflement des produits de corrosion ne pourrait, dans le pire des cas, qu'endommager la section courante, et non la zone de contact entre le bouchon et la roche.

6.2.6.2 Incertitudes sur la prise en compte de l'effet mécanique des gaz

La question du devenir des gaz a été abordée au paragraphe 6.2.5.2, à propos des cinétiques de resaturation. On s'intéresse ici à la question de l'action mécanique des gaz, majoritairement l'hydrogène de corrosion, sur le comportement des différents composants du stockage.

Comme on l'a vu au paragraphe 6.2.5.2, les milieux qui entourent les alvéoles du stockage (l'alvéole elle-même, le bouchon, la galerie attenante, le milieu géologique) sont susceptibles de devenir des voies de propagation pour les gaz produits au sein du stockage. On les aborde donc successivement, par type de matériaux.

● Dans les argilites et dans l'argile gonflante

Pour ce qui concerne les argilites, les pressions à partir desquelles les gaz sont susceptibles d'interagir avec la roche ont été évaluées par analogie avec les mesures conduites dans les argiles à Opalinus par la Nagra en Suisse, et également par analogie avec la bentonite. Elle se situe à une valeur de 9 MPa. Au dessus de cette pression, le gaz peut agir sur la porosité de la roche et la dilater localement, créant ainsi l'équivalent de « microfissures » qui ne peuvent rester ouvertes que tant que la pression se maintient. Par nature même, ces phénomènes sont réversibles. La fracturation par le gaz, à des pressions supérieures, pourrait en revanche être susceptible de conduire à une modification irréversible de la structure de la roche. Une expérimentation a été conduite dans le laboratoire de Meuse / Haute-Marne, consistant à injecter en continu du gaz dans un forage jusqu'à atteindre la pression à laquelle le milieu géologique se fracture. La valeur mesurée est de 12 MPa. L'injection a duré plusieurs jours. A l'issue de l'expérience, la roche avait retrouvé sa perméabilité initiale à l'eau, du fait du fluage.

Il apparaît donc que les effets mécaniques des gaz sur la roche, tant la microfissuration que la fracturation, sont réversibles au regard des propriétés hydrauliques de celle-ci. De plus, les évaluations de production de gaz, pourtant conduites dans des conditions majorantes, montrent qu'on ne pourra dépasser 9 MPa, et donc que la fracturation du milieu par les gaz est exclue. Avec des cinétiques de production de gaz moins pénalisantes, il pourrait être possible, sous réserve d'évaluations complémentaires, d'éviter même toute forme de microfissuration.

Le comportement de la bentonite sous l'effet des gaz est similaire à celui décrit précédemment pour les argilites, et les conclusions sont donc les mêmes. La réversibilité de l'action mécanique des gaz est d'ailleurs favorisée par le caractère gonflant de cette argile.

Les argilites et la bentonite ne subissent donc pas d'effet mécanique irréversible lié aux gaz. Le SEN, qui ne prend pas en compte de tels effets, est de ce point de vue représentatif. Si, au titre de la gestion des incertitudes résiduelles, on suppose néanmoins que ce constat expérimental puisse être remis en cause, alors les effets seraient les suivants :

- sur les argilites, les zones a priori les plus fragiles (zones fracturées et microfissurées) pourraient connaître un sur-endommagement. Cela se traduirait par une dégradation de leurs propriétés hydrauliques. Un tel cas de figure a été envisagé en étude de sensibilité du SEN ;
- si même l'argilite saine était atteinte, ce qui paraît peu vraisemblable, dans une hypothèse où la microfissuration serait en fait irréversible, alors une zone endommagée continue pourrait se créer en champ proche des alvéoles, essentiellement de combustibles usés. L'endommagement provoquerait une chute de pression, et il ne pourrait donc se propager significativement dans la roche. Cependant, une zone fracturée locale se créerait autour de l'alvéole, voire contournerait le bouchon. Compte tenu des pressions plus faibles, il est encore moins vraisemblable qu'un tel effet se propagerait jusque dans les galeries et dans les puits d'accès. Néanmoins, une situation de contournement de l'ensemble des scellements par une zone fracturée continue représentée dans le cas d'un scellement de galerie par la Figure 6.2-9, a été envisagée en scénario d'évolution altérée « défaut de scellements » et couvre ce cas de figure ;

- un effet mécanique irréversible sur la bentonite ouvrirait des chemins privilégiés au sein du scellement – et de la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés - sous forme de fissures. Du point de vue hydraulique, il est indifférent qu'un tel cheminement se situe dans le cœur du massif en argile ou à l'interface avec la roche, et la situation ainsi créée est équivalente à un défaut d'interface entre le scellement et les argilites. Si l'endommagement du scellement devait être plus important (ce qui est très invraisemblable), alors il se traduirait par une dégradation de la perméabilité du scellement. Une telle situation de contournement des scellements non performants, associée à une dégradation de leur perméabilité d'ensemble, est envisagée en SEA « défaut de scellements ».

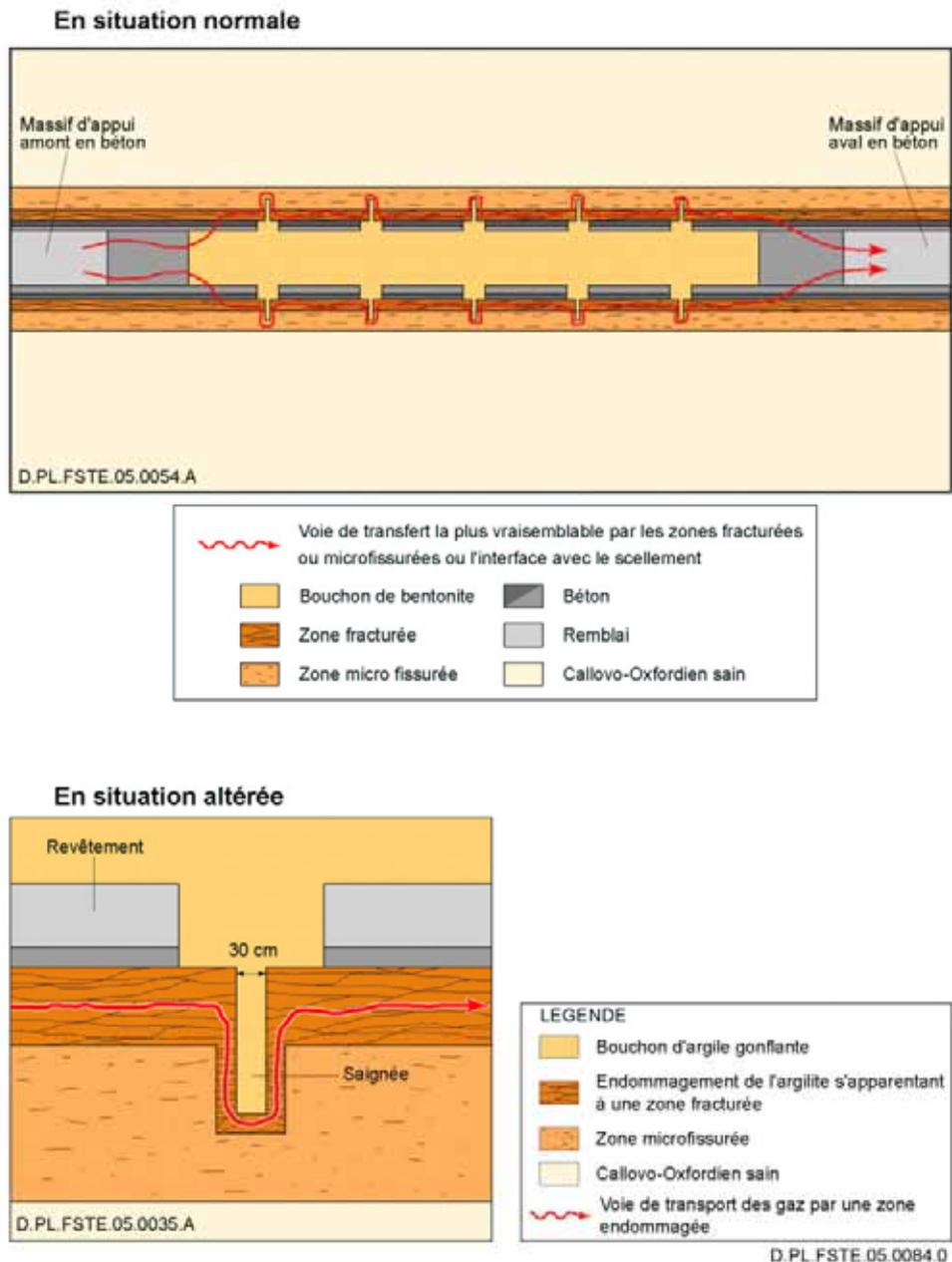


Figure 6.2-9

Situation hypothétique d'endommagement d'une coupure hydraulique de scellement par les gaz

● Effets sur les autres composants de l'alvéole

Le dimensionnement mécanique des conteneurs de déchets vitrifiés et de combustibles usés leur permet de résister aux gammes de pression envisagées.

Pour ce qui est des compléments de colisage en béton de déchets B, la montée en pression due à la production de gaz à l'intérieur des colis est gérée en exploitation par une non étanchéité des colis susceptibles de dégager de l'hydrogène (par exemple les colis contenant des déchets soumis à la radiolyse). A terme, en post-fermeture, les conteneurs contenant des déchets métalliques pourraient connaître une montée en pression par la corrosion interne des déchets. Ce phénomène n'entraînerait pas nécessairement un endommagement du colis avant 10 000 ans, date à laquelle on n'envisage plus de tenue mécanique. Cependant, ce point n'a pas fait l'objet d'études détaillées, et afin de couvrir de manière générale toute incertitude sur la tenue mécanique des compléments de colisage de déchets B, aucune propriété hydraulique – liée à leur tenue mécanique – ne leur est attribuée en SEN.

6.2.6.3 Synthèse sur les incertitudes relatives à la mécanique

Les incertitudes d'ordre mécaniques concernant l'extension à court terme, les caractéristiques et l'évolution à l'échelle du million d'années de la zone endommagée sont couvertes en scénario d'évolution normale par le choix d'un modèle « phénoménologique » mais associé à des paramètres conservatifs, prenant notamment en compte une profondeur maximale du stockage. On note que, s'il devait subsister des incertitudes sur l'extension de la zone endommagée initiale, elles seraient couvertes par conception, de par la possibilité d'interrompre l'EDZ par une coupure hydraulique sur des longueurs plus importantes que ce qui est retenu en SEN, ou par un traitement spécifique de la surface endommagée dans le puits.

Les incertitudes sur le modèle d'évolution à long terme sont couvertes par le fait que la roche est en permanence soutenue (par le revêtement, par le remblai, par les scellements). Dans ces conditions, une évolution défavorable de la zone fracturée renverrait à une incertitude sur les capacités de soutien d'un de ces composants. On a vu par exemple au paragraphe 6.2.5.2 un cas de manque de soutien par un remblai désaturé ; d'autres apparaîtront en analysant les incertitudes portant sur la chimie.

On note cependant qu'une évolution défavorable de la zone endommagée en section courante d'une galerie ou d'un puits ne conduit pas à une situation significativement différente de celle envisagée en SEN, comme l'ont montré les études de sensibilité sur la perméabilité de la zone endommagée (voir chapitre 5). Seule une dégradation de la zone microfissurée au droit des scellements, au-delà de la coupure hydraulique, peut conduire à les court-circuiter. Un tel cas est envisagé en sensibilité du SEN, et sera complété par un cas de figure correspondant à une zone fracturée continue le long de la totalité des ouvrages, en SEA « défaut de scellements ».

Enfin, on note que l'effet mécanique possible des gaz sur la zone endommagée est a priori réversible, et couvert en tout état de cause par l'étude de sensibilité qui suppose une dégradation de la perméabilité de la zone fracturée et de la zone microfissurée. Ce n'est que dans un cas irréaliste, car ne correspondant ni aux constatations expérimentales, ni aux gammes de pression attendues, que pourrait se produire une surfracturation de la roche ou des scellements, cas de figure couvert en SEA « défaut de scellements ».

6.2.7 Incertitudes sur les modèles de relâchement des matrices de déchets

Ce paragraphe et les suivants évoquent les questions liées à l'évolution chimique au sein du stockage, au sens large : comportement des colis de déchets, comportement des matériaux, perturbations induites par les matériaux sur la formation hôte.

6.2.7.1 Modèles de relâchements et comportement des colis de déchets B

On a vu que les modèles de relâchements retenus en scénario d'évolution normale pour les déchets B sont dans de nombreux cas équivalents à un relâchement instantané, faute de modèle ou d'observations adéquates (chapitre 5). On se contente d'évoquer ici les colis qui disposent d'un modèle de relâchement non labile, les incertitudes portant sur le relâchement par les autres déchets étant à l'évidence couvertes en SEN.

● Les déchets métalliques

La détermination d'un taux de relâchement pour les déchets métalliques se fonde sur l'attribution aux pièces métalliques activées des dimensions les plus faibles parmi celles qui peuvent être rencontrées dans ce type de déchets (par exemple, les structures irradiées en réacteur dans les colis types B1) et par l'attribution d'une vitesse de corrosion choisie comme représentative parmi les vitesses mesurées en situation anoxique. Ces vitesses supposent par conséquent que les colis sont isolés de l'oxydation pendant le temps où les alvéoles y sont soumises (c'est-à-dire pendant la phase d'exploitation et de ventilation de l'alvéole). L'étanchéité offerte par les colis y pourvoit.

A titre de précaution, un relâchement labile a été testé en analyse de sensibilité du SEN pour couvrir plus complètement les incertitudes sur ce point.

● Les déchets bitumineux

L'aptitude du bitume à immobiliser les radionucléides est retraduite par un modèle de relâchement. Deux modèles, appelés COLONBO 2 et COLONBO 3, ont été développés pour décrire le relâchement des radionucléides suite à la reprise d'eau par les sels solubles (la phénoménologie qui les sous-tend est illustrée par la Figure 6.2-10). Le scénario d'évolution normale retient le modèle COLONBO 3 en référence, et un modèle pénalisant piloté uniquement par la reprise d'eau en étude de sensibilité.

Le modèle COLONBO 3 repose sur la capacité du bitume à contrôler la reprise d'eau et tient compte de la limitation du transfert des radionucléides et toxiques chimiques dans la zone perméable ainsi créée, sans prendre en considération la limitation de transfert des radionucléides : ceux-ci sont supposés instantanément solubilisés et relâchés à l'extérieur de l'enrobé.

Le processus de dégradation conduit à un relâchement en racine carrée du temps fondé sur l'activité de l'eau à saturation avec les sels solubles du bitume et le coefficient de diffusion de l'eau dans la zone perméable. Les valeurs retenues sont issues de mesures spécifiques.

COLONBO 3 repose par ailleurs sur un certain nombre d'hypothèses, qui sont détaillées dans le référentiel consacré aux modèles de relâchement [20] et dont les principales sont :

- la teneur en sels solubles de l'enrobé, qui doit être comprise entre 2 et 22 % ;
- les dimensions initiales de l'enrobé, le modèle prenant en compte le gonflement ultérieur engendré par la reprise d'eau ;
- la température du bitume, sur l'ensemble de sa durée de vie, qui ne doit pas dépasser significativement 30°C, température en dessous de laquelle la vitesse de sédimentation des sels reste négligeable (moins de 7 µm/an) ;
- le pH, qui doit être compris entre 7 et 12,5 : ce domaine de validité couvre la gamme de pH imposée par le colisage en béton ;
- la géométrie du bitume. Les modèles ne s'appliquent que si le gonflement par reprise d'eau est laissé libre. Or cette exigence peut ne pas être respectée. En effet, le gonflement attendu pour les colis B2.1 est supérieur au volume libre disponible dans les colis. Le problème se pose également pour le colis B2.2 pour lequel il est prévu de remplir intégralement le vide interstitiel entre le fût et le surfût. D'après une étude du CEA qui reste à confirmer, l'existence d'une contrainte au gonflement devrait cependant limiter la cinétique de reprise d'eau et par conséquent le relâchement des radionucléides.

On note que le modèle COLONBO 3 couvre en revanche une éventuelle fissuration du bitume.

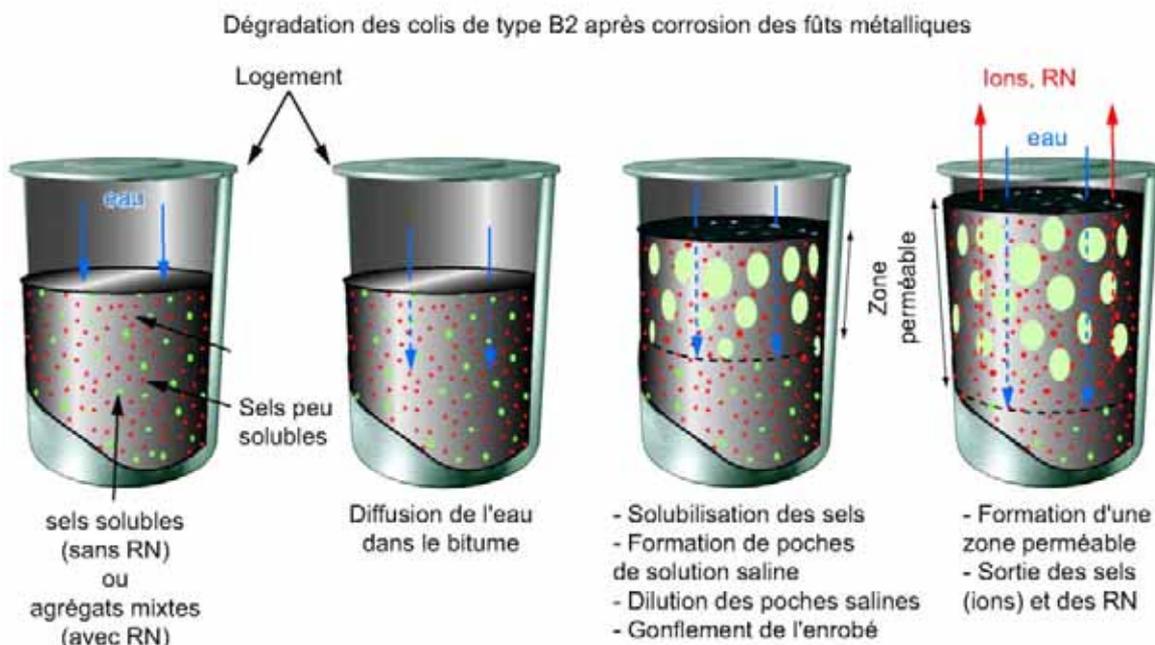


Figure 6.2-10 Schéma de principe des modèles de relâchement pour les boues bitumées

Du fait de ces hypothèses, COLONBO 3 est a priori applicable :

- à l'ensemble de la production des bitumes issus du traitement des effluents dans l'atelier STE3 de La Hague, produits sous assurance qualité et dont les caractéristiques peuvent être comparées aux conditions d'applicabilité du modèle (soit plus de 10 000 fûts) ;
- à l'ensemble de la future production des bitumes résultant du traitement des effluents de la station STE2. La plus forte concentration en radioactivité, par rapport à celle retenue pour les bitumes de STE3, pourrait induire une dose intégrée plus forte et un comportement mécanique différent, mais le modèle COLONBO 3 est peu sensible à ces différences (40 000 fûts) ;
- à une large partie des bitumes anciens de Marcoule, bien qu'une fraction puisse, du fait de teneurs en sels particulières ou par des conditions d'entreposage défavorables, sortir du cadre du modèle.

Le modèle rend donc compte de la grande majorité de l'inventaire, il est représentatif à l'échelle du calcul de performances global. Il peut ne pas rendre compte des relâchements de certains fûts d'enrobés, mais ces incertitudes sont couvertes par une étude de sensibilité vers un modèle « pénalisant » ne se fondant que sur la reprise d'eau. Ce modèle est également insensible à d'éventuelles déformations du bitume, si la géométrie de ce dernier s'avérait difficile à maîtriser. Les incertitudes sur le comportement à long terme du bitume sont donc bien couvertes en scénario d'évolution normale.

Les bitumes sont également susceptibles de relâcher des complexants, majoritairement des oxalates, mais également du tributyl-phosphate qui a pu être conditionné au sein de la matrice (cas de certains bitumes anciens de la STEL de Marcoule) ou divers produits de dégradation. Des incertitudes existent sur la nature et les quantités de complexants relâchés à long terme, mais dans la mesure où il s'agit de molécules organiques, il a été vérifié que leur effet est limité dans un contexte alcalin. La fonction « filtrer les colloïdes » (voir chapitre 3) permet également d'empêcher les complexes éventuellement formés de quitter le champ proche. Les incertitudes sur le transport par les colloïdes sont évoquées au paragraphe 6.2.10.

Les bitumes sont également une source potentielle de relâchement d'acides organiques, de sulfates et de nitrates. Les effets de l'attaque sulfatique induite sur le béton font l'objet d'incertitudes, et

pourraient avoir une influence à long terme sur la résistance du complément de colisage. Les acides pourraient avoir un effet similaire, bien qu'ils soient a priori tamponnés par le milieu environnant. Le colisage peut de plus être soumis à l'action mécanique due au gonflement des bitumes suite à la reprise d'eau. Notamment pour ces raisons, le complément de colisage ne se voit pas attribuer de fonction de sûreté particulière qui requerrait sa tenue mécanique à long terme.

Les nitrates, combinés à des microorganismes, pourraient modifier localement le potentiel redox au sein de l'alvéole, ayant ainsi une influence sur la solubilité de certains radionucléides. Ce phénomène serait de peu d'ampleur du fait de l'environnement alcalin, peu favorable au développement des microorganismes, et resterait confiné dans l'environnement immédiat du bitume, qui est la principale source de nutriments. Cet effet local est négligeable à l'échelle de l'alvéole, compte tenu des quantités de béton en place dans l'alvéole. L'étude de sensibilité conduite en SEN sur les paramètres géochimiques dans les alvéoles de déchets B (béton compris) couvre de manière très pénalisante cette incertitude et a permis de montrer qu'elle n'avait que peu d'effet sur l'impact⁸².

6.2.7.2 Terme source et comportement à long terme des déchets vitrifiés

Les modèles retenus pour le calcul de performances varient selon les familles de déchets vitrifiés, et ont été présentés au chapitre 5.

Le comportement à long terme des verres C1, C2, C3 et C4 pourrait être marqué par un changement de régime à long terme, du fait de la saturation progressive du milieu en silice, qui induit d'après les observations du CEA le passage d'un régime de dissolution selon la vitesse initiale « $V_0.S$ » à une lixiviation selon une vitesse résiduelle « V_r ». Les causes et les conditions du passage d'un régime à l'autre, et le fait que ce phénomène soit applicable à d'autres types de verres que ceux qui ont fait l'objet de l'essentiel des études (les verres « C1 » du MID, c'est-à-dire les verres produits actuellement dans les ateliers R7/T7) ne sont pas encore totalement établis. Les observations sont concordantes pour montrer que, à partir du moment la concentration en silice atteint un équilibre entre le verre et son environnement immédiat, et à condition que le verre soit placé dans des conditions diffusives, la vitesse de dissolution diminue. L'explication retenue en référence par le CEA fait appel à la formation d'un gel protecteur, solidaire de la surface du verre. L'Andra retient le modèle « $V_0.S \rightarrow V_r$ » en référence pour les verres C1 ainsi que pour ceux produits au-delà des C1 (dont il est raisonnable de supposer qu'ils seront d'une qualité au moins équivalente); afin de couvrir les incertitudes sur le modèle, les calculs du scénario d'évolution normale ont retenu, en référence pour les autres verres et en sensibilité pour les C1, C2, C3 et C4, un modèle « $V_0.S$ ».

Dans les alvéoles C, la corrosion anoxique des conteneurs, chemisages ou intercalaires immédiatement à proximité des colis produit des oxydes ou hydroxydes (de type magnétite, voire sidérite) sans silice dans leur structure. Ils ne sont donc pas susceptibles de perturber l'équilibre en silice du milieu. Néanmoins, afin de couvrir toute incertitude sur ce point, le modèle « $V_0.S \rightarrow V_r$ » tel qu'il est appliqué en scénario d'évolution normale suppose que les produits de corrosion ont une capacité de sorption de la silice élevée (égale à celle de la goéthite), ce qui retarde le moment où la vitesse « V_r » peut s'appliquer. Ce choix couvre l'incertitude sur l'environnement chimique du verre.

Par ailleurs, la valeur de la vitesse initiale de dissolution, et sa dépendance par rapport au taux de fracturation du verre, à la température et au pH peuvent faire l'objet d'incertitudes.

La valeur de « V_0 » est retenue parmi celles représentatives mesurées par le CEA, pour les différents types de déchets existants, en fonction des résultats expérimentaux. Pour les verres C2, et éventuellement C3 et C4, des programmes d'évaluation du comportement à long terme pourront être conduits quand on disposera de colis réels.

L'incertitude sur la dépendance au pH de la dissolution est prise en compte dans le SEN en considérant de manière conservatrice un pH de 9. Compte tenu de l'éloignement de toute source de perturbation alcaline en situation normale (du fait du rôle de tampon exercé par le bouchon), ce choix

⁸² On note que cette étude n'a pas été conduite sur les déchets B2 mais sur les alvéoles B1x, qui contribuent plus à l'impact. Les conclusions de l'étude sont cependant valables pour l'ensemble des déchets B.

est conservatif. Il prend notamment en compte les incertitudes sur la composition des eaux du Callovo-Oxfordien, ainsi que les effets – mineurs – sur le pH des matériaux contenus dans l'alvéole (métaux, bentonite).

Le taux de fracturation n'est pas accessible à une mesure directe sur colis. Partant de ce constat, on peut identifier différentes origines d'incertitudes :

- la variabilité de la fracturation interne initiale du verre, qu'il est difficile de caractériser ;
- les conditions de manutention du verre lors de son transport et de sa mise en stockage, qui peuvent induire soit des chocs, soit des modifications du champ de contrainte interne. Il est peu vraisemblable qu'elles conduisent à un endommagement de la matrice vitreuse.

Ces incertitudes sont couvertes en scénario d'évolution normale par une analyse de la sensibilité au taux de fracturation des verres C1, en adoptant la valeur la plus haute (40) mesurée par le CEA. Cette valeur correspond à des échantillons de verre en vrac et constitue une borne haute raisonnable.

6.2.7.3 Terme source et comportement à long terme des combustibles usés

Il convient de distinguer les combustibles usés standardisés, issus du parc électronucléaire REP d'EDF, UOx ou MOX d'une part, de ceux issus des activités de Recherche et de Défense nationale, qui sont plus divers.

● Les combustibles usés issus du parc REP

Les modèles de relâchement proposés s'appuient sur le comportement des différents matériaux. De manière générique, on observe que les différences de comportement d'un combustible à un autre peuvent être dus :

- à la nature de la matrice et du combustible, ce qui suppose de considérer différemment les combustibles UOx et MOX ;
- au taux de combustion, ce qui conduit à prendre en compte ce paramètre dans les études ;
- de manière plus marginale, au nombre de cycles en réacteur. L'influence de ce paramètre reste moins bien définie, et à ce stade des études il est couvert en appliquant aux modèles de relâchement de l'ensemble des combustibles un taux de combustion uniforme, le plus élevé.

L'étude du relâchement de la radioactivité contenue dans les combustibles usés fait appel à deux types de phénomènes : ceux liés à la corrosion des parties métalliques du combustible, pouvant être activées lors du passage en réacteur, et la dissolution de la matrice combustible à proprement parler.

Pour ce qui relève des pièces métalliques, les incertitudes portent sur la détermination de la vitesse de corrosion. Cela renvoie à la maîtrise, de manière générale, de la corrosion au sein des alvéoles (estimation de la vitesse de corrosion, homogénéité chimique au sein des alvéoles), dans ce cas particulier en conditions irradiantes. Des vitesses de corrosion conservatives, enveloppes des résultats expérimentaux, ont été proposées pour les pièces en acier, en zircaloy et en inconel. L'effet transitoire de la radiolyse due à l'irradiation issue du combustible est pris en compte. Ces vitesses correspondent à des conditions réductrices. En effet, les combustibles sont protégés pendant au moins 10 000 ans, voire plus en fonction de la durée de vie effective du conteneur ; quand ils se trouvent finalement exposés aux conditions chimiques de l'alvéole, le transitoire vers l'état réducteur est terminé depuis très longtemps.

La répartition de l'activité sur les pièces métalliques est une autre source d'incertitudes, particulièrement dans la mesure où elle dépend des conditions d'irradiation dans le cœur du réacteur, conditions qui peuvent varier. Les choix retenus par l'Andra consistent à considérer que l'activité est répartie de manière homogène, ce qui n'induit pas de biais important dans la mesure où les dimensions des pièces sont par ailleurs minimisées. Lorsque le comportement du matériau est plus difficile à maîtriser (ce qui est le cas des possibles couches de zircone formées sur les gaines), le terme source correspondant est supposé labile.

Le comportement de la matrice du combustible est plus complexe à modéliser et fait appel à plusieurs phénomènes sur lesquels l'Andra a eu une approche conforme aux pratiques internationales, en tâchant toujours d'adopter une démarche majorante. En particulier :

- la dissolution de la matrice est évaluée à partir des effets de la radiolyse alpha. Ce phénomène est en effet retenu comme prépondérant à ce stade des études. Les analyses conduites à l'international tendent cependant à remettre en cause ce modèle, qui suppose la permanence de conditions oxydantes dans l'environnement immédiat du combustible usé, et à privilégier un modèle piloté par la dissolution classique de la matrice d'uranium. Celui-ci conduit à des durées de vie nettement supérieures ;
- la cinétique d'oxydation de la matrice sous l'effet du rayonnement est négligée. On suppose que les réactions sont instantanées, ce qui n'est pas conforme aux expérimentations [66] mais pénalisant ;
- les parties les plus difficiles à modéliser de la matrice (l'activité contenue dans les joints de grains, les pores et les fissures) sont supposées labiles. Cette hypothèse correspond à la meilleure estimation dans certains cas (tel que pour le gap, par exemple) mais est certainement pénalisante dans d'autres (pour les gains du rim, notamment) ;
- la dissolution accélérée par auto-irradiation alpha (D3AI) est prise en compte par l'intermédiaire d'une valeur de coefficient corroborée par différents modèles. On ne s'attend pas à un effet significatif de ce phénomène, qui ne concerne qu'une fraction des noyaux légers. Pour en maximiser les effets, on l'a appliqué à l'ensemble de la matrice de combustible, ce qui conduit à réduire la durée de vie du combustible de manière importante et pénalisante.

Le modèle ainsi obtenu dépend in fine essentiellement des conditions d'environnement (pH, température). Au stade actuel des connaissances, il est nécessaire pour la validité du modèle que le pH soit inférieur à 9, ce qui est assuré par le concept, et l'éloignement de toute source de perturbation alcaline (absence de matériaux cimentaires dans l'alvéole). Le comportement du combustible usé à des pH supérieurs est aujourd'hui peu connu ; il ne devrait cependant pas être soumis à de telles conditions, du fait de la présence du bouchon et de la barrière ouvragée qui ont un rôle de tampon chimique.

Au terme de cette analyse, il apparaît que les modèles de relâchement retenus en scénario d'évolution normale couvrent les incertitudes par des choix conservatifs. Parmi ceux-ci, on distingue en particulier la prise en compte d'une dissolution radiolytique, hypothèse qui apparaît pénalisante au regard des résultats de la recherche. En effet, la prise en compte de facteurs inhibant cette réaction (en particulier l'hydrogène présent dans l'environnement du combustible usé, qui imposerait des conditions réductrices), pourrait conduire à adopter un modèle fondé sur la dissolution « classique » de la matrice d'uranium. Une étude de sensibilité réalisée en SEN sur ce thème montre que l'adoption d'un tel modèle procurerait un gain significatif sur l'impact.

● **Les autres combustibles usés**

Les combustibles usés de Recherche et de Défense sont plus variés que ceux issus des réacteurs REP, tant dans leur forme physico-chimique que dans leur inventaire radiologique. Afin de couvrir les incertitudes sur le modèle de relâchement qui pourrait leur être applicable, il a été retenu à ce stade des études de les considérer comme labiles.

6.2.7.4 Synthèse sur les incertitudes portant sur les modèles de comportement des déchets

Les modèles de relâchement retenus en scénario d'évolution normale, dans le calcul de référence, couvrent largement les incertitudes sur les déchets dont le comportement est incertain, par des choix volontairement pénalisants : termes sources labiles dès que la nature chimique est mal maîtrisée, minimisation des tailles des déchets métalliques, non prise en compte de propriétés a priori favorables du bitume, modèle conservatif appliqué aux verres dont le comportement est le moins bien connu, non prise en compte de phénomènes favorables à la limitation des relâchements par le combustible usé.

La validité de ces modèles de relâchements ne renvoie à des incertitudes résiduelles que dans certains cas spécifiques. Pour ne citer que les principaux, on retient que, de manière générale, la part de l'inventaire correspondant aux déchets les plus anciens pose la question de l'applicabilité des modèles de relâchements, en l'absence d'une caractérisation précise de leur état actuel. Dans le cas particulier des déchets bitumineux, le modèle pourrait n'être pas stricto sensu applicable à l'ensemble de la production des déchets anciens, mais cela ne représente qu'une fraction marginale de l'inventaire total. Les verres anciens se voient appliquer un modèle de type « $V_0.S$ » majorant, par défaut.

Les études de sensibilité représentent quant à elles une vision volontairement très pessimiste de ces mêmes relâchements : relâchements labiles pour les déchets B métalliques, modèle de relâchement simplifié à l'extrême pour les bitumes, fondé uniquement sur leur capacité de reprise d'eau à l'exclusion de tout autre phénomène, application de vitesses constantes et conservatives à l'ensemble des déchets vitrifiés.

L'analyse ne fait pas apparaître directement de cause de défaillance des fonctions, ni de situation sortant de ce qui est considéré en SEN. Cependant, certains modèles de relâchements ne sont valables que sous réserve d'un contrôle des conditions hydrauliques et chimiques dans les alvéoles. Si, du fait d'une autre incertitude, ces conditions venaient à changer, il conviendrait d'adapter le terme source. En particulier :

- dans toute situation pouvant conduire à un régime convectif dans les alvéoles de déchets C, il faut adapter le terme source en conséquence, en retenant un régime « $V_0.S$ ». Pour cette raison, et même s'il devait s'avérer que le régime dans les alvéoles restât diffusif, on adoptera ce terme source en scénario « défaut de scellements » et en scénario « forage » dans les alvéoles impactées, par prudence ;
- dans les situations où le pH peut augmenter et sortir du domaine de validité des études (donc pour des pH supérieurs à 9), toujours dans les alvéoles de déchets C, on adapte le terme source en retenant un terme plus fort.

6.2.8 Incertitudes sur l'évolution à long terme des matériaux

On traite ici d'abord de l'évolution des matériaux exogènes une fois qu'ils sont placés au sein de la roche hôte. Si celle-ci peut avoir une influence sur leur évolution, le phénomène en question est mentionné. Les perturbations induites en retour par les matériaux sur la roche sont évoquées dans un deuxième temps.

6.2.8.1 Comportement à long terme des éléments ouvragés en bentonite

Le comportement mécanique de la bentonite se caractérise par sa plasticité et sa capacité de gonflement lorsqu'elle se resature. C'est cette capacité qui est utilisée pour ancrer les scellements, combler les éventuels jeux de mise en place entre les briques ou les anneaux de bentonite mis en place. Il n'y a pas d'incertitude identifiée sur la tenue des éléments en bentonite en tant que telle, dans la mesure où ils sont constitués d'ensembles homogènes d'un matériau simple, bien caractérisé. Les incertitudes peuvent porter sur en revanche sur l'interaction avec les eaux du milieu.

La variabilité de composition des eaux du Callovo-Oxfordien est à prendre en compte pour étudier le comportement des scellements. Elle peut provenir de la variabilité naturelle à l'échelle du site, ou de modifications apportées par la phase d'exploitation du stockage préalablement à la fermeture, et plus particulièrement par la phase oxydante.

En particulier, le potassium contenu dans les eaux porales peut favoriser une transformation de la smectite en illite, minéral non gonflant qui peut diminuer sensiblement la capacité de gonflement du scellement. Ce processus est peu vraisemblable, les évaluations de composition géochimique de la roche mettant en évidence, dans tous les cas de figures, de faibles concentrations en potassium des eaux porales du Callovo-Oxfordien. Dans le cas du scellement de puits, qui pourrait être resaturé en partie haute au moins partiellement par des eaux issues de l'Oxfordien, la longueur du noyau de bentonite est suffisante pour limiter l'influence de ces eaux à une épaisseur non significative.

Les effets du calcium se limitent à des modifications de smectite sodique en smectite calcique. Si la smectite calcique est toujours un minéral gonflant, cet échange cationique peut cependant réduire son potentiel de gonflement. On peut imaginer que lors de la resaturation une partie significative des smectites deviennent calciques. La pression de gonflement développée par le massif argileux pourrait alors être légèrement dégradée mais pas au point d'altérer les performances hydrauliques minimales requises [69].

Pour tenir compte néanmoins de ces incertitudes, on peut envisager deux situations de défaillance conduisant à une inefficacité des scellements :

- une première qui consiste à envisager que l'influence des eaux de l'Oxfordien sur le scellement des puits soit plus forte qu'attendu. Cette situation irréaliste pourrait conduire à un non gonflement du scellement. Dans un tel cas, le scellement n'assurerait plus le contact avec la roche en paroi du puits. On considère en scénario d'évolution altéré « défaut de scellements » un contournement du scellement de puits par une zone fracturée fictive, dont on dégrade en sensibilité les performances. Un tel calcul couvre la situation envisagée ici ;
- une deuxième situation pourrait résulter d'une mauvaise anticipation de l'influence des eaux calciques sur les scellements. L'ensemble des scellements du stockage pourrait, dans un tel cas de figure très peu probable, ne pas gonfler de manière suffisante. Cette situation est couverte en scénario d'évolution altérée « défaut de scellements », qui considère un mauvais comportement de ces ouvrages et leur contournement par une zone fracturée continue.

La resaturation des ouvrages par les eaux du Callovo-Oxfordien peut être perturbée dans le temps par d'éventuels couplages avec la dégradation progressive des composants du stockage. En particulier, les fluides resaturant notamment la bentonite peuvent avoir traversé une zone de Callovo-Oxfordien perturbée, des bétons, et des éléments métalliques. Ces perturbations, alcaline, ferreuse ou éventuellement induite par la silice, sont de plus potentiellement accélérées par la température, pour les scellements proches des alvéoles de déchets vitrifiés et de combustibles usés. Ces effets sont évoqués conjointement avec les perturbations portant sur les argilites, dans la mesure où ils sont de même nature. On se reportera aux paragraphes 6.2.8.4 et 6.2.8.5.

6.2.8.2 Comportement à long terme du béton

Dans les alvéoles B, le béton maintient une gamme de pH adéquate et des conditions réductrices qui favorisent une corrosion lente des déchets métalliques. Il y a peu de doute sur la capacité du béton à maintenir un pH supérieur à 10, compte tenu des quantités introduites et du caractère peu agressif des composants qui l'entourent. Le Callovo-Oxfordien présente un pH proche de la neutralité. Seuls certains déchets B, tels par exemple les bitumes, pourraient relâcher des acides organiques en se dégradant. Les quantités sont faibles et ne remettent pas en cause le pH global au sein de l'alvéole.

Le béton a également une fonction mécanique transitoire de soutien des ouvrages, associée à son comportement chimique. L'Andra a développé un modèle d'états successifs du béton pour décrire son évolution chimique et mécanique [67]. Ce modèle se fonde sur la prise en compte de l'hydrolyse du béton, conduisant à la dissolution successive des différents minéraux constitutifs : les oxydes d'alcalins et d'alcalino-terreux dans un premier temps, la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) puis les silicates de calcium hydratés (CSH). La Figure 6.2-11 montre l'évolution du pH en fonction des différentes phases.

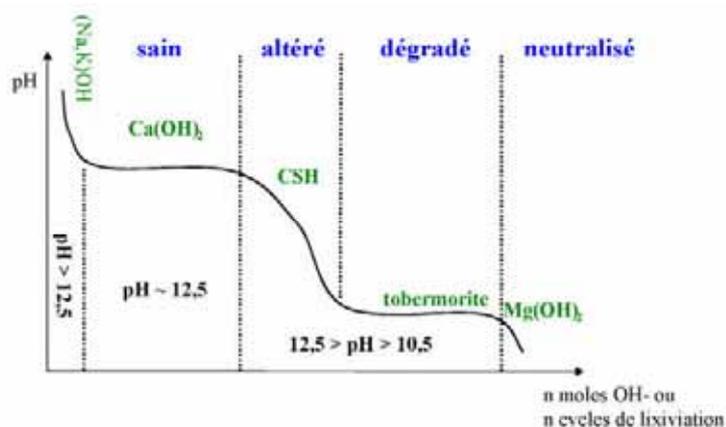


Figure 6.2-11 Evolution de l'état chimique des matériaux cimentaires

Il demeure des incertitudes sur le lien entre les états mécaniques du béton et ces différents états chimiques, du fait de la difficulté d'extrapoler les modèles élaborés à partir de tests ou d'essais de courte durée sur des échelles de temps importantes.

Les concepts ne s'appuient donc pas sur la tenue mécanique à long terme du béton dans les configurations où celle-ci ne peut être garantie, et aucune fonction n'est attribuée en référence au béton qui fasse appel à une capacité particulière de tenue. On notera cependant que la résistance mécanique des massifs d'appui en béton est utile pour confiner les scellements pendant leur resaturation (quelques millénaires au plus, ce qui ne pose pas de difficulté).

De même, la tenue du revêtement assure le soutien de la roche avant que d'autres composants (le remblai dans les galeries, le remplissage et les colis sous-jacents dans les alvéoles de déchets B) ne prennent le relais.

Dans un cas comme dans l'autre, l'incertitude est alors reportée sur la cinétique de dégradation du béton, qui doit être suffisamment lente au regard des autres processus, et sur la capacité du milieu à redistribuer et reprendre les efforts après perte de la fonction mécanique. Dans le cas particulier des alvéoles de déchets B, qui est le plus critique car ne faisant pas appel au gonflement d'un autre matériau pour compenser la perte du béton, les évaluations montrent que l'on peut compter sur une tenue du revêtement sur des durées longues, de l'ordre de la dizaine de milliers d'années [63]. La convergence lente du milieu géologique qui résulterait d'un défaut de revêtement serait arrêtée par la masse de matériaux et compensée par le fluage de la roche, qui tendrait en principe plutôt à refermer les fissures qu'à les aggraver. Les vides sont limités au sein des alvéoles de déchets B, à cet effet.

Le complément de colisage pour les déchets B est pour sa part conçu avec un objectif d'obtenir la meilleure durabilité possible, en privilégiant une réalisation la plus stable possible dans le temps et la moins sensible aux agressions externes. Cela permet notamment d'assurer la réversibilité du stockage des déchets B pendant de longues périodes, en garantissant l'intégrité du colis en vue de son retrait. Les techniques mises en œuvre pour sa réalisation laissent envisager que l'on puisse, à terme, atteindre pour certains colis une durabilité mécanique très significative, permettant une intégrité du colis pendant une période allant jusqu'à 10 000 ans (pour les colis qu'il sera possible de rendre étanches aux gaz). Cette possibilité a été prise en compte dans le scénario d'évolution normale à titre de variante, mais n'est pas retenue en référence.

Le béton est également en SEN une voie de transfert pour les radionucléides. L'évolution des paramètres de transport au cours du temps sont pris en compte dans le scénario d'évolution normale en utilisant des valeurs de porosité, de diffusion et de perméabilité conservatives pour couvrir les incertitudes.

Le béton est enfin susceptible de subir des agressions chimiques par le milieu géologique et les déchets, en plus de l'hydrolyse qui est le phénomène pris en compte dans le modèle de dégradation. Une géochimie défavorable vis-à-vis des bétons pourrait résulter d'une augmentation forte, mais

transitoire, des teneurs en sulfates liées à l'oxydation de la pyrite de l'argilite ; elle pourrait accélérer la dégradation du massif. Ce processus n'aurait que peu d'incidence, car de telles concentrations seraient transitoires. Un effet similaire pourrait être provoqué par les solutions porales du remblai dont la formulation contient une forte proportion d'argilite remaniée, donc potentiellement « oxydée » après entreposage en surface. Il n'est cependant pas attendu une perte de la tenue mécanique suffisamment rapide pour remettre en cause la tenue du béton à l'échelle millénaire. Les composés agressifs issus des déchets (sulfates, acides, etc..) seraient consommés par le béton placé à proximité des déchets, qui est en quantité suffisante pour que d'éventuelles réactions ne remettent pas en cause la stabilité de l'alvéole. Les spécifications du béton prennent en compte une résistance à ces agressions chimiques [67].

Aucune de ces incertitudes n'est de nature à remettre en cause la représentation retenue en scénario d'évolution normale. Néanmoins, au titre d'une couverture plus complète des incertitudes, on peut envisager une situation dans laquelle on accélère drastiquement les processus de dégradation du béton, pour couvrir complètement les incertitudes sur le modèle d'évolution. Une telle dégradation prématurée pourrait toucher les composants ayant une fonction mécanique :

- les revêtements, qui ont une fonction de protection mécanique de l'EDZ le temps que l'équilibrage mécanique se fasse avec le remblai ;
- les massifs d'appui des scellements, qui ont pour rôle de confiner ceux-ci pendant qu'ils se resaturent.

Une dégradation accélérée des bétons induirait donc une situation altérée, se traduisant dans la vision la plus pessimiste par une dégradation de la zone endommagée, mal soutenue, et par une non efficacité des scellements, mal confinés par un massif d'appui défaillant. Cette situation constitue un cas extrême sans réelle vraisemblance. Elle est envisagée cependant en scénario d'évolution altérée « défaut de scellements », où l'ensemble des scellements ne parvient pas à interrompre une zone endommagée par ailleurs dégradée. Elle couvre à la fois les incertitudes sur le lien entre la chimie du béton et sa tenue mécanique, et les éventuels problèmes d'attaque chimique (notamment sulfatique).

6.2.8.3 Comportement à long terme des éléments métalliques

Le comportement à long terme des éléments métalliques (chemisages, conteneurs, différents éléments tels que les ferrallages, boulonnages, etc.) est dominé par la corrosion. A court terme, celle-ci peut être influencée par les conditions transitoires régnant au sein du stockage (transitoire redox, transitoire thermique, etc.). Elle dépend aussi de l'homogénéité chimique au sein des alvéoles. On commence cependant par aborder la question de la corrosion en milieu homogène et anoxique, avant d'aborder les écarts possibles par rapport à cette situation.

● Modèles de corrosion à long terme

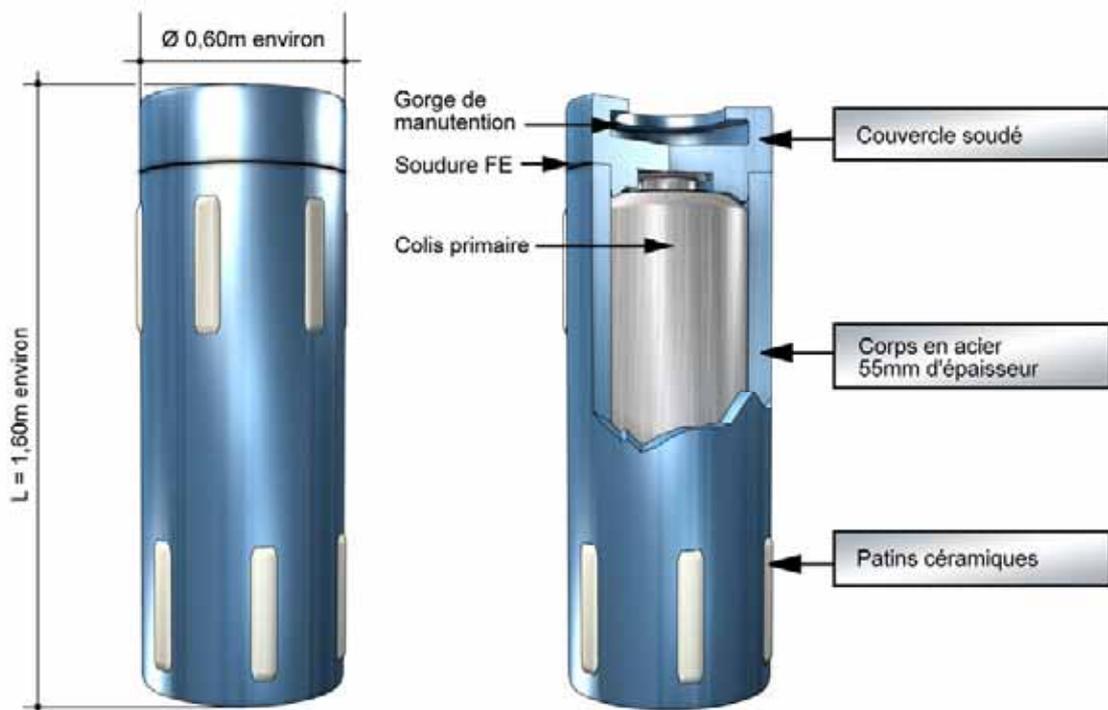
On traite ici essentiellement des conteneurs de combustibles usés et des surconteneurs de déchets vitrifiés, ainsi, en tant que de besoin, des autres éléments métalliques contenus dans les alvéoles de déchets thermiques.

Les modalités de corrosion (généralisée, par piqûre...) et les vitesses associées ont fait l'objet d'études abondantes tant en France qu'à l'étranger, dans le cadre des études sur le stockage des déchets radioactifs ou dans d'autres contextes [19]. De plus, dans ce domaine, on dispose d'expérimentations nombreuses. Des analogues archéologiques existent, et mettent en évidence des vitesses de corrosion très faibles, sur des durées parfois millénaires, alors même que les conditions qu'ils ont subies sont en général oxydantes.

De manière générale, à conditions physico-chimiques définies, les vitesses de corrosion présentent peu d'incertitudes. L'Andra a retenu des valeurs (quelques microns au plus en ambiance anoxique, quelques dizaines de microns au plus en ambiance oxydante) enveloppes des vitesses constatées.

L'incertitude porte en revanche sur les conditions dans lesquelles la corrosion des composants métalliques du stockage va se dérouler. La conception du stockage prévoit des dispositions permettant d'une part d'assurer cette homogénéité, d'autre part de favoriser des conditions anoxiques, qui limitent

les vitesses. Le soin apporté à la réalisation des alvéoles, la présence de patins de céramique (voir Figure 6.2-12) isolant les conteneurs du chemisage (pour éviter une corrosion localement accélérée par un effet de contact) sont autant d'éléments favorables. Les intercalaires ajoutés au sein des alvéoles, pour gérer la thermique, seraient réalisés dans un métal identique à celui des conteneurs, pour favoriser encore l'homogénéité. Par ailleurs, les dispositions prévues – la mise en place d'un capot d'étanchéité à l'entrée des alvéoles de déchets vitrifiés et de combustibles pendant le temps où elles ne sont pas encore fermées de manière définitive – permettent de limiter le renouvellement d'air dans l'alvéole et d'empêcher des conditions oxydantes de perdurer, même pendant l'exploitation. Elles permettent également de limiter le renouvellement de l'azote de l'air, et par conséquent la formation d'acide nitrique par radiolyse (qui peut augmenter la corrosion à proximité du conteneur). La faible présence de matière organique dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés conduit à considérer comme peu importante la corrosion sous l'influence des microorganismes.



C.IM.0SES.04.0589.C

Figure 6.2-12 Schéma du conteneur de déchets vitrifiés, montrant la présence des patins céramiques

Pour prendre en compte les incertitudes résiduelles sur les conditions de corrosion, trois modèles ont été définis par l'Andra [68].

Le premier, dit « phénoménologique » car fondé sur la meilleure estimation de l'évolution des conteneurs, retient les conditions suivantes :

- les conteneurs et surconteneurs connaissent une transition rapide vers un régime anoxique, du fait de la présence du capot d'étanchéité ;
- pendant ce transitoire, du fait de la chaleur dégagée par les conteneurs, l'air est suffisamment sec pour que la corrosion soit très limitée, et ne concerne que le chemisage ;
- si de l'oxygène parvient à entrer dans l'alvéole, il est consommé par la corrosion du chemisage en entrée d'alvéole.

Les vitesses de corrosion adoptées pour les conteneurs sont par conséquent « phénoménologiques » et associées à des conditions anoxiques.

Le deuxième modèle, dit « conservatif », retient les conditions suivantes :

- la possibilité d'une corrosion en milieu oxydant et en présence d'eau, y compris du conteneur (une dizaine d'années pour le conteneur C, 70 ans pour le conteneur de combustibles usés) ;
- la prise en compte d'hétérogénéités locales des conditions chimiques du milieu (dues par exemple à une infiltration d'eau au travers du chemisage, à la présence localisée de sulfures issus du milieu géologique...) au travers de l'application d'un facteur correctif sur les vitesses de corrosion.

Le troisième modèle, dit « pénalisant », retient arbitrairement des conditions de corrosion oxydantes des conteneurs pendant 300 ans, ce qui revient à négliger le rôle du capot d'étanchéité, et à supposer les alvéoles ouvertes pendant une durée longue.

Les durées de vie des conteneurs et surconteneurs selon ces trois modèles sont les suivantes :

- de l'ordre de 15 000 ans pour les conteneurs de déchets vitrifiés, et 30 000 ans pour les conteneurs de combustibles usés, selon l'approche « phénoménologique » ;
- de l'ordre de 4000 ans et une dizaine de milliers d'années respectivement selon le modèle « conservatif » ;
- de l'ordre de 1 000 ans et 10 000 ans selon le modèle « pénalisant ».

On a vu que le calcul du SEN considère des durées de vie de 4 000 ans et 10 000 ans, retenues sur la base du modèle « conservatif » qui intègre les incertitudes sur l'homogénéité des conditions chimiques.

Même si on appliquait le modèle « pénalisant » les conditions de calcul du SEN ne seraient pas significativement modifiées. Au bout de 1 000 ans, la température a suffisamment décrû pour que les vitesses de relâchement par les verres et les conditions de transport dans le milieu soient proches de celles retenues en scénario d'évolution normale. Seule serait influencée la décroissance radioactive de quelques éléments à durée de vie moyenne, qui ne bénéficierait plus des 3 000 ans de décroissance supplémentaires apportées par la durée de vie plus longue des conteneurs, en SEN.

Compte tenu des marges de dimensionnement importantes que présentent les conteneurs, seuls des phénomènes très improbables et difficiles à identifier a priori pourraient conduire à des durées de vie significativement inférieures à celles considérées par le modèle « pénalisant ». Le SEN considère cependant des pertes d'étanchéité précoces sur un petit nombre de conteneurs, à titre de précaution. Pour couvrir plus complètement encore l'incertitude, l'Andra a défini un scénario d'évolution altérée « défaut de colis », qui considère une disparition très précoce des fonctionnalités des conteneurs métalliques, sur une série de conteneurs et sur la totalité de l'inventaire. Ce scénario très conventionnel termine de prendre en compte toute forme d'incertitude sur les conditions de corrosion.

● **Le comportement mécanique des éléments soumis à la corrosion**

Le dimensionnement des composants prend en compte la corrosion, évaluée de manière conservative, afin de définir une épaisseur dédiée aux agressions chimiques et une épaisseur dédiée à la tenue mécanique. De cette manière, la tenue mécanique d'un composant est assurée pendant toute la durée où il doit exercer une fonction. C'est le cas des conteneurs.

L'incertitude sur le comportement mécanique ne peut en revanche plus être couverte par le dimensionnement une fois dépassée la durée de vie anticipée. A partir de cette période, plus aucune fonction n'est attendue du composant. Mais il peut devenir une source de perturbation pour son environnement : action mécanique sur l'environnement par sa déformation, pression due à une expansion incontrôlée des produits de corrosion, etc. Les interactions mécaniques entre le chemisage ou le conteneur et les argilites ont été abordées au paragraphe 6.2.6.1. On a vu qu'elles sont couvertes dans le pire des cas par une étude de sensibilité du scénario d'évolution normale sur les propriétés de l'EDZ.

On peut également s'interroger sur l'éventualité que la déformation du surconteneur de déchets vitrifiés et la pression des produits de corrosion puissent, dans la situation la plus extrême, endommager l'intérieur des colis. L'étude de sensibilité sur le taux de fracturation du verre en scénario d'évolution normale couvre un endommagement, quelle qu'en soit la cause.

Le devenir des composants métalliques et notamment leur impact sur l'évolution chimique et mécanique des conteneurs de combustible usé a également été pris en compte dans le cadre de la gestion à long terme du risque de criticité. Ce risque apparaît maîtrisé à toutes les étapes de temps.

En particulier, pour les combustibles usés, la corrosion des assemblages et la réduction des vides dus à la mise en compression mécanique globale du stockage entraîneront un rapprochement des crayons combustibles de l'assemblage garantissant le caractère sous-critique du colis par absence de modérateur, l'espace disponible pour l'eau se réduisant. Pour les conteneurs UOx, un facteur favorable serait également l'expansion des produits de corrosion de l'insert en fonte, qui devrait tendre à éloigner les assemblages les uns des autres progressivement. Une étude systématique des configurations géométriques possibles pour les différents types de colis de stockage, et la vérification de leur non-criticité, a été conduite. Elle est présentée dans ses principaux résultats au paragraphe 6.2.9.

Au-delà des seuls conteneurs et surconteneurs, la déformation des éléments métalliques placés à proximité de la roche (armatures du soutènement, chemisages dans les alvéoles) pourraient en théorie l'endommager ou sur-endommager, bien qu'il paraisse raisonnable de supposer que l'action exercée ne serait pas assez importante. En tout état de cause, un tel endommagement se produirait en partie courante des galeries ou des alvéoles. En effet, pour des questions liées aux perturbations chimiques (voir paragraphe suivant), les boulons ne sont pas mis en place au droit des scellements. Des déformations dues à ces éléments ne mettraient pas en cause le rôle des scellements pour intercepter la zone fracturée, et donc pas non plus la représentation du scénario d'évolution normale.

6.2.8.4 La perturbation alcaline des argilites et de la bentonite

La conception du stockage fait appel à un nombre limité de types de matériaux, dont le comportement physico-chimique a fait l'objet d'études nombreuses et pour lesquels on peut disposer d'analogues plus ou moins anciens. Cela permet de constituer un corpus de connaissances sur le comportement en stockage de ces matériaux, qui permet d'en prévoir et d'en modéliser le comportement [19].

La conception proposée conduit aussi à des conditions d'environnement maîtrisées, qui limitent la variété possible des interactions. Grâce à la présence des scellements, l'environnement est globalement diffusif, particulièrement après resaturation. L'environnement est réducteur de par la consommation rapide de l'oxygène [92]. Le pH est maintenu dans des gammes de 10 à 12 par les matériaux cimentaires dans les alvéoles de déchets B, et contrôlé par le milieu autour de la neutralité dans les alvéoles de déchets vitrifiés et de combustibles usés.

Toutes ces dispositions conceptuelles conduisent à limiter fortement les possibilités que le milieu géologique se trouve perturbé par des réactions chimiques issues de matériaux exogènes. La principale (en termes d'extension potentielle) est la perturbation alcaline, liée à l'action des fluides cimentaires sur les argilites.

La compréhension des mécanismes de perturbation alcaline se fonde sur des approches expérimentales. Les modélisations thermodynamiques élaborées dans le cadre du projet européen ECOCLAY permettent par ailleurs de reproduire les processus géochimiques observés. Les programmes menés en parallèle sur la bentonite et l'argilite montre une cohérence de réactivité des argiles confortant les éventuelles transpositions de résultats. L'extrapolation dans le temps du modèle conceptuel est appuyée par les observations menées à Maqarin et Khushaym Matruk en Jordanie, sites naturels où des matériaux argileux ont été soumis à une altération par des fluides alcalins.

De manière pénalisante, l'extension du panache alcalin est évaluée par modélisations 1D sur une période de 100 000 ans à 25°C, en considérant une source infinie de béton, et un coefficient de diffusion du même ordre de grandeur que celui mesuré pour l'eau tritiée, c'est-à-dire intermédiaire entre les valeurs les plus faibles mesurées pour la diffusion des anions et les valeurs les plus élevées mesurées pour la diffusion des cations, choix conservatif. Par cette approche, les conséquences de la perturbation restent limitées à une faible épaisseur d'argilite ou de bentonite à l'intérieur de laquelle il est possible de distinguer des zones plus ou moins dégradées. La première zone, immédiatement au contact du ciment mais n'excédant pas 60 cm à 1 million d'années, est fortement dégradée, elle correspond à la dissolution de la smectite initiale qui est alors remplacée par des phases typiques du milieu cimentaire, les CSH, et des zéolites. Elle est suivie d'une deuxième zone dite perturbée, car la smectite y est préservée, qui n'est affectée que par les échanges cationiques Na/Ca. L'extension de cette zone peut atteindre jusqu'à 1,8 mètre depuis l'interface avec le ciment dans la bentonite et jusqu'à 3 mètres dans l'argilite [69].

Ces résultats dépendent a priori du coefficient de diffusion dans le milieu considéré ; les études de sensibilité conduites indiquent cependant que son augmentation ne modifie pas la nature des transformations minéralogiques mais provoque un étalement du front de réaction. L'augmentation d'un facteur 3 du coefficient de diffusion en température (à 90°C) ne change pas l'ordre de grandeur de l'extension de la perturbation alcaline évaluée à 25°C.

Au vu de ces résultats, le choix de ne pas représenter explicitement la perturbation alcaline dans le scénario d'évolution normale se justifie de la manière suivante :

- dans les argilites, l'extension de la zone fortement reminéralisée ne dépassera pas celle de la zone fracturée prise en compte dans le modèle. L'effet attendu de la perturbation alcaline sur la zone fracturée n'est pas totalement déterminé. On s'attend a priori à un colmatage de la porosité, donc à un effet globalement favorable au regard des propriétés hydrauliques. Cependant, un tel effet n'est pas pris en compte, et en revanche on considère de manière prudente que la perméabilité peut se trouver dégradée. Une étude de dégradant les propriétés de la zone fracturée a été effectuée en SEN ;
- au voisinage des scellements, l'extension de la zone fortement reminéralisée est de 60 centimètres dans des conditions d'évaluation conservatives. Cette épaisseur est prise en compte en dimensionnement par une longueur « perdue » de scellement au moins égale. Cette longueur de bentonite est destinée uniquement à tamponner la perturbation. Près des zones identifiées comme sensibles par l'analyse de sûreté (c'est-à-dire essentiellement près des coupures hydrauliques), on évite de plus de laisser en place des matériaux cimentaires et/ou métalliques. Il est donc prévu à ce stade de démonter le soutènement au moment du creusement de l'ancrage et de la mise en place du scellement (voir Figure 6.2-13). Dans ces conditions, des modélisations 2D avec couplage transport-chimie montrent que les coupures hydrauliques peuvent subir des modifications de minéralisation sous l'effet d'eaux cimentaires, mais aucune reminéralisation qui soit de nature à compromettre la capacité de gonflement de la bentonite, et donc sa fonction (par exemple, pas d'augmentation significative de son pH) [69]. A titre de variante, la possibilité d'un soutènement en béton bas pH aux environs de ces ancrages est étudiée ;

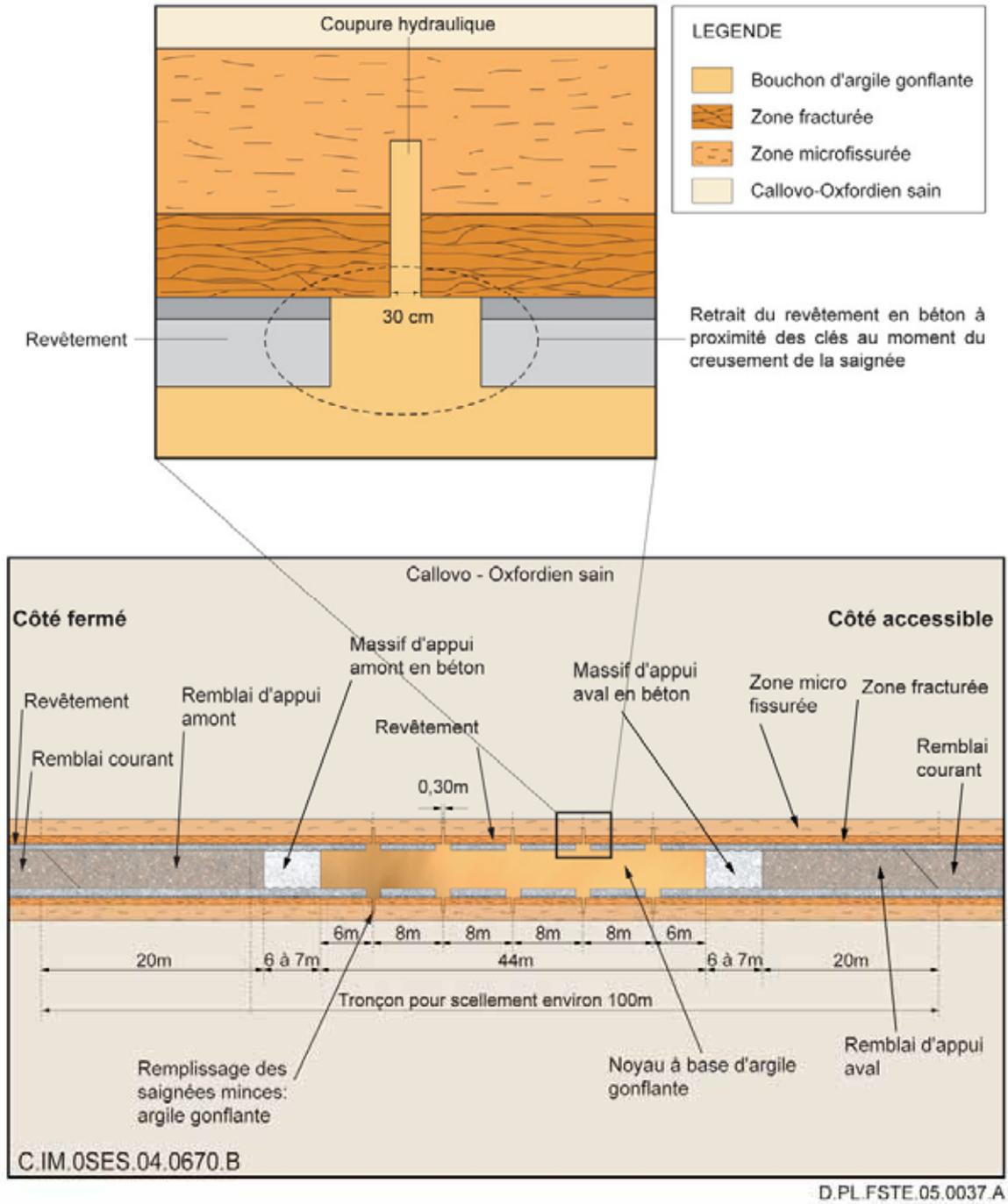


Figure 6.2-13

Schéma illustrant le retrait du soutènement à proximité des coupures hydrauliques de scellement.

- les bouchons d'alvéole de déchets thermiques sont quant à eux suffisamment longs pour tamponner la perturbation alcaline. En particulier, celle-ci ne peut influencer le pH dans les alvéoles (voir Figure 6.2-14).

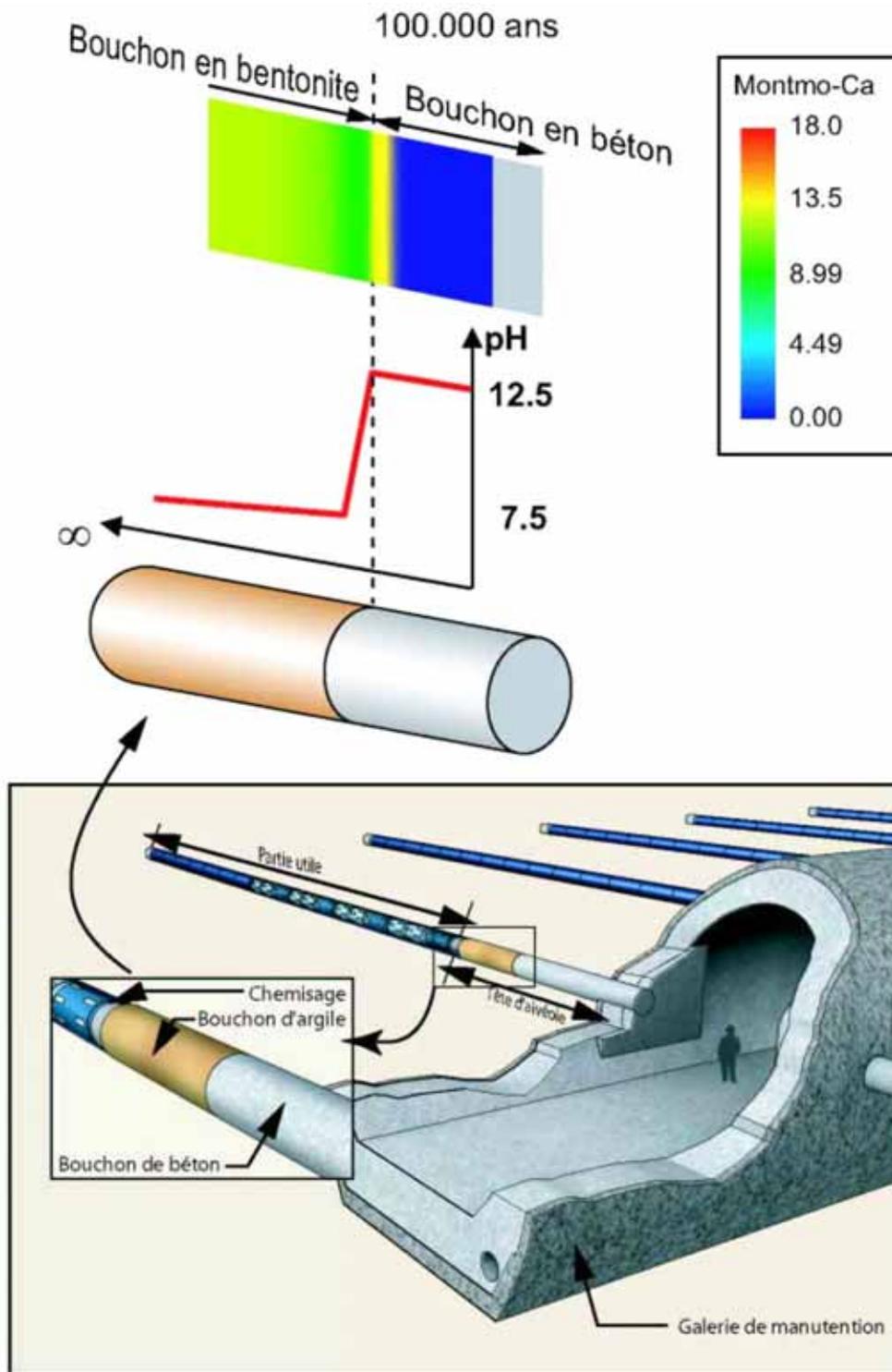


Figure 6.2-14

Représentation de l'extension de la perturbation alcaline sur les bouchons d'alvéoles de déchets C

Les incertitudes résiduelles à ce stade portent sur :

- le fait que les évaluations supposent un pH des eaux cimentaires d'au plus 12,5. Pour les formulations courantes de béton, des pH supérieurs à ces valeurs ne peuvent exister que de manière transitoire, pour des eaux jeunes (voir la Figure 6.2-11) ;
- le fait que les évaluations supposent un régime diffusif. Si, dans une situation altérée, le régime hydraulique pouvait devenir globalement ou localement convectif, les évaluations ne seraient plus valables. Il convient donc, si le cas se présente lors de l'étude des scénarios d'évolution altérée (voir chapitre 7), de prendre en compte l'effet possible d'une propagation de la perturbation alcaline, en particulier au travers des bouchons d'alvéoles C, en cas de perte de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » ;
- les incertitudes sur la mise en place des éléments en bentonite (barrières ouvragées, bouchons, scellements) et leur homogénéité. Si cette mise en place n'est pas correctement réalisée, les interstices entre anneaux ou briques de bentonite peuvent favoriser la propagation de la perturbation. Cette question est abordée dans le paragraphe 6.2.12 consacré aux incertitudes technologiques.

Une extension excessive du panache alcalin pourrait conduire à une moindre performance des scellements, et dans une situation très improbable d'extension très forte du pH jusqu'en tête des alvéoles de déchets vitrifiés et de combustibles usés, à un milieu localement basique. Pour terminer de couvrir les incertitudes résiduelles, on envisage donc :

- un possible non gonflement de la bentonite sous l'effet de la perturbation alcaline. Il est couvert par une situation de défaillance de l'ensemble des scellements en scénario d'évolution altérée « défaut de scellements » ;
- au sein du scénario d'évolution altérée « défaut de scellements », en variante, une possible extension du pH alcalin jusqu'au sein de l'alvéole de déchets C, et une augmentation du relâchement par les matrices vitreuses sous cet effet. On ne sait pas décrire avec précision l'effet d'un pH basique sur le verre, on retient par conséquent d'augmenter la vitesse de dissolution artificiellement jusqu'à rendre la durée de vie de la matrice négligeable devant les processus de transport. L'influence d'un pH élevé sur les combustibles usés est également très difficile à décrire, mais le modèle de relâchement très conservatif retenu en référence (qui conduit à une durée de vie de 50 000 ans) apparaît suffisamment rapide pour qu'il soit inutile de l'accélérer encore.

6.2.8.5 Les perturbations fer-argilites et fer-argile

Les mécanismes réactionnels décrivant l'interaction fer-argile sont bien connus (voir Figure 6.2-15) et ne soulèvent que peu de questions, les mécanismes chimiques dans une bentonite homogène étant bien maîtrisés. L'extension de l'interaction fer/bentonite a été évaluée selon deux approches, par bilan de masse et par modélisation couplée transport-chimie. Les deux approches conduisent à un effet limité car la chloritisation des argilites en champ proche consomme le terme source. L'ensemble des modélisations, avec différentes valeurs de coefficients de diffusion, ne met en évidence qu'une épaisseur de quelques centimètres pour la zone fortement chloritisée. Au-delà, le fer s'échange avec les cations des argiles [93].

Par ailleurs, la grande affinité des argiles pour le fer peut potentiellement créer un phénomène de compétition entre ce cation et les radionucléides cationiques. Il peut conduire à une diminution des capacités de sorption, mais sur de faibles distances. Ces effets sont couverts par l'étude de sensibilité attribuant des Kd conservatifs à la bentonite en scénario d'évolution normale.

Pour ce qui concerne les argilites, la diffusion de fer II issu de la dégradation des éléments métalliques laissés en place (chemisage, armatures des bétons, boulonnages, etc.) ne peut totalement être exclue dans la zone endommagée à proximité des alvéoles. L'extrapolation des résultats obtenus sur la bentonite conduit à considérer que ce phénomène pourrait engendrer des modifications de composition minéralogique des argilites ou de la chimie des eaux interstitielles du Callovo-Oxfordien, mais uniquement sur de faibles distances. De même que pour la bentonite, une diffusion du fer au-delà de la

zone endommagée de l'alvéole peut conduire à un phénomène de compétition entre ce cation et les radionucléides cationiques. Il peut conduire à une diminution des K_d [70], effets couverts par la sensibilité vers des paramètres géochimiques dégradées dans les calculs du SEN.

L'évaluation de la propagation d'une perturbation fer-argile appelle également la question de la mise en place des éléments en bentonite (barrières ouvragées, bouchons, scellements) et de leur homogénéité. Comme dans le cas de la perturbation alcaline, si cette mise en place n'est pas correctement réalisée, les interstices entre anneaux ou briques de bentonite peuvent favoriser la propagation de la perturbation, mais sur des distances qui demeurent courtes.

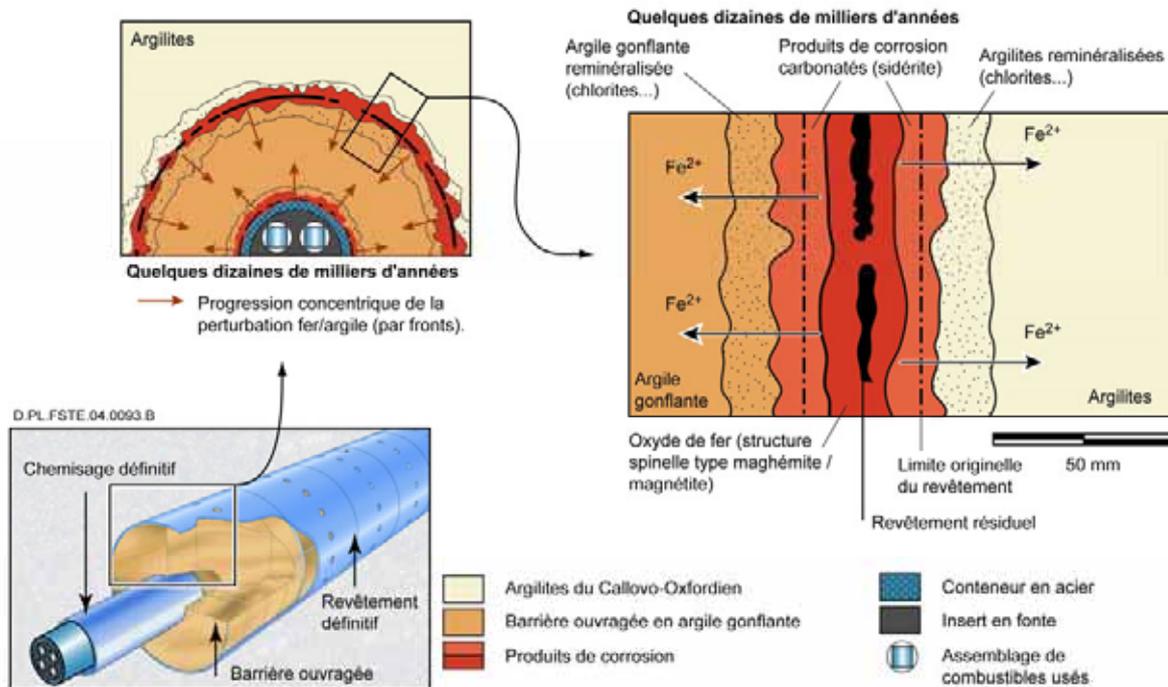


Figure 6.2-15 Représentation schématique d'une perturbation fer-argile

En conclusion, on ne retient pas d'incertitude sur l'extension de la perturbation fer-argile ou fer-argilite qui soit de nature à remettre en cause la représentation du SEN et de ses études de sensibilité.

6.2.8.6 La perturbation oxydante dans les argilites

La chimie des eaux du Callovo-Oxfordien peut également être altérée à proximité des ouvrages par les perturbations induites par l'exploitation. L'oxydation, notamment, peut modifier la composition des eaux localement, et augmenter la teneur en éléments défavorables (modification du pH, augmentation de la teneur en sulfates...). Ces effets sont limités par la capacité tampon des argilites. La possibilité d'attaques sulfatiques sur certains composants, ou d'un pH s'éloignant un peu de la neutralité, ne peut cependant être totalement écartée.

On n'attend pas d'effet particulier de l'attaque sulfatique sur les bétons (de revêtement, de compléments de colissage...) compte tenu des fortes quantités de matériaux cimentaires mises en jeu qui ont un effet de tampon chimique. Les formulations de béton peuvent être adaptées à une éventuelle attaque sulfatique. Cependant, si celle-ci s'avérait plus pénalisante qu'envisagé en référence, alors les effets sur le béton (perte de tenue mécanique précoce) seraient de même nature que les situations évoquées au paragraphe 6.2.8.2, couvertes au pire par le scénario d'évolution altérée « défaut de scellements ».

L'oxydation de la matière organique présente dans les argilites peut également conduire à la formation de colloïdes. Ce phénomène ne pourrait cependant pas concerner des quantités importantes, il est négligeable au regard des mécanismes de transport à l'échelle du stockage.

6.2.8.7 Les cumuls de perturbations chimiques

Le cumul des perturbations chimiques soulève deux questions différentes :

- lorsque le même milieu argileux est soumis à des perturbations simultanées ou successives d'éléments chimiques différents, la perturbation totale induite est-elle différente de celle qui serait due à chaque interaction individuellement ?
- lorsqu'un même composant subit, sur des parties différentes, des perturbations différentes, son dimensionnement d'ensemble est-il suffisant ?

Le cumul principal à considérer, compte tenu des extensions calculées, est celui des perturbations alcaline et fer-argile. Il existe d'autres sources de perturbations chimiques, dues à d'autres composés (par exemple la perturbation silice – argile près des alvéoles de déchets C), mais elles s'avèrent négligeables.

Compte tenu de la faible extension de la perturbation fer-argile, il est raisonnable de supposer que cette dernière ne modifierait pas drastiquement l'extension de la perturbation alcaline si elle venait à s'y ajouter. Par ailleurs, les dispositions de conception déjà évoquées (dépose du soutènement près des scellements, dimensionnement de ceux-ci en prenant en compte une épaisseur « perdue » destinée à tamponner les interactions chimiques) permettent également de se prémunir contre des perturbations cumulées.

S'il s'avérait néanmoins que le cumul des perturbations puisse conduire à des phénomènes non anticipés, alors ces effets seraient couverts par les situations de défaut de scellements et/ou de dégradation de la zone endommagée déjà présentées.

6.2.8.8 Synthèse sur les incertitudes d'ordre chimique

Il apparaît au terme de l'analyse que les principales incertitudes relevées portent sur les extensions des perturbations chimiques. Elles sont évaluées dans des conditions conservatives et traitées, si elles ne sont pas négligeables, par conception (soit en supprimant la source de la perturbation, par exemple en déposant le revêtement à proximité des scellements de galerie – soit en sur-dimensionnant des épaisseurs « perdues », comme par exemple pour les bouchons d'alvéoles). Elles ne sont donc plus représentées explicitement en scénario d'évolution normale. Compte tenu qu'il s'agit de mécanismes se déroulant sur le long terme, et que les incertitudes sur les extensions peuvent être associées à d'autres incertitudes (sur les conditions de transport qui régissent le transfert de espèces chimiques agressives, sur le cumul des effets de perturbations différentes), on prévoit cependant par principe de couvrir en scénario d'évolution altérée des situations de défaillance des scellements et/ou de dégradation de l'EDZ qui peuvent trouver leur origine dans des perturbations chimiques d'ampleur excessive.

Le comportement à long terme des matériaux (bétons, aciers) est bien appréhendé, un programme de recherche important ayant été accompli. Les conditions de stockage (milieu réducteur, diffusif, homogène) sont favorables à la prise en compte de durées de vie longues avec une confiance importante. Pour autant, au titre des incertitudes résiduelles, l'analyse de sûreté prend en compte de manière systématique la possibilité que, localement ou de manière globale, les durées de vie des matériaux soient plus courtes que prévu, même par les modèles les plus conservatifs.

6.2.9 Risques radiologiques liés à un hypothétique accident de criticité dans le stockage

L'objectif au regard de la criticité est en premier lieu de s'assurer qu'un tel accident est suffisamment improbable à long terme. Les motivations pour cela sont différentes de celles des études de criticité en exploitation. En effet, un accident de criticité dans le stockage une fois fermé ne soumettrait aucun individu à une exposition au rayonnement émis, l'épaisseur des formations géologiques constituant une protection suffisante. Cependant, les conditions d'environnement des colis éventuellement concernés sont plus difficiles à décrire et à évaluer : modifications de l'environnement thermique, radiologique, et de l'inventaire en radionucléides.

On cherche par conséquent à se placer dans des conditions excluant ou, le cas échéant, minimisant l'occurrence d'un tel risque en post-fermeture. Les colis ont été dimensionnés pour permettre d'éviter un accident de criticité dans le stockage dans toutes les situations d'exploitation. L'approche a consisté à s'assurer, sur cette base, que ces dispositions suffisaient à couvrir également le risque à long terme, en prenant en compte l'évolution chimique et mécanique des colis. Cette vérification a été réalisée sur chaque zone de stockage B, C ou de combustibles usés [45].

Par ailleurs, en complément, on a également envisagé des situations de criticité qui pourraient être induites par une migration de radionucléides à très long terme et une éventuelle reconcentration de matière fissile en un point du stockage. L'avis de la majorité des experts au niveau international [94, 95] est qu'une telle situation est très peu probable. Néanmoins, une vérification de ce point a été entreprise sur la base d'une évaluation phénoménologique des possibilités de reconcentration de la matière fissile [96].

6.2.9.1 Risque de criticité en post-fermeture dû aux colis

Les distances séparant les alvéoles sont suffisamment importantes pour les découpler neutroniquement, l'analyse du risque de criticité est conduite au niveau de chaque alvéole considérée isolément.

● Risques propres aux colis de déchets B

Pour les colis B, les incertitudes portent sur leur inventaire en matière fissile, sur l'évolution mécanique de l'alvéole de déchets B, et enfin sur la dégradation chimique des compléments de colisage.

L'incertitude sur la caractérisation radiologique des colis, et notamment la définition de l'inventaire fissile utilisé comme donnée d'entrée des études de criticité, est couverte par la réalisation des calculs sur le colis-type enveloppe. Il s'agit en l'occurrence du colis type B5, c'est-à-dire les colis CSD-C contenant les coques et embouts compactés issus du traitement à La Hague des assemblages UOx et potentiellement MOX. Outre la vérification de la sous-criticité au cours du temps sur la base des données initiales du MID, on a procédé également au calcul contraire, consistant à évaluer la masse de matière fissile maximale admissible par CSD-C en alvéole de stockage. Cette évaluation a été conduite dans des conditions pénalisantes, en supposant que les quatre CSD-C contenus dans les colis comportaient tous le maximum de matière fissile admissible, et étaient juxtaposés les uns aux autres sans béton pour les séparer. Ces conditions de calcul permettent de couvrir une éventuelle évolution mécanique défavorable du colisage et un rapprochement des colis primaires à l'intérieur. La masse fissile déduite s'avère bien supérieure à la masse maximale admissible par CSD-C actuellement définie par COGEMA pour leur entreposage à La Hague.

Au regard de l'évolution mécanique de l'alvéole de déchets B, une criticité théorique ne peut être atteinte qu'en cas de rapprochement des colis primaires contenus dans plusieurs colis de stockage différents. La durabilité des colis s'avère un élément positif pour limiter ce type de situation, même si elle constitue à ce jour une marge qualitative qui n'est pas retenue pour les études (les colisages n'ayant, en post fermeture, qu'une fonction de rétention chimique). Outre la vérification mentionnée précédemment, ayant consisté à rapprocher les colis quatre par quatre au sein des compléments de colisage, on a également évalué des situations où un nombre plus important de colis primaires pourrait se trouver au contact les uns des autres. Compte tenu de l'épaisseur de béton des compléments de

colisage, et de la minimisation des vides au sein des alvéoles, un tel rapprochement apparaît totalement irréaliste. Ni l'évolution mécanique des colis ni un séisme ne pourraient conduire à une telle configuration. Au vu des résultats de l'étude, une situation sur-critique est exclue, ceci d'autant plus que, contrairement aux hypothèses de calcul retenues, très peu voire aucun colis ne sera chargé à la masse maximale admissible.

Vis-à-vis des incertitudes d'ordre chimique, on a cherché à s'assurer que l'évolution des bétons ne pouvait conduire à rendre sur-critiques les empilements de colis. Une telle situation pourrait a priori se produire si les évolutions chimiques augmentaient la réflexion neutronique du béton. L'évolution chimique du béton est cependant concomitante de l'arrivée de l'eau. Celle-ci, dans les compléments de colisage, joue un rôle d'absorbeur de neutrons, contribuant significativement à la maîtrise du risque de criticité. L'effet de toute évolution chimique du béton serait couvert par cet effet favorable. Néanmoins, pour prendre en compte toute incertitude à ce sujet, on a conduit une évaluation supposant :

- une chimie défavorable du béton, définie en majorant sa teneur en silicium au détriment d'éléments plus abondants mais moins réflecteurs tels que le calcium ;
- une minimisation de sa teneur en eau.

Il s'avère que, même dans cette situation très pénalisante, un accident de criticité n'est pas possible.

● **Risques propres aux colis de déchets C**

Les incertitudes sur l'inventaire radiologique sont peu importantes pour les déchets vitrifiés, les verres C1 produits ou en cours de production répondant à des normes d'assurance qualité qui garantissent un inventaire radiologique représentatif. Pour les colis futurs ou hypothétiques, la définition de leur contenu radiologique est fondée sur ce qui peut être imaginé à ce stade du procédé à mettre en œuvre. Leur sous-criticité devra probablement être réévaluée s'ils venaient à entrer en production ; cependant, on verra que des marges importantes existent dans les études, ce point ne devrait donc pas soulever de difficulté dans l'avenir. Les déchets C0, bien que certains soient anciens et antérieurs à la mise sous qualité de la production, ne posent pas non plus de difficultés car leur teneur en matière fissile est généralement beaucoup plus faible (un ordre de grandeur) que dans les autres colis.

L'évaluation de sûreté-criticité en conditions de stockage considère, de manière conservatrice, que les colis sont disposés à l'horizontal selon une file infinie. Ceci revient à ne pas affecter un rôle de découplant neutronique aux intercalaires qui pourraient séparer chaque colis de stockage de type C1, C2, C3 ou C4. Ce conservatisme permet de garantir la sûreté criticité pour toute évolution mécanique ultérieure d'une alvéole C quelle qu'en soit la cause (augmentation des contraintes, séisme, etc.). Seules des configurations de type réseau à pas carré ou à pas triangulaire, pour des colis très chargés en matières fissiles (type C4) pourraient s'avérer sur-critiques, mais il est clair qu'aucun déplacement des colis ne pourrait conduire à une telle disposition.

Pour ce qui concerne l'évolution chimique dans les alvéoles C, pour couvrir les incertitudes liées à la dégradation des verres nucléaires, la vérification de la sous-criticité de la file de colis a été réalisée en assimilant les différents constituants du verre à la seule silice. Celle-ci représente plus de 50 % en masse de la composition initiale. Le silicium est, avec l'aluminium (mais l'oxyde Al_2O_3 ne représente que 4 % de la masse du verre), un élément pénalisant favorisant le libre parcours des neutrons. Les autres éléments présents, tels que le sodium, le calcium ou le zirconium sont comparativement plus transparents vis-à-vis des neutrons ; le bore, présent en quantité significative (B_2O_3 représentant 18 % de la masse), est pour sa part un absorbant neutronique efficace, par conséquent favorable à la sous-criticité. Pour représenter de manière conservatrice au fil du temps les autres composants de l'alvéole C et le milieu géologique, des matériaux réflecteurs pénalisants vis-à-vis de leur teneur en eau ont été modélisés.

Compte tenu des éléments énoncés ci-avant, la seule incertitude identifiée comme théoriquement dommageable à la maîtrise du risque de criticité dans les alvéoles C concerne le risque de fracturation du verre ; la présence d'eau dans la matrice vitreuse va avoir pour effet de mieux modérer la matière fissile et donc d'augmenter le bilan neutronique du système. Des études paramétriques, en fonction de

la teneur en eau dans le verre, ont été réalisées en considérant un milieu fissile de référence comportant de la silice, de l'eau et de la matière fissile. Cette étude a montré le caractère sûr des alvéoles de colis C1, C2 et C3 (et implicitement C0 qui contiennent dix fois moins de matière fissile) quelle que soit la teneur en eau au sein des colis de verre, c'est-à-dire quel que soit le degré de fracturation de la matrice. Dans le cas du colis C4, dont on rappelle qu'il est étudié à titre prospectif et qu'il ne correspond pas à une réalité industrielle, il suffit de prendre en compte 1 % de bore (en masse totale de la matrice vitreuse) pour conclure à l'absence de risque de criticité.

La marge importante que représente la non utilisation du bore dans les calculs réalisés peut permettre de couvrir l'incertitude sur la caractérisation radiologique des colis futurs et notamment la définition de l'inventaire fissile. Comme pour les colis B, il est possible compte tenu de ces éléments d'écarter la possibilité d'un accident de criticité dû aux colis de déchets vitrifiés, en situation normale ou altérée.

- **Risques propres aux colis de combustibles usés**

L'analyse du risque de criticité durant la phase de post-fermeture porte essentiellement sur les colis de combustibles usés contenant quatre assemblages, le cas des colis mono-assemblage UOx ou MOX pouvant en être déduit.

Contrairement aux colis primaires B et C et malgré la minimisation des vides dans l'alvéole et en particulier dans le colis de stockage, le taux de vide résiduel (espace entre les crayons, jeux de manutention, espace libre dans les étuis) peut potentiellement être initiateur d'une criticité. Ces vides sont susceptibles de favoriser des évolutions géométriques du colis et l'occurrence d'une criticité par rapprochement des assemblages (maximisant l'interaction neutronique) ou par modification du pas entre les crayons combustibles (modifiant la modération de la matière fissile). Cette évolution mécanique sera largement dominante devant la dégradation chimique des assemblages et des composants internes du colis. Par exemple, la formation des produits de corrosion, se substituant à la fonte et à l'acier du conteneur à géométrie figée, ne modifie que très peu la réactivité. L'approche utilisée consiste essentiellement à vérifier que les évolutions géométriques successives envisageables des assemblages et des colis, pour les deux variantes de conteneurage à l'étude (V1 et V2, voir Figure 6.2-16), ne remettent pas en cause la sous-criticité du colis en alvéole. Il convient à chaque fois de bien distinguer le devenir des crayons au sein d'un assemblage et celui des assemblages entre eux.

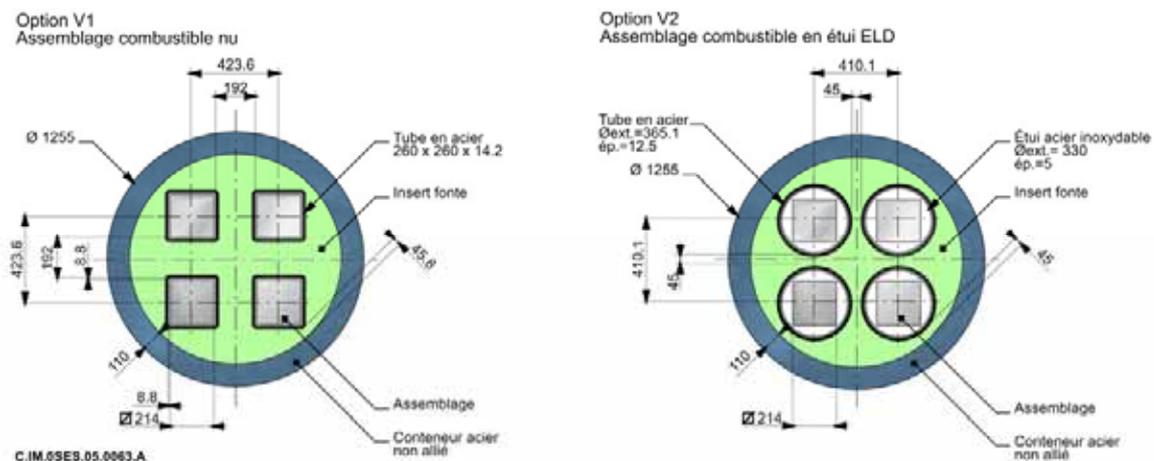


Figure 6.2-16

Vue en coupe des variantes option V1 et option V2 de colis de stockage CUI contenant 4 assemblages combustibles

Evolution des crayons au sein d'un assemblage

La Figure 6.2-17 présente quatre représentations envisageables au cours du temps que l'on peut assimiler à des situations transitoires entre l'état intègre initial, sous-critique par conception, et un stade ultime, sous-critique par défaut de modération, correspondant à l'écrasement de chaque assemblage sur lui-même sous l'action des contraintes induites par la réduction des vides. Ces représentations ont fait l'objet de calculs de criticité pour différentes dispositions des assemblages dans le colis. Elles se définissent comme suit :

- une conservation durant un temps significatif de la géométrie initiale de l'assemblage évoluant potentiellement vers une situation de flexion des crayons combustibles sous l'action de contraintes mécaniques ou par gravité (1) ;
- la rupture d'une fraction non négligeable de crayons conduisant à un vrac de combustible dans le fond du logement en coexistence avec un réseau de crayons partiellement dégradé ; cette rupture se produirait à sec par hydruration des gaines ou surpression interne, ou à terme sous eau par les contraintes mécaniques induites par la corrosion (2) ;
- la désolidarisation des crayons des grilles et des embouts sous leur propre poids ou sous l'action de la corrosion, une situation qui conduirait à un fagot de crayons plus ou moins dégradés en fond de logement (3) ;
- un vrac de combustible en fond de logement qui pourrait être une évolution ultérieure des situations précédentes (4).

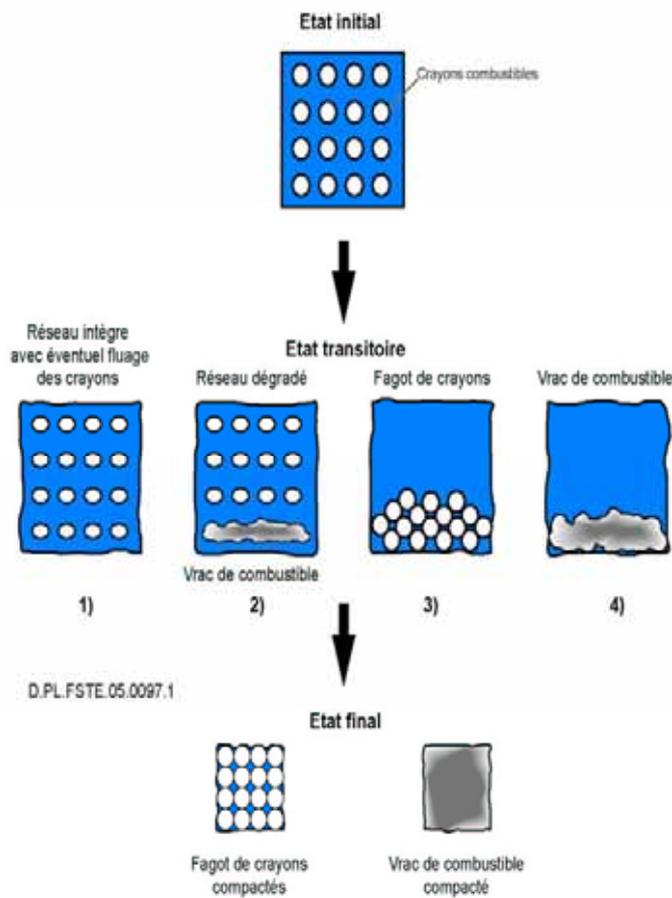


Figure 6.2-17

Evolution des assemblages des colis de combustibles usés suite à la corrosion de l'insert et à l'expansion de volume associée

L'analyse du risque de criticité pour toutes ses situations transitoires s'est faite au regard de la disposition des crayons dégradés (ou du vrac) et du niveau de modulation de la matière fissile qu'ils contiennent. Les calculs de criticité ont montré que la situation intègre initiale, et de manière conservatrice le cas (1) supposant un éventuel fluage des crayons, s'avère être la représentation la plus réactive. Le résultat de ces études montre que l'évolution d'un assemblage seul ne peut conduire à le rendre sur-critique, sauf dans des configurations irréalistes envisageant un écartement significatif des crayons les uns des autres, dans l'option de conteneurage V2. Certaines de ces configurations pourraient être sur-critiques selon les premières estimations actuelles, mais une telle situation n'est pas réaliste, car les crayons auront tendance à tomber sous l'effet de la pesanteur, et non à s'écarter les uns des autres.

Evolution des assemblages au sein des colis

Au sein du colis (Figure 6.2-18) on s'attend à ce que l'expansion due à la corrosion éloigne les assemblages (a), ou a minima préserve une épaisseur suffisante garantissant la sous-criticité (b). Un événement de criticité ne pourrait être possible que dans une situation très théorique de rapprochement des assemblages (c), et reposerait sur une modélisation excessivement conservatrice, supposant à la fois la ruine des composants internes du colis de stockage (la croix de l'insert) et la conservation du pas initial entre les crayons combustibles favorisant la modulation de la matière fissile.

Les estimations conduites sur des assemblages peu irradiés, enveloppes des autres, montrent qu'il faudrait que, simultanément, les crayons conservent leur distance initiale et que les assemblages se rapprochent jusqu'à ce que leur distance soit inférieure à sept centimètres. Même si les assemblages se rapprochaient avec un réseau de crayons globalement intègre, la modulation ne serait plus optimale par la nécessaire répartition des produits de corrosion entre les crayons (d).

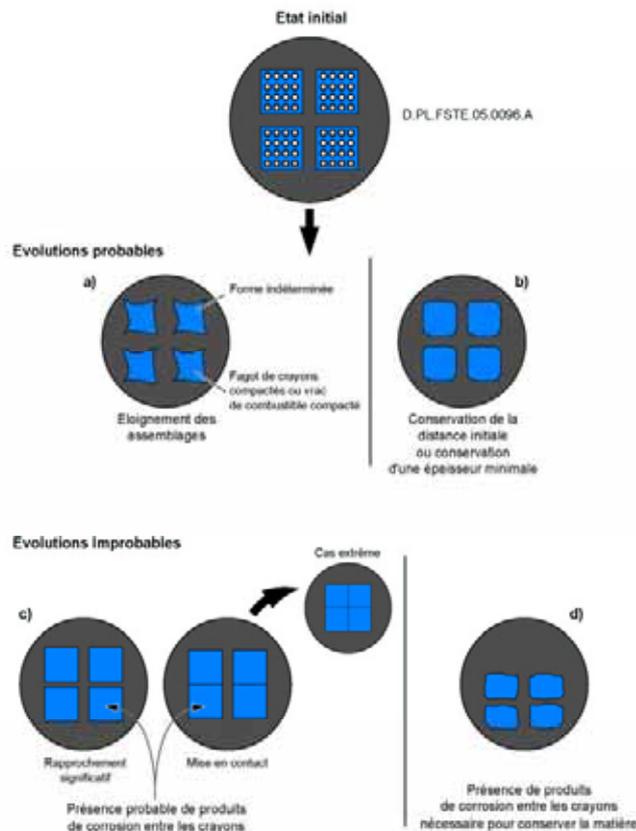


Figure 6.2-18

Evolution du colis de combustible usé suite à la corrosion de l'insert et à l'expansion de volume associée

En conclusion, l'occurrence d'un accident de criticité du fait d'une évolution des conteneurs de combustibles usés apparaît extrêmement improbable. Au titre de la gestion des incertitudes résiduelles, et pour répondre à une demande de l'Autorité de sûreté nucléaire, il a été décidé néanmoins d'évaluer de manière déterministe ses conséquences.

● **Evaluation des conséquences d'un hypothétique accident de criticité dans une alvéole de combustibles usés**

Le retour d'expérience des accidents de criticité en installation nucléaire montre que l'impact radiologique (irradiation, contamination) est un paramètre clé, l'objectif étant d'évaluer l'impact de l'accident sur le public et les travailleurs. Il ne s'agit donc pas dans une telle situation de décrire avec précision la phénoménologie de l'accident, mais d'en évaluer les conséquences radiologiques de manière arbitrairement conservative. Dans le cadre d'une situation hypothétique de criticité en alvéole en phase de post-fermeture, il en va tout autrement. Les effets thermiques et mécaniques sont les paramètres prépondérants et il devient nécessaire d'étudier une situation représentative du point de vue de la phénoménologie, sans conservatisme excessif.

Quelque soit le scénario, l'hypothétique accident se produirait au sein d'un milieu hétérogène de crayons combustibles en présence d'eau. Le milieu est supposé saturé, car l'accident se produirait après dégradation du conteneur, donc bien au-delà de la dizaine de milliers d'années. La réactivité du milieu à considérer a été estimée, elle s'avère très dépendante du scénario initiateur et en particulier de l'écartement des crayons considérés et de la distance entre les assemblages. Le choix du scénario s'est porté sur un rapprochement des assemblages conduisant à les considérer distants de cinq centimètres (contre vingt centimètres dans le colis intègre) sans répartition des produits de corrosion entre les crayons ce qui correspond à une situation très peu réaliste. Ce scénario est aussi représentatif, en terme de réactivité insérée, d'une hypothétique criticité suite à un improbable écartement des crayons.

Outre la nature physico-chimique du milieu fissile et la réactivité potentielle du système, le déroulement d'un accident de criticité est également régi par la vitesse d'insertion de cette réactivité, par les contre-réactions neutroniques (effets de température, effets d'expansion et effet de vide) et par l'environnement (échanges thermiques, confinement du système...). Une étude de sensibilité montre que l'évolution de l'accident au cours du temps est comparable pour une introduction de réactivité en un jour, un mois ou un an, c'est-à-dire tant que l'on considère que l'introduction de la réactivité est suffisamment lente, ce qui paraît raisonnable compte tenu des cinétiques de déformation mécanique dans les alvéoles.

En modélisant l'environnement immédiat du colis, les calculs réalisés mettent en évidence une augmentation lente de puissance, ce qui permet de conclure à l'absence de réaction violente au sein de l'alvéole et à l'absence de dégâts mécaniques. Compte tenu du très faible niveau de puissance atteint, l'accident peut perdurer et ne s'arrêter de manière définitive que par l'épuisement du combustible et par son empoisonnement.

La température du combustible reste limitée (de l'ordre de 70°C), ce qui conduit à une très faible élévation de la température de la barrière ouvragée et a fortiori de la roche environnante sur toute la durée de l'accident.

Cette ambiance thermique est du même ordre de grandeur que celle considérée pour la phase thermique en SEN. A l'échéance du millénaire, le modèle thermique en deux dimensions pénalisant employé prévoit une température de 77°C en limite entre la barrière ouvragée et les argilites ; les conditions de température liées à l'accident de criticité seraient donc a priori moins pénalisantes que celles déjà prises en compte pour la phase thermique. Elles pourraient en revanche durer plus longtemps (à l'échelle de quelques millénaires et jusqu'à la dizaine de millénaires selon la vitesse d'épuisement du combustible). En première approche, on estime globalement que le transport des radionucléides présents en champ proche au moment de l'accident et sur sa durée serait perturbé de la même manière que celui des radionucléides en situation de défaut de conteneur de combustibles.

L'accident ajoute à l'inventaire déjà présent des produits de fission nouveaux. Les radionucléides formés les plus abondants sont principalement à vie très courte, ils ne peuvent contribuer à l'impact. Pour les radionucléides à vie longue et mobiles, tels que ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{79}Se et ^{129}I , l'inventaire ajouté est négligeable comparé à l'inventaire initial.

Du point de vue de l'irradiation, les particules émises seraient surtout des rayonnements neutroniques et gammas. Le surcroît de radiolyse induit par la criticité ne devrait pas augmenter de manière sensible le terme source du combustible usé, des hypothèses très pénalisantes de dissolution radiolytique étant déjà prises en compte en référence. Les effets de l'irradiation sur les argilites sont essentiellement des effets thermiques.

En conclusion, les effets d'un accident de criticité sont au premier ordre similaires, se soldant par un transfert en ambiance thermique, à ceux d'un défaut prématuré de colisage, bien entendu à la différence près que l'accident critique se produirait plus tard dans la vie du stockage (au bout de plusieurs dizaines de milliers d'années). Poursuivre cette comparaison nécessiterait d'évaluer plus finement l'évolution de la température dans le milieu en fonction du déroulement de l'accident, exercice a priori complexe, dont le bénéfice attendu doit être mis en regard du caractère irréaliste des configurations envisagées.

Afin d'évaluer si la distance qui sépare les assemblages est un paramètre sensible, on a envisagé en sensibilité une situation conventionnelle dans laquelle les quatre assemblages d'un même conteneur sont positionnés au contact les uns des autres, tout en conservant un écartement nominal de leurs crayons. Elle correspond à la réactivité insérée la plus pénalisante. Même dans un tel cas, la puissance n'augmente que lentement et des dégâts mécaniques sont exclus. En revanche, l'élévation progressive de la température du milieu (330°C maximum au cœur du combustible) conduit le système jusqu'à l'ébullition mais la vaporisation lente d'une partie de l'eau arrête la réaction et la température du système revient à 50°C en moins de deux ans. Le retour progressif de l'eau peut conduire à terme à une reprise de l'accident de criticité. La phénoménologie de cet accident conventionnel se résumerait donc à une série de phases de montée en température au sein des assemblages - très brèves au regard des temps caractéristiques des phénomènes thermiques habituellement considérés dans le stockage - espacées par des phases de refroidissement. Les températures maximales atteintes à chaque événement devraient par ailleurs décroître au fur et à mesure de l'épuisement du combustible et de son empoisonnement. Dans un tel cas, compte tenu du taux de combustion initial et du niveau de puissance atteint, la durée maximale cumulée des réactions en chaîne est de l'ordre du millénaire avant qu'elles ne s'arrêtent de manière définitive. La description des effets d'une telle situation sur les propriétés de l'argile gonflante et de la roche est difficile ; ceux-ci devraient rester limités au champ proche sans mettre en cause la capacité de confinement en grand de la formation.

En première approche, on peut donc considérer que l'accident de criticité dû au rapprochement des assemblages est décrit qualitativement par le scénario de défaut précoce de colis, bien que ces deux types d'incidents ne se déroulent pas dans les mêmes phases de temps. Le défaut de colis, plus précoce, met en jeu un inventaire radiologique plus important. Les conditions thermiques en champ proche sont du même ordre dans les deux cas de figure. Des cas de rapprochement complet des assemblages conduiraient à considérer une phénoménologie qu'il est plus difficile de rattacher à un scénario connu ; ceux-ci renvoient cependant à des configurations qui ne présentent aucun réalisme.

Un tel accident, s'il survenait, ne concernerait qu'un faible nombre de conteneurs compte tenu de son caractère improbable. Ceux-ci n'auraient pas de raison d'être spécifiquement groupés au sein d'un même module, sauf à imaginer que le rapprochement des assemblages est dû à un défaut de fabrication sur une série. Le fait de regrouper les colis, dans le SEA « défaut de colis » est a priori plus pénalisant que de les répartir au sein du stockage, en particulier vis-à-vis de l'impact de radionucléides dont le transfert n'est pas limité par la solubilité (iode, chlore). La variante du SEA dans laquelle on envisage que l'ensemble des colis est défaillant couvre en toute hypothèse de manière certaine la possibilité d'accidents de criticité sur les combustibles usés, quelqu'en soit le nombre.

6.2.9.2 Risques de criticité dus à des re-concentrations de matière fissile

En situation normale, compte tenu du caractère diffusif de la migration des radionucléides, ceux-ci ont tendance soit à rester en place, soit à se disperser dans l'environnement immédiat du colis, de manière isotrope. Une telle situation est favorable à la réduction du risque de criticité. Dans un tel contexte, le risque de sur-criticité ne pourrait être associé qu'à une reconcentration massive de matière, à proximité des colis, due à un changement brutal des conditions physico-chimiques (qualifié de « front géochimique »). Une telle reconcentration pourrait se trouver favorisée, par ailleurs, par un hypothétique mouvement convectif de matière au sein de l'alvéole. Même dans l'hypothèse où un tel phénomène se produirait, il conviendrait pour que s'amorce une réaction de criticité que la masse de matière soit suffisante, que la géométrie de la masse de matière fissile concentrée soit propice à une sur-criticité, et que le milieu environnant favorise la réflexion des neutrons. De telles conditions réunies apparaissent suffisamment improbables pour conduire la plupart des experts à rejeter ces situations, jugées trop irréalistes. Néanmoins, pour couvrir plus complètement ce risque, l'Andra a retenu d'évaluer les possibilités de reconcentration de la matière fissile à la suite d'une migration sur une courte distance et de retenir les géométries les plus défavorables possibles (sous forme de sphères), dans un milieu saturé en eau. Ces dernières représentations permettent d'obtenir des ordres de grandeur des masses qu'il conviendrait de mobiliser pour aboutir à des accidents de criticité, et de justifier plus complètement du caractère irréaliste de ce type de situation au regard des masses fissiles disponibles dans les colis.

Compte tenu des temps nécessairement longs pour envisager une accumulation de matières radioactives dans un front géochimique, seuls les radionucléides fissiles à vie longue et présents en quantités significatives sont à considérer. Il s'agit de l'uranium 235, et dans une moindre mesure du plutonium 239. Les possibilités de reconcentration de ces deux radionucléides au sein du stockage ont fait l'objet d'une évaluation. Deux types de processus peuvent engendrer des re-concentrations localisées en radionucléides : la rétention au sens large (adsorption, précipitation de surface, incorporation/ substitution) et la précipitation en solution (voire la co-précipitation de l'uranium et du plutonium). La re-concentration n'apparaît possible qu'au voisinage immédiat des déchets, là où les conditions physico-chimiques peuvent être hétérogènes. Sont essentiellement concernées la couche corrodée des conteneurs métalliques de déchets exothermiques (pouvant induire des variations de conditions redox), et la périphérie immédiate des colis primaires B, en conditions cimentaires saturées en eau.

Le risque hypothétique de criticité associé à une éventuelle re-concentration a été étudié pour chaque type de colis B, C ou CU en supposant que la matière se concentrait sous forme de sphères contenant de l'eau et du ^{239}Pu (pour les colis B ou C) ou de l'uranium et de l'eau pour les assemblages combustibles.

On n'a de plus pas pris en compte les éléments absorbant potentiellement les neutrons et empoisonnant le milieu fissile, tels que :

- les éléments constituant le matériau d'accueil (béton, fonte ou acier dégradés) ;
- les éléments co-précipitant avec le ^{239}Pu ou les différents isotopes de l'uranium compte tenu d'un comportement chimique analogue (les lanthanides, le zirconium, l'étain...) ;
- les éléments radioactifs (les autres actinides ou des produits de fission) susceptibles de fournir de l'anti-réactivité et dont la précipitation avec l'uranium et le plutonium est probable.

La masse maximale au cours du temps susceptible de se reconcentrer est comparée à la masse critique du milieu de référence considéré, soit 510 g s'il s'agit de plutonium et 260 kg pour l'uranium présentant un taux d'enrichissement maximal de 2 % au cours du temps (enveloppe pour les combustibles UOx).

● **Analyse pour les alvéoles B**

L'analyse de la quantité de matière fissile maximale au cours du temps et disponible dans chacun des colis primaires B montre qu'il est nécessaire de concentrer la matière fissile contenue dans plusieurs colis pour aboutir à une criticité. Les colis de stockage B contenant plusieurs colis primaires, un éventuel recouvrement de ces hypothétiques zones de concentration a aussi été étudié : le risque de criticité serait théoriquement possible si les recouvrements étaient parfaits et sphériques et si tous les colis primaires d'un même colis de stockage contenaient la masse fissile maximale. Il s'agit de conditions complètement irréalistes. Elles ne sont pas retenues en scénario d'évolution normale, ni pour la définition de situations altérées.

● **Analyse pour les alvéoles C**

Un raisonnement analogue pour les colis C montre que la matière fissile disponible dans toute l'alvéole C0 est insuffisante pour atteindre une masse critique, ceci même en regroupant toute la masse fissile disponible dans les colis disposés dans l'alvéole. Pour les colis C1, C2, C3 et C4, compte tenu de la présence d'intercalaires, le raisonnement se fait au niveau du colis unitaire en excluant tout recouvrement.

Pour les déchets C1/C2, le risque est exclu puisque la quantité de matière fissile maximale présente au cours du temps dans chaque colis est inférieure à la masse nécessaire à la criticité. Pour le colis C3, ce risque peut être jugé très improbable puisque la matière fissile disponible est du même ordre de grandeur que la masse critique.

Pour le colis C4, supposé contenir 2,3 kg de ^{239}Pu équivalent, la masse nécessaire à une criticité ne peut être accumulée avant 100 000 ans compte tenu du terme source et de la vitesse de migration des radionucléides. Au-delà, l'hypothétique milieu fissile ne serait alors constitué que de ^{235}U , produit de la décroissance radioactive du ^{239}Pu . La masse critique de ce nouveau milieu fissile est d'environ 800 g soit le tiers de la masse fissile disponible. Une situation de criticité apparaît donc peu probable au regard des nombreuses hypothèses conservatives associées à la définition de cette masse (géométrie sphérique, absence d'empoisonnement par des éléments coprécipitants, etc.). Compte tenu de ces éléments, la prise en compte d'un accident de criticité à la suite de la migration des radionucléides hors des colis de déchets vitrifiés, en situation normale ou altérée, est écartée.

● **Analyse pour les alvéoles de combustibles usés**

Pour les assemblages de combustible usé de type UOx, il paraît totalement irréaliste que des conditions physico-chimiques permettent la concentration de 260 kg d'uranium « pur » dans la couche minéralisée des conteneurs métalliques, ceci d'autant plus que les vides sont minimisés dans les alvéoles et que la quantité d'uranium par assemblage est de l'ordre de 500 kg ; il faudrait donc concentrer, de manière pure et sous forme sphérique, la moitié de l'uranium contenu dans un assemblage. Dans le cas des combustibles MOX, dont l'enrichissement résiduel en uranium 235 peut s'élever à 4,6 % au cours du temps, la masse reconcentrée nécessaire pour provoquer un accident de criticité est plus faible (40 kg) mais reste suffisamment significative pour considérer le risque comme improbable, ceci d'autant plus qu'elle repose sur les mêmes hypothèses pénalisantes (géométrie sphérique, absence d'éléments coprécipitants ou de constituants de la matrice, etc.). Seule une éventuelle concentration du plutonium des combustibles MOX, indépendamment de l'uranium (et en particulier de l'uranium 238 absorbant neutronique) pourrait théoriquement permettre d'atteindre une masse critique. Les conditions très similaires de précipitation du plutonium et de l'uranium (et la probable présence d'autres éléments de comportement analogue) conduisent à exclure ce scénario.

● **Synthèse**

En conclusion, il peut être retenu que si un front géochimique venait à se créer dans le stockage, les évaluations montrent que, pour l'ensemble des colis, le risque de concentration de matière fissile dans le stockage ne peut induire d'accident de criticité

6.2.10 Incertitudes sur les phénomènes de transport

Ce paragraphe a pour objectif de résumer les incertitudes sur les modalités de transport retenues pour décrire la migration des radionucléides dans le stockage, en scénario d'évolution normale. La thématique relative au transport des solutés a déjà été abordée dans la section consacrée aux phénomènes hydrauliques. On aborde donc ici d'une part la possibilité de transport de radionucléides sous forme gazeuse, d'autre part le transport colloïdal.

6.2.10.1 Transport de radionucléides à l'état gazeux

Certains colis de déchets sont susceptibles de relâcher des radionucléides en phase gazeuse ; d'autres, bien qu'en phase dissoute, pourraient devenir gazeux si l'environnement chimique s'y prêtait.

On peut dans un premier temps exclure les radionucléides gazeux ayant des vies courtes ou présents en trop faible quantité pour engendrer un impact : c'est le cas par exemple du tritium, de ^{39}Ar ou de ^{85}Kr . L'iode 129, en conditions de stockage, se dissout très facilement sous forme d'iodure non volatile et stable. Il en va de même du chlore 36, qui est présent sous forme de chlorures.

Le carbone 14 constitue un cas plus difficile à évaluer, car il est susceptible d'être présent sous deux valences différentes (IV ou VI). Seule la valence IV est mobilisable sous forme de gaz (CO_2 ou CH_4). Sous cette forme, le carbone provient à plus de 98 % des gaines de combustibles usés (déchets B4, déchets B5, et colis de combustibles usés). Dans les matrices de combustibles, dans les verres ou les autres déchets B, on ne le retrouve qu'à la valence VI.

Compte tenu de la capacité du CO_2 à se dissoudre dans l'eau, seul le méthane radioactif est susceptible de migrer sous forme non dissoute dans le stockage. La formation de $^{14}\text{CH}_4$ nécessite pour sa part une activité bactérienne, qui est très limitée dans les combustibles usés ou les déchets purement métalliques. Elle n'est donc envisageable que dans les déchets de structure compactés mélangés à des déchets organiques (colis type B5.1). Le carbone 14 contenu dans ces déchets représente dans une estimation majorante 75 moles au plus. Si ce méthane radioactif accompagnait les gaz de corrosion dans leur migration, jusqu'aux encaissements ou jusque dans l'environnement, il représenterait un impact négligeable, d'autant plus qu'il serait dilué dans des quantités bien plus importantes d'hydrogène.

Le méthane aura donc décré (la période radioactive du carbone 14 étant de 5 730 ans) avant de pouvoir sortir du stockage. Même dans des situations altérées, dans lesquelles on pourrait imaginer qu'il transite très rapidement – par exemple au sein d'une EDZ très dégradée et non interrompue par des scellements - il pourrait décroître lors du transfert dans les encaissements (50 000 ans au moins). Seule une situation de forage direct dans une alvéole pourrait conduire à exposer un foreur à du méthane radioactif. Une évaluation majorante de la dose induite montre qu'elle est au plus de 0,03 mSv, donc négligeable [97].

En définitive, ce raisonnement montre que tous les scénarios, SEN et SEA, peuvent négliger le transfert de radionucléides gazeux.

6.2.10.2 Transport colloïdal

Le transport par la phase colloïdale, distingué des phases solubles et particulaires de manière opératoire par sa taille (de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres) est à considérer a priori. Il pourrait concerner une partie des actinides, ainsi que des éléments tels que le zirconium et le niobium.

Dans un premier temps sont traités les colloïdes qui se forment dans les colis et la barrière ouvragée.

Les conditions alcalines dans les alvéoles B sont de nature à limiter fortement l'action des colloïdes. Seules des concentrations faibles de telles molécules ont en effet été obtenues par expérimentation en colonnes contenant des matériaux cimentaires. Ces concentrations s'expliquent par des processus de floculation dans les eaux cimentaires de pH 12,5 et de force ionique de 0,07 M. La rétention de quelques radioéléments a été étudiée sur la faible proportion de colloïdes ainsi obtenus. Il ressort que malgré une surface spécifique élevée et de fortes capacités de rétention mesurées notamment pour le thorium, les faibles concentrations font que l'impact des colloïdes sur la mobilisation des

radionucléides dans un matériau cimentaire est faible [21]. Pour prendre en compte néanmoins les effets des produits de dégradation de la cellulose qui sont susceptibles d'avoir un pouvoir complexant non négligeable, les paramètres de transport dans les alvéoles de déchets B3 ont été dégradés en SEN.

Dans les alvéoles de déchets vitrifiés et de combustibles usés, des colloïdes organiques sont peu susceptibles de se former, en particulier du fait des faibles quantités de matière organique. Il est néanmoins possible qu'une faible concentration des colloïdes soit produite lors de la dégradation des déchets.

Des colloïdes inorganiques peuvent par ailleurs se former pendant les processus de corrosion. Le rôle complexant des produits de corrosion est encore mal connu, mais on s'attend en référence à ce qu'ils présentent plutôt une capacité à sorber les radionucléides et à les retenir en champ proche. Cette capacité n'est pas prise en compte en SEN.

Compte tenu de la faible porosité du milieu environnant les alvéoles, les colloïdes qui ne seraient pas retenus en champ proche, notamment par le bouchon, seraient filtrés par les argilites saines, caractérisées par leur faible porosité. C'est l'objectif de la fonction « filtrer les colloïdes » (voir chapitre 3).

Tant qu'un régime diffusif prédomine, la taille de la plupart d'entre eux ne leur permet donc pas de migrer significativement. Seules des molécules de petite taille (de l'ordre de quelques nanomètres) pourraient progresser par diffusion dans la bentonite et les argilites, mais du fait de leur forte capacité d'échange avec le milieu ambiant, elles ne parcourraient pas des distances significatives dans le milieu sans subir d'interactions chimiques les immobilisant ou les désolidarisant du radionucléide qu'elles transportent.

Dans ces conditions, les incertitudes portent sur la possibilité que ce transport colloïdal puisse s'effectuer dans une éventuelle zone fracturée non colmatée, ou dans la bentonite non encore saturée. Elles se ramènent à la possibilité de migration dans un milieu présentant une porosité importante (par exemple une EDZ très dégradée) et sous l'effet de conditions de transport convectives.

Les scénarios d'évolution altérée « défaut de scellements » et « forage », envisagent une étude de sensibilité dans laquelle le transport au sein de l'EDZ fracturée s'effectue sans propriétés de rétention chimique (sorption nulle, solubilité infinie) pour les radionucléides qui font l'objet du calcul. En anticipation des résultats des SEA qui seront présentés au chapitre 7, on peut noter que, dans un tel cas, les argilites saines jouent un rôle de « barrière absorbante », sorbant les radionucléides qui pourraient a priori progresser dans l'EDZ et empêchant ainsi leur transfert. Un tel phénomène est représentatif de ce qui se produirait pour un transport par des colloïdes minéraux de petite taille, qui finiraient par entrer dans les argilites et y subiraient des interactions importantes du fait de la capacité d'échanges cationiques du milieu. Les colloïdes de plus grande taille, tels que les amas d'actinides, ne peuvent se transporter sur des distances significatives sans se désolidariser.

6.2.11 Incertitudes sur les couplages thermiques

On aborde dans le paragraphe qui suit les incertitudes portant sur l'influence de la thermique sur les différents processus évoqués jusqu'ici.

6.2.11.1 Rappel sur la gestion des incertitudes d'ordre thermique

Les effets de couplage liés à la thermique concernent essentiellement les alvéoles de déchets C vitrifiés et de combustibles usés, ainsi que leur environnement proche. Les alvéoles de déchets B5 (déchets de structure compactés) connaissent une élévation de température plus modérée et transitoire, qui n'est pas susceptible d'influencer significativement le comportement mécanique de l'alvéole ni le transport.

Il importe de rappeler que d'éventuelles incertitudes sur les effets thermiques sont couvertes avant tout par conception. On se prémunit d'éventuels effets irréversibles sur la roche, mécaniques ou chimiques :

- en limitant la température des colis entrant dans le stockage ;
- en les espaçant par des intercalaires [98].

On limite également l'influence de la température sur les spéciations et modes de migration des radionucléides en ambiance thermique en protégeant les colis sur la durée nécessaire.

Du point de vue de la modélisation du champ thermique lui-même, peu d'incertitudes demeurent. Les évaluations de charge thermique ont été conduites selon deux approches de modélisation, l'un à deux dimensions et l'autre, plus réaliste, prenant en compte la géométrie des alvéoles en trois dimensions. Les dimensionnements de conteneurs, et les calculs conduits en SEN, se fondent sur le modèle 2D qui est le plus pénalisant. Cela procure des marges importantes, couvrant toute autre incertitude portant sur l'évaluation du champ de températures.

6.2.11.2 Incertitudes sur les effets thermohydrauliques

Compte tenu des dispositions de conception prises, les effets de couplage entre la thermique et l'hydraulique sont de peu d'ampleur. La limitation des températures des colis en entrée de stockage limite également les gradients thermiques. De ce fait, la thermoconvection est négligeable [99] ; l'effet Soret (influence de la température sur la diffusion) a été évalué et pris en compte dans les cas où il pouvait avoir une influence (sur la migration en ambiance thermique autour des alvéoles de combustibles usés).

On notera également que la chaleur émise dans les alvéoles de déchets vitrifiés et de combustibles usés est susceptible de mettre transitoirement en pression l'eau porale dans leur environnement immédiat. Cet effet dont l'ampleur, bien qu'incertaine, est en tout état de cause faible, est de second ordre devant la mise en pression sous l'effet des gaz. Il est couvert, à ce titre, par l'étude de sensibilité du SEN envisageant des pressions hydrauliques imposées par l'hydrogène pendant le relâchement d'un conteneur de combustibles usés défaillant.

6.2.11.3 Incertitudes sur les effets thermomécaniques

L'impact des effets thermomécaniques sur les alvéoles de déchets vitrifiés et de combustibles usés concerne en premier lieu les argilites à proximité immédiate des alvéoles. Elles peuvent subir de manière transitoire des déformations liées aux contraintes thermiques, qui induisent une augmentation modérée et réversible de l'EDZ sur le pourtour de l'alvéole. Cet endommagement est in fine repris par le fluage des argilites. L'effet est plus sensible au droit des colis, là où le champ de température est le plus élevé, et moins au niveau du bouchon qui est plus éloigné. Or un éventuel agrandissement de l'EDZ, à distance suffisante du bouchon, n'a pas d'impact significatif sur les alvéoles, dans la mesure où le régime diffusif continue d'y être assuré par le contact entre le bouchon et la roche (pour les alvéoles de déchets C) ou par la barrière ouvragée (pour les combustibles usés). Même si l'endommagement se propageait jusqu'au bouchon, le gonflement de celui-ci serait à même de reprendre l'EDZ.

Pour les alvéoles de combustibles usés, compte tenu que cet endommagement demeurerait modéré, cela ne modifie pas la représentation du scénario d'évolution normale, qui envisage déjà la présence d'une zone fracturée non refermée et pérenne autour des alvéoles. Au titre de la gestion des incertitudes, on retient la possibilité qu'une zone fracturée puisse se créer dans les alvéoles de déchets vitrifiés et ne pas être reprise à terme par le bouchon (par exemple, en associant cette incertitude à un défaut de gonflement de l'argile gonflante). Un défaut de ce type, ponctuel, est envisagé en scénario d'évolution normale et n'a aucune influence sur l'hydraulique du stockage. Une défaillance systématique de l'ensemble des bouchons d'alvéoles C est retenue en scénario d'évolution altérée « défaut de scellements⁸³ ».

La charge thermo-mécanique subie par les conteneurs et surconteneurs au sein des alvéoles de déchets vitrifiés et de combustibles usés est couverte par leur dimensionnement mécanique. Elle n'est pas de nature à remettre en cause les fonctions assurées par ces composants. Il en va de même du revêtement des alvéoles (le chemisage, dans les concepts sans barrière ouvragée). Les éventuelles déformations seraient minimales, et ne pourraient entraîner à elles seules d'efforts supplémentaires sur l'environnement des conteneurs et des chemisages (donc sur l'argilite elle-même).

6.2.11.4 Incertitudes sur les couplages thermochimiques et les couplages avec le transport

Des écarts de composition géochimique des eaux du Callovo-Oxfordien, ainsi que des modifications des propriétés relatives au transport, peuvent résulter de l'effet de la température dans l'environnement des alvéoles de déchets thermiques. Ces effets ont été mesurés sur des échantillons de roche [21] sur des cycles thermiques atteignant 80°C.

Les effets de la température sur les coefficients de diffusion sont à considérer. Le champ de température peut en effet modifier les valeurs phénoménologiques des paramètres de diffusion (D_e , ω_{acc}) représentatives des argilites non perturbées thermiquement. Un programme expérimental spécifique a été mis en œuvre, pour vérifier si l'effet de la température sur les coefficients de diffusion du tritium et des chlorures dans les argilites est modifié par la température. Les résultats acquis montrent que pour un cycle de température de 20°C à 80°C, le coefficient de diffusion effective de l'eau tritiée croît (de $2,5 \cdot 10^{-11}$ à $1,2 \cdot 10^{-10}$ m²/s) mais que lors du retour à 20°C il est mesuré une valeur de 20 à 30 % supérieure à la valeur initiale, qui signe peut-être un effet partiellement irréversible mais qui apparaît en tout état de cause négligeable compte tenu de son ordre de grandeur. Une dépendance réversible du coefficient de diffusion effective à la température a été prise en compte dans les volumes de Callovo-Oxfordien soumis à des températures supérieures à 22°C. Elle se traduit par une fonction de correction fondée sur la courbe des coefficients de diffusion de l'ion chlorure mesurés à différentes températures [88].

Vis-à-vis de la solubilité, les effets de la température ne sont pas explicitement pris en compte. Ceci est lié d'une part à un manque de données thermodynamiques pour l'ensemble des équilibres à prendre en compte, et d'autre part au fait que les évaluations expérimentales réalisées à ce jour tendent à montrer que les effets restent négligeables. Il a donc été choisi de ne pas prendre en compte explicitement une dépendance de la solubilité à la température. Ce choix est le plus représentatif au regard des connaissances actuelles.

Pour les K_d , un programme expérimental spécifique a été conduit, et une dépendance à la température a été prise en compte pour les radionucléides pour lesquels un effet a pu être observé. Pour la majorité des radionucléides, le K_d est considéré comme indépendant de la température dans les gammes de variation thermique considérées, à ce stade des connaissances.

Ces résultats tendent à montrer que les effets de la thermique sur les propriétés de transport sont limités, et ce jusqu'à des températures de 80°C. Cependant, il convient de souligner que les expérimentations ont porté sur des cycles thermiques nécessairement courts au regard de ceux que connaîtra le Callovo-Oxfordien. Les paramètres de transport en température sont encore relativement incertains à ce stade des connaissances. Les conclusions que l'on peut tirer des cas de calculs prenant

⁸³ Ce SEA envisage en fait une situation sensiblement plus pénalisante, où la zone fracturée est continue autour de l'ensemble des scellements. Ce cas de calcul couvre à l'évidence un défaut des seuls bouchons d'alvéoles.

en compte des conteneurs et surconteneurs défaillants doivent être considérées avec une certaine prudence ; en particulier, elles n'invalident pas la pertinence des dispositions de conception retenues pour empêcher les transferts en ambiance thermique.

Par ailleurs, du point de vue de l'hydraulique, la perméabilité intrinsèque ne dépend que de la structure de l'espace poral. On ne s'attend donc pas à ce qu'elle varie dans la gamme de température considérée. Cependant, les champs de température produits par les déchets ont un impact sur le coefficient de viscosité dynamique [88]. L'effet de la température sur la perméabilité a été évalué par modélisation. Celle-ci montre que la composante verticale de la vitesse convective de l'eau au travers du Callovo-Oxfordien peut être triplée (à 80°C) pendant la période exothermique.

Cette dépendance de la perméabilité à la température n'a pas été retenue pour représenter le Callovo-Oxfordien dans le SEN, dans la mesure où le transport y est à dominante diffusif avec une bonne marge de sécurité. En revanche, le calcul prend en compte cette relation dès que le transport est susceptible de devenir convectif (en particulier dans les galeries, ou l'EDZ).

6.2.11.5 Synthèse sur les effets liés à la thermique

Les incertitudes sur la prise en compte des couplages induits par la thermique du stockage, potentiellement importantes, sont réduites très significativement par les dispositions de conception.

Ces dernières sont associées à des évaluations conservatives de l'extension du champ thermique, permettant de s'assurer qu'elles répondent à l'objectif d'une évaluation de sûreté prudente.

On retient cependant que, en champ proche des alvéoles, les interactions thermomécaniques, bien que couvertes par le scénario d'évolution normale, pourraient, si elles étaient d'une ampleur plus forte qu'attendu, donner lieu à des situations altérées couvertes en SEA « défaut de scellements ».

La prise en compte de conteneurs défaillants, dès le stade du scénario d'évolution normale, conduit cependant à devoir envisager des transports en phase thermique. Dans ce cadre, des premières données issues d'expérimentations en conditions représentatives ont été prises en compte (coefficients de diffusion, coefficients de partage...). La prise en compte d'un scénario de défaut de colisage plus généralisé que ce qui est pris en compte en SEN, et la comparaison de ses résultats avec ceux du scénario de référence, permet de juger de la sensibilité de l'impact à ce type de données.

6.2.12 Incertitudes technologiques

Les incertitudes sur la mise en œuvre des techniques prévues pour la construction des ouvrages de stockage ou la mise en place des colis sont réduites par la stratégie même qui a été adoptée, qui consiste à s'appuyer en premier lieu sur des technologies éprouvées dans des contextes miniers ou nucléaires.

Dans un tel contexte, les incertitudes ne proviennent que :

- de certaines techniques qui, bien que déjà mises en œuvre dans l'industrie ou déjà testées expérimentalement, sont en partie spécifiques du stockage et ne sont pas fréquemment utilisées dans d'autres contextes industriels. Dans le cadre d'une analyse de sûreté cherchant à couvrir de manière la plus large possible les incertitudes, il est opportun d'envisager la possibilité que ces technologies soient, ponctuellement au cours de l'exploitation du stockage, mal maîtrisées ;
- de problèmes de contrôle qualité dans la mise en œuvre d'une technologie, c'est-à-dire l'obtention du fait de causes aléatoires d'un résultat non conforme aux attentes, bien que la technologie elle-même ait été validée (par exemple un défaut dans la fabrication d'un colis).

Ces différents cas de figure sont évoqués tour à tour dans la suite.

6.2.12.1 Incertitude sur les technologies mises en œuvre dans le stockage

Un certain nombre d'opérations, différentes dans leur objet, ont en commun de devoir être conduites en veillant à ne pas créer de vides excessifs. Les vides ne peuvent être évités totalement au sein du stockage. D'une part, il en existe au sein des colis primaires, pour des questions liées aux techniques de conditionnement ou à la sûreté de l'entreposage préalable. Les conteneurs primaires de verres présentent ainsi un vide apical, tout comme les fûts d'enrobés bitumineux. Par ailleurs, des jeux sont nécessaires pour faciliter la mise en place aisée des colis primaires dans leurs conteneurs, et des conteneurs au sein des alvéoles. Des jeux minimaux facilitent également la réversibilité.

On aborde ici les questions de mise en place des matériaux dans les différents compartiments du stockage : dans les alvéoles, dans les galeries, au niveau des scellements, en particulier du point de vue de la maîtrise des jeux.

● Dans les alvéoles

Les vides ont une influence sur plusieurs types de phénomènes, sans qu'il soit toujours possible d'émettre une appréciation sur un caractère favorable ou non vis-à-vis de la sûreté. A titre d'exemple, la présence de vides retarde la resaturation des alvéoles – ce qui n'est ni positif, ni négatif, mais doit être pris en compte dans les analyses -, ainsi que la montée en pression des gaz produits par corrosion des éléments métalliques. Ils peuvent cependant induire un endommagement mécanique des matériaux qui les environnent (défaut de soutien du toit des ouvrages, contraintes de cisaillement sur des colis mal empilés, etc.).

De manière générale, on cherche cependant à les limiter, afin de maîtriser les déformations mécaniques à long terme au sein des ouvrages. Un taux de vide maximal de 5 % est retenu, en particulier pour les alvéoles B où l'espace entre les colis n'est pas rempli. Le comportement à long terme des matériaux favorise la résorption des vides, tant du fait du caractère expansif des produits de corrosion métalliques que par le gonflement des argiles. Aux endroits où un vide significatif est susceptible d'être laissé en place par les conditions d'exploitations (en tête des alvéoles de déchets B par exemple), il est prévu de le combler. On veille également à la compacité des matériaux de remplissage (remblais, bentonite) pour éviter le développement de jeux qui peuvent soit autoriser un fluage excessif des argilites, néfaste à très long terme, soit constituer des voies privilégiées pour le transfert des radioéléments (à l'interface entre les scellements et la roche, par exemple).

Les incertitudes sur la quantité de vides laissés en place relèvent donc d'incertitudes :

- sur le vide au sein des colis primaires de déchets, qui est en règle générale un paramètre spécifié pour les colis produits récemment, et peut être évalué par mesure le cas échéant, pour les colis les plus anciens ;
- sur le comportement à long terme des matériaux (risques sur le non gonflement de la bentonite, expansion des produits de corrosion) déjà traités au paragraphe 6.2.8 ;
- sur les technologies de mise en place des matériaux du stockage, objet du présent paragraphe.

Dans les alvéoles de déchets B, l'intérieur des compléments de colisage minimise les jeux de mise en place. Il n'est pas prévu en revanche de combler les vides entre les colis de déchets B (Figure 6.2-19). Une telle opération s'avérerait difficile en pratique. Elle nuit de plus à la réversibilité du concept. Les calculs de tenue mécanique au sein de l'alvéole prennent en compte les jeux entre colis. La mise en place de ces blocs de béton selon un empilement régulier, en télé opération, n'est pas une manœuvre complexe. Elle dispose d'un retour d'expérience significatif, et les outils existent pour la mener à bien. Il demeure cependant difficile de garantir un alignement parfait et sans défaut. Des écarts mineurs dans le positionnement des colis peuvent intervenir, et développer des contraintes significatives sur la coque en béton. Afin de couvrir notamment cette incertitude, l'Andra n'a pas retenu à ce stade de faire appel à la tenue mécanique des colis pour garantir des fonctions de sûreté de long terme, autrement qu'à titre de variante. Si une telle variante, attribuant un rôle de durabilité mécanique au complément de colisage, était retenue à terme, des études plus détaillées sur la tenue des empilements de colis et les tolérances acceptables sur les défauts de mise en place seraient nécessaires.

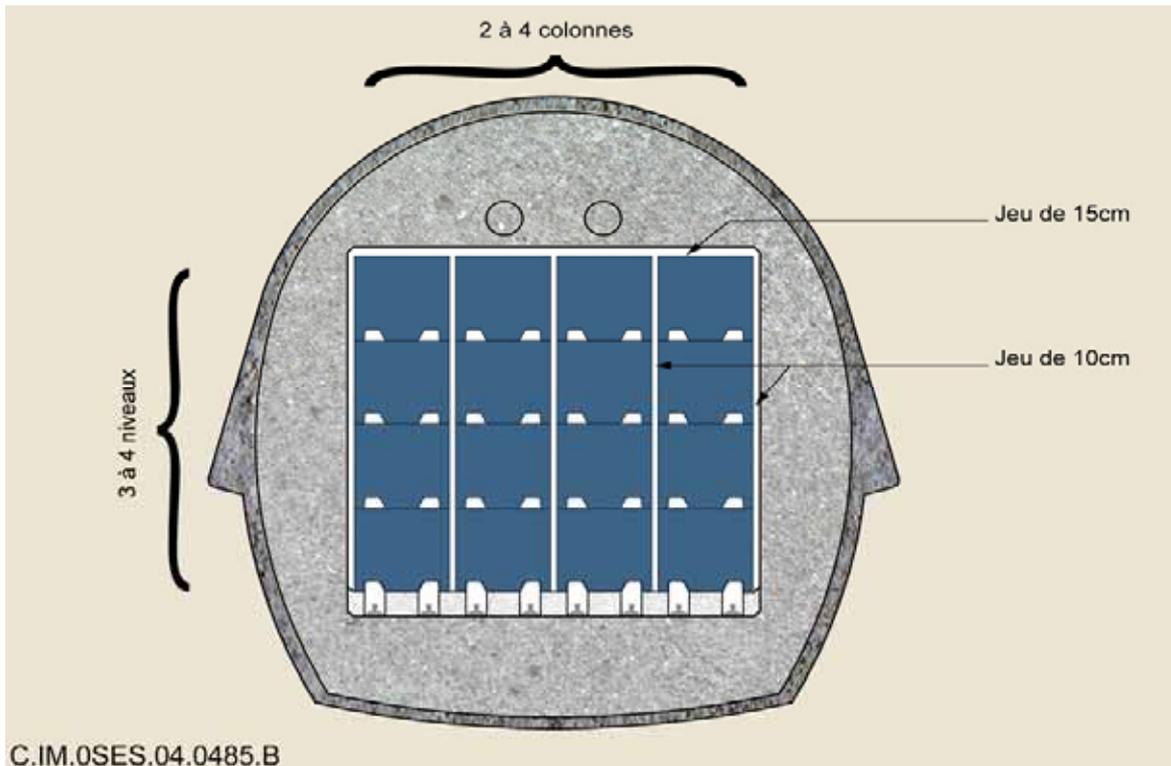


Figure 6.2-19 Jeux résiduels de mises en place dans les alvéoles de déchets B

Dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés, les vides sont réduits et maîtrisables. Ils sont soit internes au colis (au sein du CSD-V, entre les éléments du conteneur de combustible usé), soit entre le chemisage et le conteneur, pour permettre la mise en place (voir Figure 6.2-20). Dans un cas comme dans l'autre, ils n'apparaissent pas pénalisants au regard de l'analyse de sûreté : l'air présent dans les vides, qui peut oxyder les conteneurs soit directement, soit au travers de la radiolyse par le rayonnement des colis, est pris en compte dans le dimensionnement. Du point de vue de l'évolution à long terme, le lent fluage du milieu géologique, le gonflement de la bentonite de la barrière ouvragée (pour les concepts qui en sont pourvus) ainsi que l'expansion des produits de corrosion, devraient les combler à terme jusqu'à l'équilibrage mécanique global au sein de l'alvéole. La fermeture par le biais du bouchon maintient des conditions diffusives au sein de l'alvéole. La présence de vides ponctuels ne pose pas de problème.

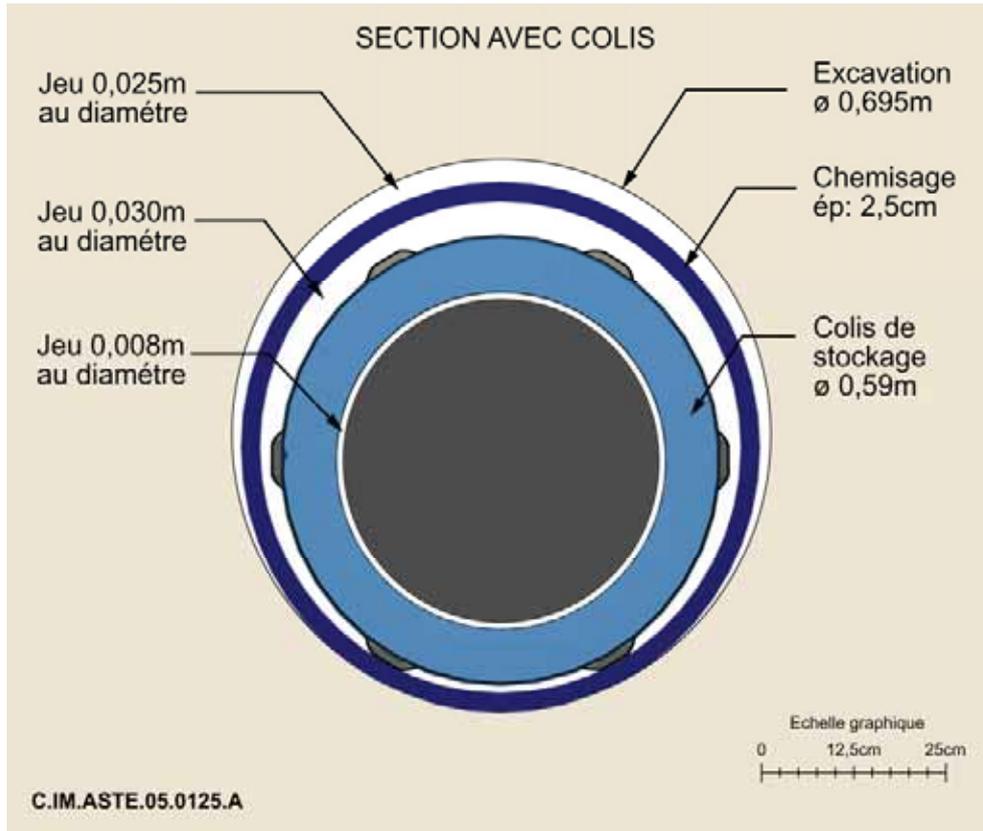


Figure 6.2-20 Jeux résiduels de mise en place dans les alvéoles de déchets C

● En galeries

La mise en place d'un remblai avec un bon contact entre la roche et le remplissage a été testée au laboratoire d'Aspö [100], selon une technique de mise en place par couches inclinées successives qui permet d'atteindre une compaction homogène, jusqu'au toit de la galerie (voir Figure 6.2-21). Le remblai d'appui à proximité des scellements de galerie a pour rôle de reprendre le confinement du scellement après dégradation du massif d'appui en béton. Compte tenu de la durée de resaturation des scellements, il s'agit là d'une ligne de défense offrant une sécurité supplémentaire, mais qui ne devrait pas être mobilisée – le gonflement des scellements se déroule sur une période au plus millénaire, compatible avec la durée de vie du béton. Un défaut de ce « remblai d'appui » n'aurait pas de conséquences a priori.

A titre conventionnel, on peut cependant retenir une incertitude sur la spécification et/ou la mise en place du remblai, conduisant à un défaut de soutien de la roche et à un mauvais gonflement des scellements. Une telle situation se caractériserait par un défaut d'efficacité de tous les scellements posés en galerie horizontale. En l'associant à une incertitude sur l'évolution de l'endommagement de la roche à long terme, on peut de plus imaginer que le défaut de soutien conduise à une dégradation des propriétés de l'EDZ. Une telle situation de défaut des scellements de galerie, prenant en compte en analyse de sensibilité des propriétés très dégradées de la zone fracturée et de la zone microfissurée, est envisagée en SEA « défaut de scellements », elle est en effet couverte par une situation de défaillance de tous les scellements.

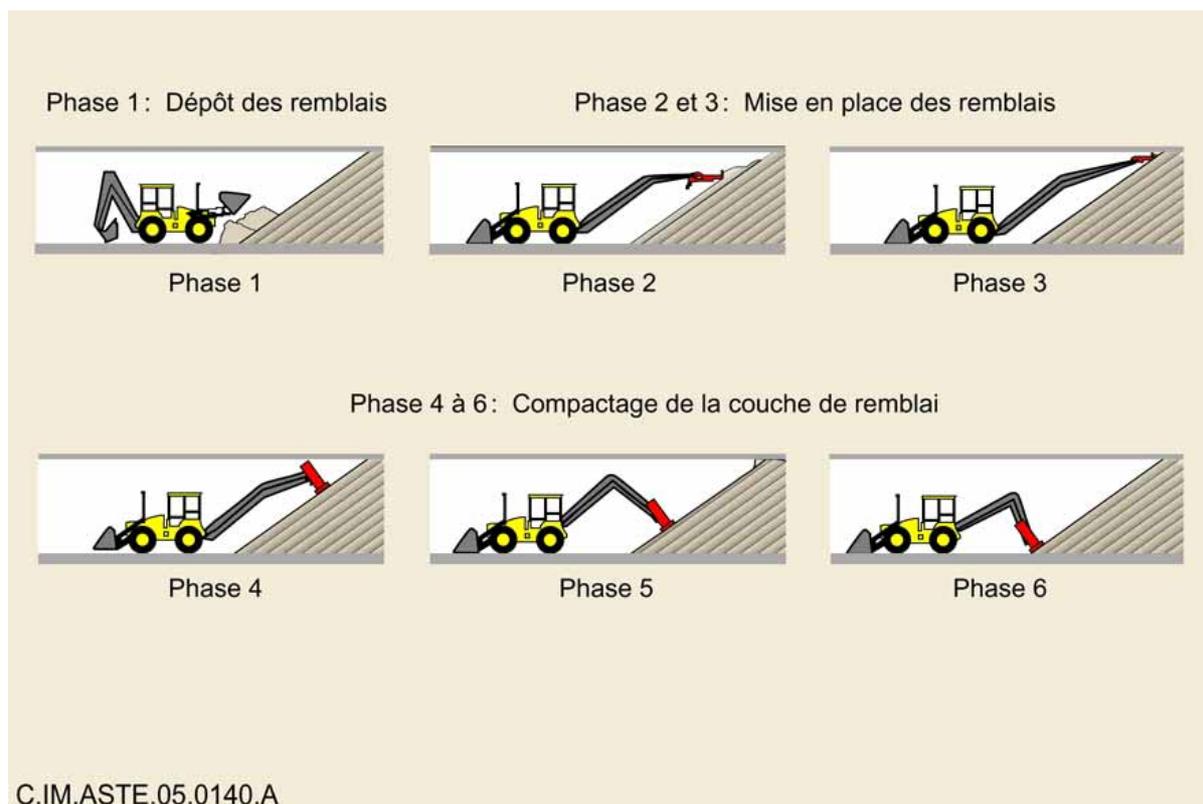


Figure 6.2-21 Schéma de principe de la mise en place d'un remblai de galerie

La même incertitude peut s'envisager pour le remblai en béton, dans le puits. La performance mécanique de ce dernier, destinée à supporter le poids du massif d'appui et du scellement de puits au-dessus de lui, n'est cependant pas particulièrement exigeante. Une défaillance de ce remblai pourrait induire un défaut du massif d'appui, et à travers lui un mauvais gonflement ou un glissement du scellement de puits, pris en compte en SEA « défaut de scellements » qui envisage une défaillance de ce composant.

La mise en place du soutènement, puis du revêtement, est une opération classique en génie minier, seules les exigences de tenue à échelle séculaire, voire au-delà, sont plus spécifiques du stockage. Des fissures de retrait, même traversantes, n'engendrent pas de problèmes de stabilité mécanique sur une telle durée. Seule la perméabilité est augmentée (mais elle n'est pas requise, aucune fonction de sûreté n'étant affectée au soutènement ni au revêtement vis-à-vis de la limitation des écoulements).

● Scellements et barrières ouvragées en argile gonflante

Une dernière incertitude concerne la mise en place des scellements et des barrières ouvragées. La problématique se pose par ailleurs de manière différente en galeries, c'est-à-dire pour des scellements horizontaux ou sub-horizontaux, que pour des scellements installés en puits.

La mise en place de scellements en bentonite a fait l'objet d'une validation expérimentale au laboratoire du Lac du Bonnet, au Canada, dans le cadre de l'expérimentation TSX (voir Figure 6.2-22). Cette expérience [43] a mis en œuvre et éprouvé hydrauliquement des scellements de galerie. Bien que la galerie d'essai ait été creusée à l'explosif créant ainsi un dommage important, l'expérience montre que des saignées d'interruption de la zone endommagée peuvent être réalisées par des moyens mécaniques (des forages jointifs) et s'avèrent efficaces. Les capacités de gonflement de la bentonite amoindrissent l'effet d'éventuelles hétérogénéités de mise en place.

La transposition de cet essai à un contexte argileux s'effectue d'elle-même pour ce qui est de la mise en place du corps du scellement ; la réalisation de la coupure hydraulique présente en revanche des spécificités. Sa faisabilité a été montrée dans le cadre des argiles à Opalinus, proches dans le

comportement mécanique des argilites de Bure, au laboratoire du Mont Terri. Elle sera validée par l'expérimentation KEY dans le laboratoire souterrain. Les incertitudes sur la mise en œuvre sont donc dès ce stade faibles, et pourront être réduites encore par l'exploitation des résultats des expérimentations à venir.



Figure 6.2-22 *Scellement expérimental constitué de briques de bentonite – essai TSX mené au Canada (à l'échelle industrielles, ces briques seraient de dimensions supérieures)*

Pour ce qui relève des barrières ouvragées, la technologie par introduction d'anneaux de bentonite limite les risques de mauvaise mise en place, qui pourraient être un peu plus forts avec un empilement de briques.

L'analyse de sûreté conduit cependant à prendre en compte, pour les scellements et pour la barrière ouvragée, le risque de mise en place imparfaite des éléments en argile gonflante. L'effet de ces défauts de contact est atténué par le gonflement et la plasticité de la bentonite. L'homogénéité finale du scellement, du point de vue hydraulique, dépend de la possibilité de comblement des vides lors du gonflement. Le démantèlement de l'expérimentation FEBEX a montré une très bonne cicatrisation des briques, de même que le démantèlement de la maquette OPHELIE au laboratoire de Mol en Belgique. On ne peut cependant pas entièrement exclure que la perméabilité soit localement un peu plus élevée le long de contacts imparfaits par rapport au cœur des anneaux. Si tel était le cas, elle pourrait favoriser une extension du front de réactions chimiques liée aux perturbations le long des hétérogénéités. De telles situations paraissent peu probables. Elles sont cependant prises en compte dans la définition des situations altérées, en représentant l'effet de briques à la fois mal compactées et mal cicatrisées (par exemple à cause d'une pression de gonflement insuffisante) par une diminution de la perméabilité d'ensemble des ouvrages en bentonite, associée à une perte du rôle protecteur du bouchon vis-à-vis du contenu des alvéoles. Le SEA « défaut de scellements » envisage ainsi un défaut du contact entre les scellements et la roche (équivalant, du point de vue du calcul, à un défaut de contact au sein de la bentonite) couplé à un pH élevé au sein des alvéoles de déchets vitrifiés, et une dégradation de la perméabilité des bouchons conduisant à la prise en compte en analyse de sensibilité d'un relâchement rapide par les matrices vitreuses.

Une mise en place non homogène ou un gonflement hétérogène de la barrière ouvragée pourrait de plus exercer des efforts sur les conteneurs de combustibles usés. Le dimensionnement mécanique de

ceux-ci devrait suffire à les supporter. Au pire, le défaut de conteneur ponctuel envisagé en SEN couvre une telle déformation excessive.

La mise en place d'une coupure hydraulique de scellement est une opération délicate qui suppose notamment de déposer les soutènements, de creuser la roche pour pouvoir y déposer les ancrages, puis de mettre en place les briques de bentonite avec le minimum de jeux. Les risques sont que le déconfinement des argilites, provoqué par le retrait du soutènement, ou le creusement de la coupure, n'engendrent un sur-endommagement de l'EDZ conduisant à une extension non anticipée de celle-ci. Compte tenu des faibles épaisseurs concernées, et de la durée limitée de l'opération, ce risque est cependant faible.

La coupure hydraulique telle qu'elle est prévue aujourd'hui sur la base de ces évaluations a de plus une capacité à intercepter la totalité de l'endommagement, y compris celui éventuellement créé par le déconfinement temporaire (voir Figure 6.2-23).

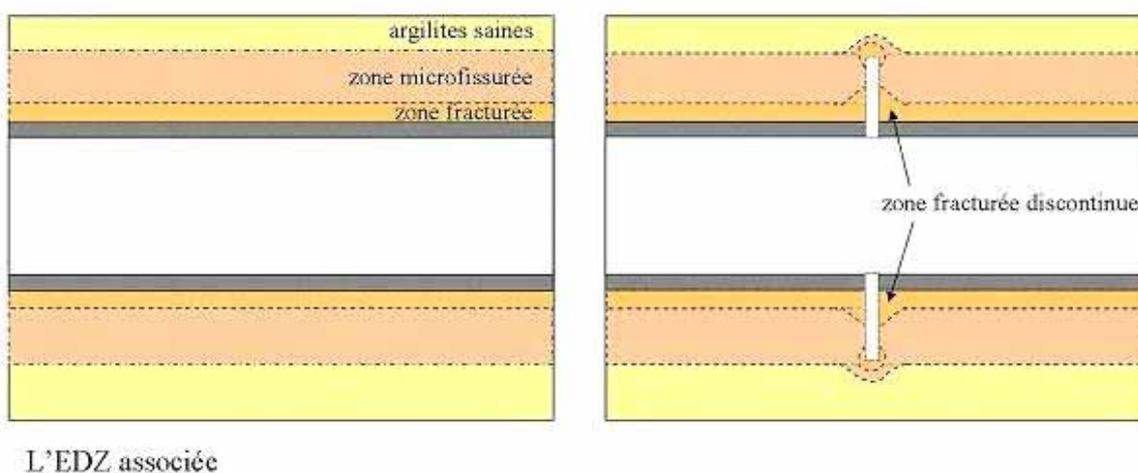


Figure 6.2-23

Conceptualisation de la discontinuité de la zone fracturée au niveau des saignées (située à la profondeur maximale sur la zone de transposition, soit 630 m)

Dans ces conditions, une non maîtrise des conditions de mise en place des coupures hydrauliques, conduisant à un sur-endommagement non détecté, paraît peu vraisemblable. Il s'agirait dans un tel cas d'une situation altérée, que l'on retient dans le scénario d'évolution altérée « défaut de scellements », qui envisage un défaut simultané de tous les scellements ancrés.

6.2.12.2 Erreurs de contrôle qualité

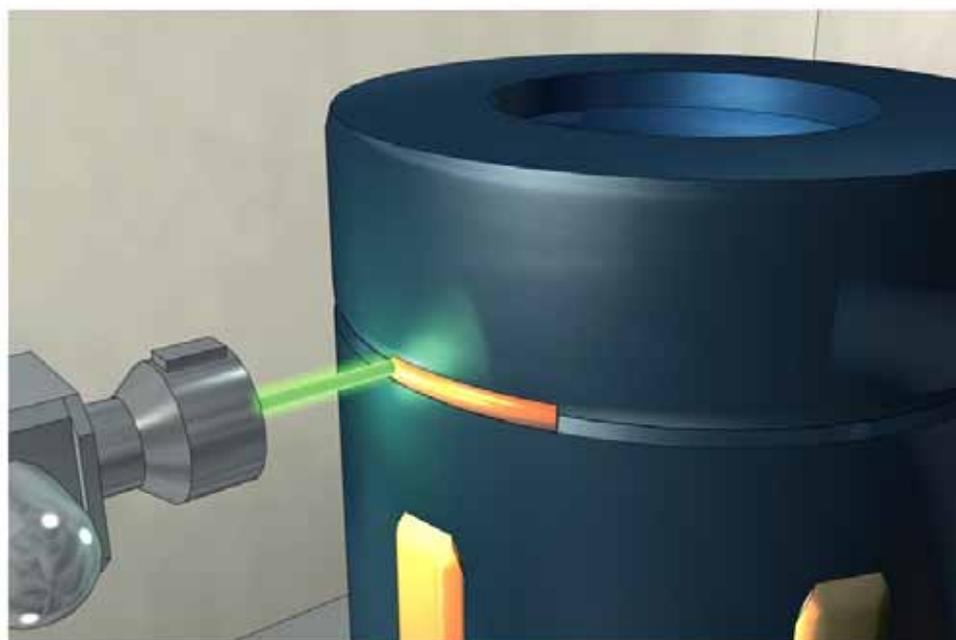
L'importance du facteur humain, c'est-à-dire des erreurs qui peuvent être commises par les opérateurs, est soulignée comme un risque important dans les installations industrielles. Il fait l'objet d'une attention particulière. Le retour d'expérience acquis par l'Andra sur le Centre de stockage de l'Aube montre par exemple que la majorité des non-conformités est due à une erreur du personnel. Le bon niveau de formation de celui-ci et des contrôles pratiqués régulièrement sur les activités permettent d'éviter les fautes graves, pouvant avoir des conséquences sur la sûreté. Néanmoins, le fait même qu'il n'apparaisse pas possible d'éliminer ce type de phénomène, bien qu'on puisse en maîtriser les effets, impose une vigilance permanente.

Au stade d'une étude de faisabilité, il serait prématuré de conduire une évaluation des risques liés au facteur humain sur chaque poste de travail, et des conséquences qui pourraient en résulter sur la sûreté à long terme. En première approche, on a retenu de n'identifier que les types d'erreurs pouvant résulter d'actes répétitifs (opérations menées à rythme régulier lors des opérations d'exploitation du stockage, et ayant un caractère « routinier ») portant sur fabrication ou la mise en place d'éléments ayant une fonction de sûreté pour le long terme.

Les premiers éléments importants de ce point de vue sont les conteneurs de stockage (complément de colisage de déchets B, surconteneurs de déchets vitrifiés, conteneurs de combustibles usés).

Pour les compléments de colisage B, la fabrication de conteneurs en béton peut conduire à des défauts de fabrication, même si les techniques de mise en place du béton sont bien maîtrisées. Du point de vue de l'homogénéité du matériau final, la principale difficulté est posée par les fissures de retrait dus à la reprise d'eau du béton après mise en place. Sur des ouvrages de grande dimension, les fissures qui se forment peuvent conduire à une réduction de la perméabilité en grand de l'ouvrage et donc nuire à terme à sa durabilité. Des techniques de maîtrise de cette fissuration existent ; en particulier, l'emploi d'un béton de formulation adapté (type « haute performance ») permet d'améliorer très sensiblement la mise en œuvre par rapport à un béton classique. Les fissures peuvent constituer des points faibles au regard de l'évolution ultérieure du matériau. Il est à noter que, dans le cas des colis destinés au stockage géologique, la conception limite les zones de fragilité en favorisant la continuité du matériau. Le contrôle visuel de défauts (fissures de retrait, éclats dus à des chocs) est aisé, et ne pose pas de difficulté technologique particulière. Une erreur du contrôle qualité est donc peu vraisemblable. Néanmoins, si une telle erreur devait survenir de manière aléatoire, elle ne remettrait pas en cause les fonctions de sûreté du complément de colisage, qui ne font pas appel à ses propriétés hydrauliques.

Pour les surconteneurs de déchets C et les conteneurs de combustibles usés, leur réalisation peut conduire à des défauts de composition chimique, métallurgique ou de soudage. L'acier sélectionné est peu contraignant dans sa composition, son analyse systématique par spectrométrie sur coulée et sur produit est aisée et ne pose pas de difficulté particulière. La cohérence métallurgique et la soudure par faisceau d'électrons (voir Figure 6.2-24) pourraient faire l'objet d'un contrôle automatisé par ultrasons. Ces technologies sont largement pratiquées depuis de nombreuses années, notamment dans le secteur nucléaire. Si la non détection d'un défaut surfacique peut être exclue, celle d'un défaut volumique, même si elle est peu vraisemblable, ne peut être totalement écartée. Compte tenu des marges prises sur le dimensionnement, un défaut volumique n'aurait aucune conséquence sur la résistance des conteneurs. Selon les conditions ambiantes lorsque la corrosion généralisée atteint ce défaut, une accélération très momentanée du phénomène peut se produire. Un défaut ayant une conséquence sur l'étanchéité du conteneur peut donc a priori être exclu à ce stade des études ; par prudence, on a cependant retenu en scénario d'évolution normale l'occurrence de tels défauts, sans en spécifier l'origine.



C.IM.0SES.04.0420.A

Figure 6.2-24 Représentation détaillée d'une soudure de surconteneur (ou de conteneur).

Ces défauts postulés, échappant à tous les systèmes de contrôle, ne toucheraient a priori que quelques unités de conteneurs, dispersées dans le stockage, compte tenu de l'inventaire attendu (de l'ordre de quelques milliers) et des probabilités de défaut usuellement considérées dans ce domaine (10^{-4} à 10^{-5}).

Il est à noter de plus que le conteneur défaillant retenu en scénario d'évolution normale est très enveloppe pour ce qui est de la nature de son défaut. En l'absence d'une cause clairement identifiée, il est en effet difficile de supposer une géométrie et une cinétique d'évolution du défaut. L'Andra a retenu une approche très pessimiste, revenant à considérer une disparition complète de la fonction de confinement du conteneur à peu près un siècle après sa mise en stockage⁸⁴. Cela induit des relâchements en phase thermique.

Un autre type d'erreur de contrôle qualité peut porter non plus sur le contrôle individuel des colis fabriqués, mais sur la maintenance et la calibration des appareils de contrôle eux-mêmes. Dans le cas d'une dérive constatée sur un appareil de mesure, les règles de l'art imposent de remonter à la date au plus tôt à laquelle la dérive a pu se produire, et de vérifier l'état de l'ensemble des objets fabriqués qui ont pu être insuffisamment contrôlés. Une telle situation pourrait se produire dans une installation de fabrication de conteneurs, soit du fait de la dérive d'un appareil de mesure, soit du fait d'une insuffisance de formation d'un opérateur chargé des contrôles visuels. Classiquement, la redondance des moyens de contrôle, pour les éléments les plus importants, permet de se prémunir contre une telle situation. En cas de dérive constatée, la réversibilité du stockage, en permettant une sortie plus aisée des colis, faciliterait la reprise et le contrôle de ceux-ci. Une série de conteneurs défaillants résultant d'une erreur de contrôle qualité est donc a priori exclue. Une telle situation a cependant servi de base conventionnelle à la définition du scénario d'évolution altéré « défaut de colis ».

Pour ce qui concerne les bouchons d'alvéoles, une mauvaise mise en place ou plus généralement un mauvais contact avec la paroi du Callovo-Oxfordien, conduirait à un défaut ponctuel de leurs fonctions de sûreté qui a été pris en compte dans le scénario d'évolution normale sous forme de quelques défaillances isolées dans les alvéoles de déchets vitrifiés (là où les bouchons sont les plus nombreux et où l'absence de barrière ouvrage ne permet pas de compenser une mauvaise mise en place). Ce défaut ponctuel apparaît sans influence sur l'hydraulique du stockage en scénario d'évolution normale.

Pour les autres éléments du stockage, leur nombre limité (scelllements de puits, scelllements de galerie, etc.) permet un contrôle qualité spécifique de leur mise en place, qui évite tout effet de « routine ».

6.2.12.3 Synthèse sur les incertitudes « technologiques »

Les technologies proposées dans le cadre du dossier 2005 s'appuient à la fois sur des pratiques couramment mises en œuvre dans des contextes industriels proches, et sur des essais de démonstration conduits au niveau international. Les programmes en cours devraient permettre d'apporter un certain nombre de précisions sur les conditions dans lesquelles les opérations pourraient être conduites.

De manière générale, la représentation du SEN prend en compte une réalisation correspondant à une dimensionnement « a minima » des composants : durée millénaire pour les surconteneurs de déchets vitrifiés, performance d'ensemble des scelllements faible, pas de performance de rétention du remblai.

Par ailleurs, des défauts ponctuels de réalisation ne peuvent être exclus, pas plus que dans n'importe quelle installation industrielle. Une démarche systématique a consisté à :

- prendre en compte au niveau du SEN des défauts ponctuels pour les ouvrages réalisés en plus grand nombre (bouchons d'alvéoles et conteneurs) ;
- prendre en compte des défauts plus systématiques, comme relevant des situations altérées.

⁸⁴ Plus exactement, pour des raisons de calcul, 200 ans après le début de la décroissance des radionucléides, donc après leur formation au sein des réacteurs.

6.2.13 Incertitudes sur la durée et les modalités de la phase d'exploitation et d'observation

La phase d'exploitation et d'observation est le siège de phénomènes physico-chimiques, certains similaires à ceux qui se déroulent ensuite lors de la phase de post-fermeture, d'autres provoqués par les conditions particulières d'un stockage ouvert et ventilé. Ces phénomènes peuvent être importants pour la sûreté à long terme du stockage dans la mesure où ils déterminent l'état de celui-ci au début de la phase de post-fermeture.

De fait, la possible variabilité des conditions d'exploitation peut entraîner une indétermination sur l'état initial d'évolution du stockage après fermeture. Le SEN a pris en compte un stockage exploité pendant une durée séculaire. Il importe donc de vérifier si, dans l'hypothèse où le stockage serait exploité et laissé ouvert plus longtemps, le scénario s'en trouverait modifié ou non. Cela permet notamment d'évaluer si la réversibilité a ou non une incidence sur la sûreté.

Les principaux phénomènes en jeu ont déjà été traités, sous un autre angle, dans les paragraphes précédents. Celui-ci constitue donc, pour l'essentiel, un rappel d'éléments déjà abordés.

Les principaux phénomènes qui peuvent être influencés par la durée d'exploitation sont :

- la désaturation de la roche et des matériaux du stockage, plus ou moins importante en fonction de la durée pendant laquelle les ouvrages sont ventilés. La vitesse de désaturation décroît cependant avec le temps ; en particulier, une fois qu'il a atteint la zone fracturée des alvéoles, ce phénomène ne progresse que lentement dans la zone microfissurée et l'argilite saine à l'échelle pluriséculaire. De plus, le degré de saturation des ouvrages n'apparaît pas comme un paramètre essentiel du SEN, celui-ci négligeant le transitoire hydraulique ;
- l'oxydation des argilites conduisant à de possibles transformations minéralogiques et notamment à la production de sulfates par oxydation de la pyrite. Les sulfates pourraient s'avérer agressifs, notamment au regard des bétons. Compte tenu des masses de béton en jeu, celles-ci sont à même de résister à une telle attaque. Par ailleurs, l'oxydation peut également provoquer des transformations de la matière organique contenue dans les argilites en très faible quantité. Cela peut provoquer la formation de colloïdes, mais à des teneurs qui ne sont pas significatives au regard du transfert des radionucléides ;
- la carbonatation des bétons, provoquée par leur exposition prolongée à l'air, induit une fragilisation de leur structure. Ce phénomène progresse par front au sein des bétons, et ses effets (diminution de la porosité par précipitation de calcite) tendent à ralentir au fur et à mesure sa cinétique de progression. Son extension n'est que décimétrique au plus à l'échelle d'un siècle d'exploitation, et n'apparaît pas dimensionnante au-delà. Elle serait à observer dans le cadre de l'entretien des revêtements. Notons qu'elle ne concerne pas les massifs d'appui, qui sont installés au moment de la fermeture ;
- les risques d'accélération de la corrosion des composants métalliques du stockage – essentiellement les conteneurs et surconteneurs de déchets - par le maintien dans le temps de conditions oxydantes. On a vu qu'ils peuvent être gérés par conception en fermant les alvéoles au moyen d'un capot amovible qui limite le renouvellement d'air. Des phases oxydantes longues peuvent par ailleurs être prises en compte si nécessaire dans le dimensionnement des épaisseurs d'acier ;
- l'augmentation des contraintes mécaniques sur les structures du stockage, avec le fluage progressif de la roche. Les conteneurs étant dimensionnés pour des durées millénaires, la question concerne surtout les revêtements en béton et le chemisage des alvéoles. Ils sont résistants sur des durées pluriséculaires, voire au-delà. La réduction de l'incertitude sur les vitesses de fluage de la roche permettrait, dans une éventuelle phase ultérieure du projet, de préciser les conditions d'évaluation de cette durée et d'optimiser le dimensionnement du revêtement. Une difficulté spécifique est posée par le retrait d'éléments mis en place à la construction et qu'il faut ôter lors de la fermeture, avec le risque que cela déconfiner la formation hôte. On a vu que le retrait du revêtement au droit des coupures hydrauliques ne posait pas de difficulté particulière (voir paragraphe 6.2.12.1). Le retrait du chemisage en tête des alvéoles de déchets vitrifiés et la mise en place du bouchon en argile gonflante définitif pourraient provoquer, s'ils ne sont pas conduits avec le soin nécessaire,

un déconfinement de la roche, préjudiciable s'il se produit tardivement (au-delà de quelques siècles, quand le fluage de la roche a déjà comblé les jeux avec le chemisage). Une telle situation n'apparaît pas probable ; elle provoquerait dans le pire des cas un défaut de contact qui pourrait être résorbé par le gonflement du bouchon. S'il subsistait ponctuellement un défaut de bouchon, celui-ci a été pris en compte en SEN. Un défaut plus généralisé relève du scénario d'évolution altérée « défaut de scellements ».

Plus généralement, le programme d'observation du stockage lors de son exploitation [101] permettra d'évaluer l'endommagement des structures, d'identifier si des phénomènes non anticipés se produisent, et d'intervenir au titre de la maintenance préventive ou corrective. Convenablement anticipée, une période d'exploitation longue n'apparaît pas comme un handicap pour la sûreté à long terme du stockage.

6.2.14 Événements externes

En premier lieu, on rappelle ici la liste des événements « externes » (au sens où ils trouvent leur origine dans un événement se produisant à l'extérieur du système de stockage) considérés en cours d'étude. Ces événements ont été recensés sur la base de la RFS III.2.f. et des bases de données internationales (essentiellement la base FEP-CAT de l'OCDE [83], mais également les bases FEP 2000 [84] ainsi qu'une base constituée pour les besoins de l'Andra à partir de références internationales). Ces bases couvrent un large ensemble d'événements de nature et d'origine (naturelle, humaine) très diverse.

Les seules exclusions ont porté sur les actions humaines volontairement malveillantes, et les cataclysmes naturels majeurs (tels qu'une chute de météorite par exemple).

Les actes de malveillance sont par nature imprévisibles. Cependant, il est possible de s'en prémunir lors de l'exploitation du stockage et dans les premiers temps suivant la fermeture, par des moyens classiques de gardiennage du site et de contrôle des accès. Ultérieurement, un stockage refermé présenterait, par son éloignement de la surface et par le conditionnement des matières radioactives qu'il contient, une cible difficile et de peu d'intérêt pour un acte de sabotage. De plus, s'il était jugé qu'un stockage profond puisse néanmoins intéresser d'éventuels malfaiteurs, il resterait possible de maintenir une surveillance autour du site, jusqu'à un éventuel oubli de l'emplacement de celui-ci. Dans ce dernier cas de figure, le stockage, oublié de tous, ne représenterait alors plus une cible potentielle.

La prise en compte des cataclysmes majeurs renvoie à des accidents naturels, de probabilité très réduite, ayant des conséquences à l'échelle d'une région ou plus. Ces événements ne sont pas considérés dans les analyses du fait que leurs conséquences dépasseraient très largement le cadre du seul stockage, et que la présence de celui-ci ne représenterait pas un facteur supplémentaire de risque qui soit réellement significatif. On notera que des événements naturels importants mais plus localisés ou plus fréquents (volcanisme, séisme) sont en revanche pris en compte, notamment au travers du choix du site (voir plus bas). Les autres cataclysmes majeurs sont considérés comme « hors dimensionnement », comme ils le sont d'ailleurs pour la totalité des installations industrielles.

Il reste donc à prendre en compte un ensemble d'événements, qui peuvent être classés en trois catégories :

- les processus naturels progressifs (évolution climatique, évolution géodynamique),
- les événements naturels à caractère ponctuel (séisme, volcanisme),
- les intrusions humaines involontaires.

6.2.14.1 Evolution climatique : glaciation

Les scénarios climatiques définis dans le projet BIOCLIM [102] prévoient une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires qui se succèdent selon des cycles d'environ 100 000 ans. La détermination de ces cycles s'appuie notamment sur les analyses des carottes de glaces de l'Antarctique donnant une image des évolutions climatiques sur les 400 000 dernières années (voir Figure 6.2-25).

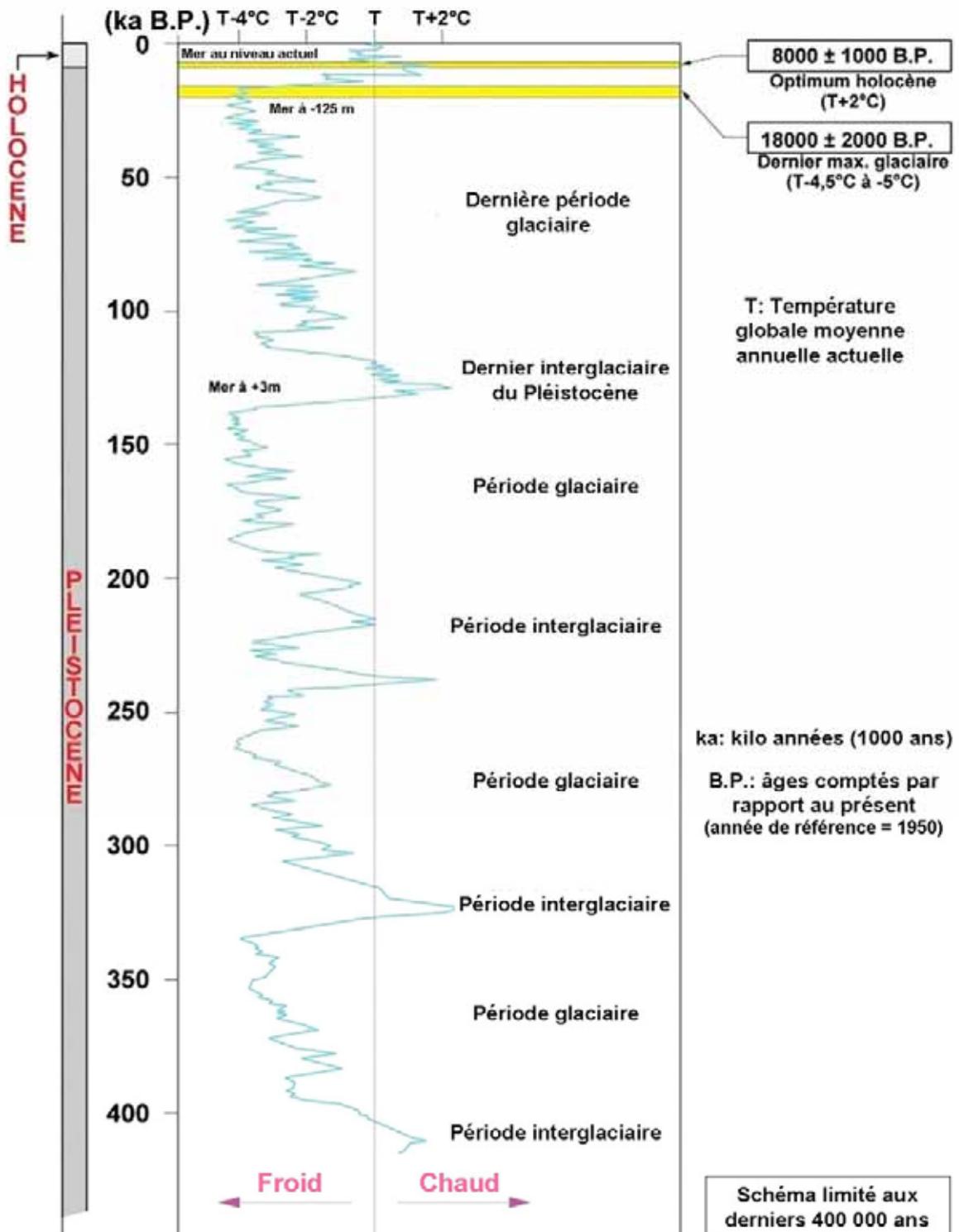


Figure 6.2-25

Variations de la température en antarctique (Vostock) durant les derniers 400 000 ans

L'éventail des situations climatiques possibles fourni par BIOCLIM pour le futur couvre les situations climatiques envisagées par la RFSIII.2.f.

Pour ce qui est de la biosphère, le scénario d'évolution normale ne retient pas une vision dynamique de l'évolution des climats, afin de ne pas cumuler une incertitude sur les dates d'apparition des radionucléides dans la biosphère avec l'échéancier de modification du climat. On a retenu une biosphère de type « tempérée » après s'être assuré qu'un groupe critique vivant en climat glaciaire serait moins exposé que le groupe critique retenu en référence. Le choix d'une biosphère tempérée est donc bien conservatif.

On ne retient pas non plus une évolution en continu des formations encaissantes sous l'effet de l'érosion, mais on a traité en scénario d'évolution normale deux configurations, l'une représentant le site dans l'état actuel et l'autre représentant le site dans un million d'années. Ces deux configurations décrivent deux situations contrastées et permettent de donner un ordre de grandeur des variations possibles de l'impact en fonction des modifications de l'environnement de surface. Le modèle géodynamique prend en compte l'érosion la plus forte concevable dans le cadre des scénarios de BIOCLIM, et couvre donc par ce biais l'incertitude sur l'évolution des formations encaissantes. On rappelle de plus que celles-ci jouent un rôle mineur du fait d'un choix d'exutoires proches du stockage (50 000 ans de temps de parcours contre 300 000 dans la formation hôte), ce qui réduit l'impact d'éventuelles incertitudes sur les évolutions à venir.

Une modification majeure due à une glaciation serait l'apparition d'un pergélisol, qui modifierait la mécanique du sous-sol et contraindrait les circulations d'eau souterraines, les résurgences en surface, et donc les transferts de radionucléides depuis le stockage jusqu'à l'Homme. L'apparition d'un pergélisol est possible (voir Figure 6.2-26) :

- en phase de refroidissement, lorsque le climat de la région Meuse / Haute-Marne devient périglaciaire (installation d'un pergélisol discontinu puis continu) ;
- en phase de réchauffement, lorsque la région Meuse / Haute-Marne connaît un climat boréal (possibilité de reliquat de pergélisol).

Des travaux de terrain et des observations dans les puits du laboratoires de Meuse / Haute-Marne montrent que la profondeur maximale possible du gel, identifiée par le biais de fractures superficielles, est, sur le site lui-même, de l'ordre de 100-120 mètres, tandis que la profondeur maximale que peut atteindre l'isotherme 0°C est de 325 mètres [72]. Les perturbations dans les écoulements sont cependant envisageables jusqu'à 300 m au maximum, selon les scénarios et les processus physiques (possible création d'hydrates de gaz sous la glace de ségrégation).

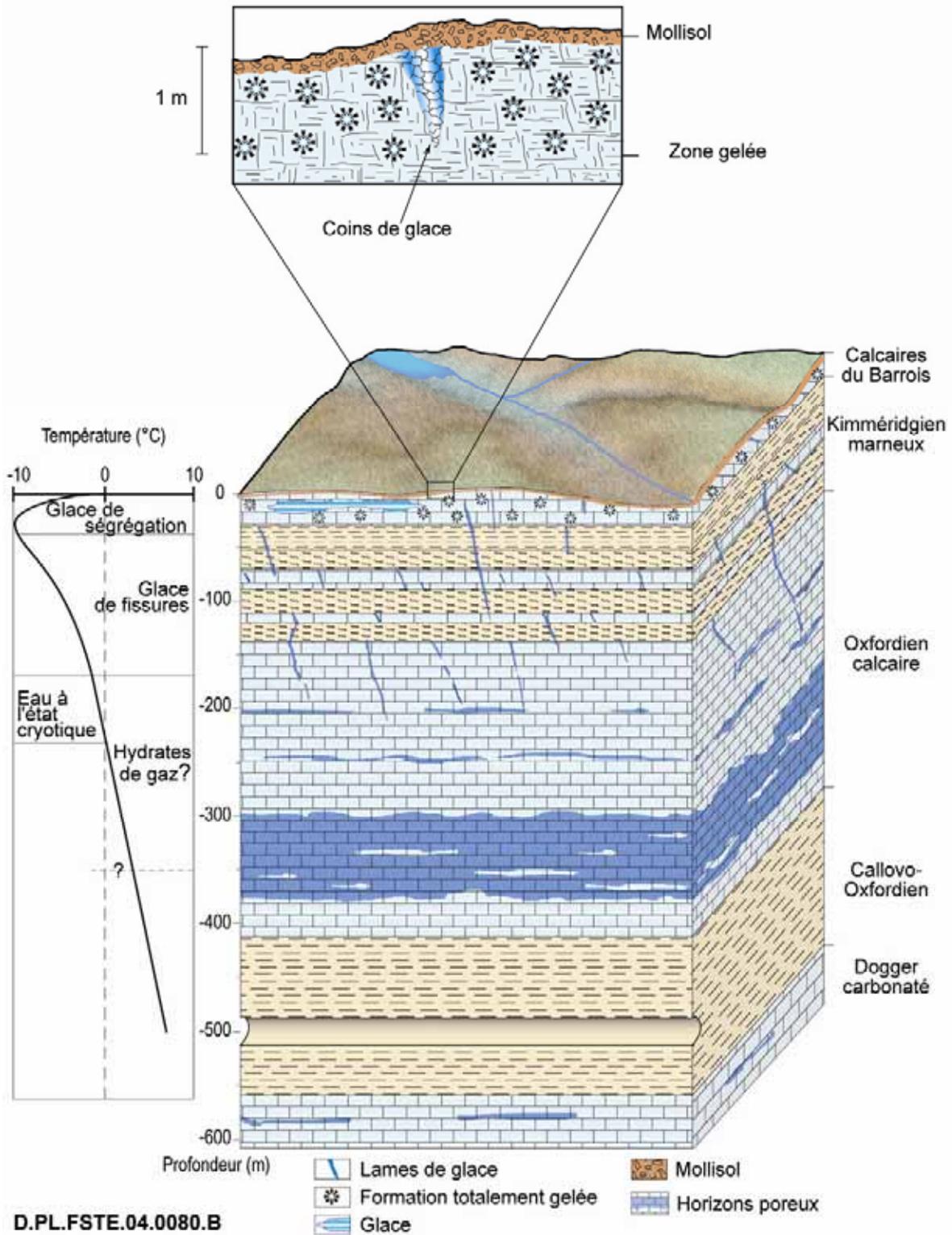


Figure 6.2-26

Extension des perturbations induites par le pergélisol

En aucun cas, les propriétés du Callovo-Oxfordien ne seraient perturbées. Si on considère une glaciation à l'extrême de ce qui est envisageable, seuls les scellements placés les plus près de la surface (scellements de séparation des aquifères) pourraient atteindre des températures proches de 0°C. Le scellement de puits ne serait pas atteint.

Il existe trois effets possibles d'une glaciation extrême sur les aquifères supérieurs :

- des effets mécaniques, sur la roche ou sur les scellements de séparation d'aquifères, comme une fissuration créée par le gel de l'eau. Ils devraient être réversibles dans un matériau argileux comme la bentonite, donc de peu d'incidence, mais pourraient en revanche endommager localement les terrains calcaires ;
- d'éventuels effets chimiques liés à une modification de l'état de l'eau (état cryotique) et de la salinité (sel expulsé par le gel). Ces effets peuvent atteindre les horizons poreux ;
- les circulations d'eau dans les encaissants supérieurs pourraient être bloquées partiellement par le pergélisol en surface, qui empêcherait leur recharge.

Lors de la période glaciaire, l'ensemble de ces phénomènes revient donc à un ralentissement des circulations d'eau dans les sols, effet favorable pour limiter la migration des radionucléides jusqu'à la biosphère. Cet effet – non pris en compte en SEN – se maintient tout le temps que perdure la glaciation en surface. En revanche, lors du dégel, le rétablissement des circulations d'eau pourrait entraîner, très transitoirement, des eaux plus contaminées vers la surface, le temps que l'équilibre se rétablisse. Cet effet ne serait cependant pas significatif. Des calculs spécifiques ont montré que, même dans des configurations pénalisantes, l'effet induit n'était pas significatif (augmentation de l'impact, dans le pire des cas, de l'ordre de 30 %) [64]

Le retour à des conditions tempérées, avec la disparition du pergélisol, pourrait laisser une empreinte dans les encaissants supérieurs, du fait des dommages causés par les glaces. L'érosion en surface est prise en compte dans le modèle géodynamique. D'éventuels dommages provoqués par le gel dans les encaissants, sur les 100 à 120 premiers mètres pourraient dans la situation la plus préjudiciable, ouvrir des fissures ou des petites fractures dans le sol. Le modèle hydrogéologique est peu sensible à ce type de structures, qui resteraient localisées dans les couches supérieures du terrain.

L'éventuelle modification de la chimie des encaissants est par ailleurs sans conséquence sur le modèle de transport des radionucléides, qui ne prend en compte aucune propriété de rétention pour ces formations.

6.2.14.2 Evolution climatique : périodes interglaciaires

Une période interglaciaire plus chaude ou plus durable qu'attendu en référence, prenant par exemple en compte les perturbations apportées par l'homme sur le climat, n'aurait pas d'effet notable sur les ouvrages ou la formation hôte. Les seuls effets porteraient sur la biosphère et les aquifères : appauvrissement rapide du sol et disparition des activités agricoles, surexploitation des cours d'eau et des aquifères qui pourraient tendre à s'assécher.

Un tel épisode repousserait d'autant la glaciation suivante. Dans la mesure où l'évolution climatique n'est pas modélisée de manière dynamique dans le SEN, cette incertitude sur la date d'occurrence de la glaciation n'a pas d'influence sur le calcul d'impact.

6.2.14.3 Evolutions géodynamiques (hors séisme).

Les scénarios d'évolution géomorphologique du site et de la région (bassin de Paris) qui sont pris en référence pour l'analyse des écoulements hydrogéologiques futurs, à l'échelle du prochain million d'années, intègrent la possibilité d'une surrection régionale.

Le taux de surrection pris en compte pour le prochain million d'années sur le secteur Meuse / Haute-Marne, c'est-à-dire la vitesse avec laquelle les formations géologiques se soulèvent sous l'effet des contraintes naturelles, est la valeur maximale estimée possible en l'état des connaissances. Il est de l'ordre de la centaine de mètres sur un million d'années. Cette surrection est progressive et continue.

6.2.14.4 Effets d'un séisme

Cette incertitude est fortement limitée en premier lieu par le choix de site, dans une zone de très faible sismicité.

Le séisme pris en compte pour la phase de post-fermeture est différent de celui considéré en phase d'exploitation (voir chapitre 4). En effet, sur une durée d'un million d'années, il convient d'intégrer l'occurrence de phénomènes sismiques y compris de très faible probabilité. L'Andra s'est par conséquent fondée sur la notion de « séisme maximal physiquement possible » (SMPP) telle qu'elle est définie dans la RFS III.2.f. La méthodologie employée [52] permet de prendre en compte à la fois les incertitudes de connaissance (sur l'activité sismique dans la région) et celles liées au caractère aléatoire du phénomène.

L'analyse phénoménologique des effets du SMPP sur le stockage, en phase de post fermeture, montre que le risque est limité aux interfaces entre matériaux, essentiellement celles présentant un vide, qui constituent des obstacles à la progression des ondes sismiques.

La question de l'impact du séisme se pose donc essentiellement avant la disparition des vides dans le stockage et la remise en contrainte mécanique des ouvrages équilibrée avec le massif rocheux. La probabilité d'occurrence d'un séisme de niveau du SMPP est réduite d'autant sur cette période plus courte qu'un million d'années.

Les effets seraient extrêmement atténués par rapport à ceux attendus en surface. Si on identifie les zones contenant potentiellement le plus de vide, on note que les effets pourraient concerner :

- les vides internes à certains colis primaires (bitumes, verres, combustibles usés). L'endommagement des colis primaires n'aurait pas d'impact significatif. Des endommagements locaux des colis ne modifieraient pas la nature des modèles de relâchement (le verre y est sensible, mais un taux de fracturation égal à celui de morceaux de verre en vrac est retenu en études de sensibilité du SEN) ;
- les vides dans les alvéoles B (entre colis de stockage, et entre les colis et le remplissage / revêtement). Dans le cas le moins favorable, des déplacements de colis pourraient entraîner un endommagement de ceux-ci. Ils n'ont pas de fonction de sûreté associée à leur tenue mécanique, cette situation ne constitue donc pas une défaillance ;
- les vides possibles entre les composants ouvragés, constitués par les jeux de mise en place, conduisant à des déformations locales. Le dimensionnement des conteneurs métalliques, chemisages, etc. est a priori suffisant pour supporter des contraintes sismiques qui resteront par ailleurs faibles ;
- au niveau des scellements et barrière ouvragées, on peut imaginer un déplacement des éléments en bentonite les uns par rapport aux autres et par rapport au milieu géologique avant resaturation. Ces vides seraient compensés au moment du gonflement de la bentonite sous l'effet des eaux de resaturation, et l'effet global ne serait pas sensible ;
- le séisme n'entraînerait pas de contraintes significatives sur la roche, ni en paroi ni dans le massif [52].

D'une manière générale, le milieu géologique à l'aplomb du site, et notamment le Callovo-Oxfordien, est dans un état stable depuis plusieurs dizaines de millions d'années. Les séismes, de faible ampleur, qu'il est susceptible de connaître dans le prochain million d'années ne seraient pas différents de ceux qu'il a pu connaître antérieurement, sur des périodes plus longues. Or, on n'observe pas dans la couche de traces laissées par des événements sismiques passés. L'absence de discontinuités physiques susceptibles d'être réactivées par un séisme constitue également un facteur favorable. Les seules actions possibles se localisent au niveau des failles régionales, compte tenu de leur activité tectonique hypothétique. Ces modifications, transitoires ou permanentes, devraient être sans impact au niveau des écoulements régionaux. Sur le secteur, étant donné les hypothèses retenues (envisageant un séisme sur les failles de la Marne), les trajectoires aux exutoires dans les encaissements supérieurs se situent en

amont des zones potentiellement perturbées. On ne retient donc pas de perturbations dues au séisme qui puissent influencer sur le cheminement des radionucléides.

Les effets d'un séisme seraient donc globalement négligeables et sont couverts par le scénario d'évolution normale et ses analyses de sensibilité.

6.2.14.5 Volcanisme

Ce risque est écarté par conception, du fait d'un choix de site exempt d'activités volcaniques.

6.2.14.6 Diagenèse

Le Callovo-Oxfordien a été, au cours de son histoire passée, affecté par des processus diagénétiques qui sont, pour la plupart d'entre eux, précoces. Ceux-ci ont conditionné les caractéristiques pétrophysiques du sédiment argileux et en particulier sa porosité et sa perméabilité. Dans son état actuel, il n'offre pas de possibilités de circulations susceptibles de réactiver des interactions fluides-roche capables de modifier ces caractéristiques pétrophysiques [17].

Une élévation de température entraînant une diagenèse thermique ne pourrait être liée qu'à un enfouissement du Callovo-Oxfordien sous plusieurs milliers de mètres de sédiments, phénomène exclu dans le contexte du site.

6.2.14.7 Risques d'origine humaine

Les risques d'origine humaine ne concernent que les intrusions involontaires. Celles-ci seraient dues à une perte de mémoire du stockage. Avant d'exposer les différents types d'intrusion envisagés, il convient donc de mentionner quelques notions importantes sur ce risque.

Les dispositions possibles de maintien de la mémoire du stockage, sans limite de durée a priori, ont été présentées au chapitre 3. Il demeure néanmoins très vraisemblable que, à l'échelle du million d'années, la mémoire du stockage, de son emplacement et de sa finalité, puisse se perdre.

Il est extrêmement difficile de prévoir l'évolution de l'organisation de la société et des technologies qui seront accessibles aux générations futures. Conformément aux recommandations de la RFS III.2.f., ce type d'incertitudes est traité en supposant que ces générations disposeront d'un niveau technique équivalent au nôtre. On y ajoute l'hypothèse, très pénalisante, qu'elles auront en revanche perdu la connaissance de ce qu'est un déchet radioactif, de ce qu'est un stockage en formation géologique et du fait qu'il est possible qu'un tel stockage se trouve dans le sous-sol, à un endroit éventuellement indéterminé.

Dans ces conditions, aucune technique de reconnaissance particulière ne serait mise en œuvre pour repérer spécifiquement la présence des déchets ou la disposition du stockage avant qu'une intrusion y ait lieu.

Cette intrusion peut être motivée par différentes causes, et prendre de ce fait différentes formes. La typologie ci-dessous s'inspire de celle proposée par la RFS III.2.f.

L'intrusion peut d'abord résulter de la reconnaissance qu'il existe un objet particulier dans le sol, et de la volonté de reconnaître de quel objet il s'agit. En effet, le stockage peut a priori représenter une « anomalie » géophysique repérable depuis la surface : anomalie magnétique du fait de la présence de matériaux métalliques au sein du stockage, anomalie gravitaire du fait d'une densité des matériaux différente de celle du milieu géologique. Les études réalisées par l'Andra montrent que seule la sismique 3D pourrait détecter l'anomalie provoquée par le stockage [82]. Du point de vue gravitaire, le stockage est peu visible, les densités des différents matériaux se compensant globalement.

Le stockage peut éventuellement avoir été repéré également depuis la surface : fouilles mettant à jour des traces des anciennes installations de surface ou des anciens ouvrages d'accès. Dans un tel cas, un « archéologue » pourrait tenter une reconnaissance de l'ouvrage. En bonne méthode, il commencerait cependant par rechercher l'origine de ses découvertes dans des fonds d'archives, et pourrait identifier qu'il s'agit d'un stockage de déchets radioactifs.

Si, après avoir acquis des informations et défini le site à prospector, l'archéologue cherche à pénétrer dans le stockage, il s'adressera vraisemblablement à des archéologues miniers, qui s'entoureront de toutes les précautions nécessaires pour accéder au site. Les archéologues miniers accèdent en règle générale à un site par une entrée déjà existante. Cela signifie par conséquent que dans le cas d'un stockage fermé, dont tous les puits d'accès et d'aération auront été complètement rebouchés, l'archéologue ne provoquera pas *a priori* un court circuit de la barrière géologique qui pourrait influencer l'évolution postérieure du stockage. Il est probable cependant que le chantier que représenteraient l'enlèvement du remblai et le retrait des scellements constituerait un travail trop important. Dans un tel cas, on pourrait avoir recours à des forages, bien que ce type de techniques ne soit pas utilisé normalement en archéologie.

Enfin, l'intrusion dans le stockage peut être totalement fortuite, dans l'ignorance complète qu'une telle installation existe sur le site. Le type de forage imaginable à la profondeur du stockage résulterait de reconnaissances géotechniques dans le but de prospector pour des ressources naturelles (pétrole, gaz, géothermie). Le choix d'un site ne comportant pas de telles ressources exceptionnelles, conformément à la RFS III.2.f, prémunit contre ce dernier cas. On peut cependant toujours imaginer une campagne de forages destinée simplement à reconnaître les formations.

L'ensemble de cette analyse conduit à considérer comme possible, bien que peu probable, un forage de petit diamètre traversant la roche, ou le stockage, en divers points.

Ce risque est donc pertinent pour la définition des situations altérées ; il fait l'objet d'un scénario d'évolution altérée « forage ».

Le stockage est en parti protégé du forage par son fractionnement, avec des parties rendues indépendantes les unes des autres du point de vue hydraulique, qui empêcheraient la propagation des effets du forage au-delà d'un ou plusieurs scellements. La fonction d'immobilisation des radionucléides joue également un rôle pour suppléer aux autres fonctions de sûreté du stockage, qui peuvent être affectées par le forage plus directement. Cette appréciation qualitative nécessite cependant d'être quantifiée ; elle le sera dans le cadre du scénario d'évolution altérée « forage » (chapitre 7).

On retient également que ce forage peut faire partie d'une campagne de plusieurs. Dans un tel cas, le nombre de forages importe peu : dès que ceux-ci sont suffisamment proches pour ne pas être isolés les uns des autres par un nombre suffisant de scellements, une circulation d'eau est susceptible d'être provoquée par leur présence. C'est ce phénomène qu'il est intéressant de considérer, en envisageant la possibilité d'un doublet de forages.

6.3 Construction des situations altérées

Sur la base des incertitudes présentées au paragraphe 6.2, des situations altérées ont pu être construites. On rappelle que celles-ci correspondent à la perte d'une ou plusieurs fonctions de sûreté, sur un ou plusieurs composants. Il est également important de rappeler que ces situations sont par définition des cas « limites » de fonctionnement du stockage, jugés peu vraisemblables, définis dans le but de couvrir plus largement les incertitudes. Certaines situations présentées peuvent même n'avoir aucune vraisemblance, et n'être envisagées qu'à titre hypothétique pour vérifier quels seraient les effets de la perte d'un ensemble plus large de fonctions que ce qui est réellement envisageable. On parle dans ce cas de situation « what if », ou situation « conventionnelle ».

Les incertitudes et les risques qui peuvent engendrer des situations altérées sont de natures a priori diverses (événement extérieur au stockage, erreur de conception ou malfaçon, processus se déroulant d'une manière non anticipée...). Cependant, dans leurs modes, c'est-à-dire dans leurs effets, décrits indépendamment des causes qui peuvent les provoquer, on a vu que ces situations peuvent se rattacher à un nombre limité de types, eux-mêmes reliés à un nombre restreint de scénarios d'évolution altérée. En effet, dans la mesure où un nombre réduit de composants du stockage assure les fonctions de sûreté importantes, les situations altérées correspondent à des cas de dysfonctionnement d'un ou plusieurs de ces composants. A condition de choisir des représentations suffisamment enveloppes de ces dysfonctionnements, on peut se ramener à traiter un nombre limité de cas. Par exemple, pour couvrir des défauts de conteneurs d'origines diverses (corrosion accélérée, défaut de fabrication...) par une seule situation enveloppe, on peut choisir de représenter un défaut totalement conventionnel, consistant à « supprimer » artificiellement et totalement la capacité de confinement de ce composant. Une telle situation n'a en elle-même aucune réalité, mais elle « couvre », au sens des fonctions de sûreté, les dysfonctionnements possibles du conteneur. Bien entendu, si une telle manière de procéder s'avérait trop grossière pour qu'il soit possible d'en tirer des enseignements en vue de l'analyse de sûreté, la définition de la situation enveloppe pourrait être revue.

Les situations altérées, et leur rattachement aux différents SEA, ont été présentés précédemment, au fil de l'analyse. On les synthétise ici dans un tableau. Par ailleurs, on n'a pas abordé de manière systématique dans le paragraphe 6.2, pour faciliter la lecture, les combinaisons possibles d'incertitudes qui peuvent venir aggraver une situation altérée donnée. Le tableau donne un aperçu des combinaisons qui ont été considérées.

Il est construit de la manière suivante :

- une première colonne présente le libellé de l'incertitude ;
- une deuxième colonne précise quels composants sont susceptibles d'être affectés. Le cas échéant, une même incertitude peut affecter différemment des composants, selon leur configuration particulière et la fonction qui est attendue d'eux ;
- une troisième colonne rappelle dans quel paragraphe du chapitre 6.2 l'incertitude a été décrite, pour que le lecteur puisse s'y référer ;
- une quatrième colonne présente les incertitudes qui sont de nature à amplifier les effets de celle considérée ;
- le scénario d'évolution altéré correspondant est rappelé en dernier, en précisant le cas de calcul concerné.

Un commentaire apporte des compléments d'information si nécessaire.

Si le lecteur souhaite approfondir les raisons qui ont pu pousser à ne pas faire figurer telle ou telle combinaison d'incertitudes, il est invité à se reporter à l'AQS elle-même où une version plus développée du même tableau, incluant y compris les incertitudes couvertes en scénario d'évolution normale, est présentée.

Libellé de l'incertitude	Composants concernés	Référence au paragraphe concerné	Associations à d'autres incertitudes prises en compte dans l'analyse⁸⁵	Type de scénario	Commentaires
Incertitudes sur la présence de structures mineures dans le Callovo-Oxfordien	Callovo-Oxfordien	6.2.1.1	aucune	SEN SEA forage	Cette incertitude est avant tout couverte par une étude de sensibilité sur la perméabilité de la roche. Le forage est par ailleurs un événement qui a des manifestations similaires (court-circuit de la barrière géologique) mais plus pénalisantes.
Incertitude sur l'insuffisance de gonflement de la bentonite sur l'argilite (associée à une incertitude sur le comportement différé de l'EDZ)	Tous les scellements et bouchons	6.2.6.1	incertitude sur l'effet des eaux calciques sur la bentonite, sur l'extension de la perturbation alcaline (cas des scellements de galeries et des bouchons) et de la géochimie des eaux de resaturation des ouvrages (cas du scellement de puits)	SEA défaut de scellements, tous scellements	Associée aux incertitudes sur l'effet des perturbations chimiques sur la bentonite, cette incertitude conduit à envisager que les scellements soient non efficaces, par défaut de gonflement.
Incertitude sur l'amplitude de l'effet de recompression de la bentonite sur l'argilite	Noyau argileux de scellement et ancrages de scellement, barrières ouvrages de déchets C et CU	6.2.6.1	aucune	SEA défaut de scellements, tous scellements, avec sensibilité sur la dégradation de l'EDZ	Cette situation envisage à l'inverse un gonflement excessif, très peu probable, des scellements qui viennent endommager la roche.

⁸⁵ Ayant des effets similaires ou pouvant aggraver les effets considérés

Libellé de l'incertitude	Composants concernés	Référence au paragraphe concerné	Associations à d'autres incertitudes prises en compte dans l'analyse ⁸⁵	Type de scénario	Commentaires
Incertitude sur la composition des eaux de resaturation des ouvrages	Scellement de puits	6.2.8.1	incertitude sur l'effet des eaux calciques sur la capacité de gonflement.	SEA défaut de scellements, de puits non efficace	En cas de resaturation par des eaux de composition chimique défavorable issues des encaissants, on imagine que le scellement de puits pourrait ne pas gonfler correctement. Cela suppose que la capacité tampon du scellement ait été mal évaluée, car un effet d'une telle ampleur apparaîtrait très difficilement concevable.
Incertitude sur la capacité de gonflement de la bentonite sous l'effet des eaux calciques	Tous scellements	6.2.8.1	incertitude sur l'extension de la perturbation alcaline. Incertitude sur l'évolution à long terme de l'EDZ.	SEA défaut de tous scellements défaillants, sensibilité sur le relâchement des déchets vitrifiés et la dégradation de l'EDZ.	Si la bentonite ne gonfle pas suffisamment en se resaturant, les coupures hydrauliques de scellements peuvent être partiellement inefficaces. Celles-ci pourraient être des voies de passage privilégiées pour des perturbations, qui pourraient modifier les conditions chimiques en tête d'alvéole C. On néglige un tel effet dans les alvéoles de combustibles usés, du fait du terme sources déjà très conservatif retenu en référence. Dans une situation extrême, la bentonite n'accompagne pas le fluage différé de la zone fracturée, et celle-ci se sur-endommage.
Incertitude sur l'effet mécanique des gaz dans les argilites	Tous scellements et bouchons, barrière ouvragée	6.2.6.2	incertitude sur le comportement différé de l'argilite, incertitude sur la composition géochimique des eaux (qui peut influencer sur la capacité de gonflement de la bentonite).	SEN SEA défaut de tous scellements avec sensibilité sur la dégradation de l'EDZ	Cette situation envisage la possibilité de création d'un sur-endommagement dans les argilites sous l'effet des gaz, qui engendrerait une zone fracturée continue et permanente autour des scellements. On note que la création d'une microfissuration permanente, même si elle n'est pas plus vraisemblable, est de fait couverte par le SEN qui n'envisage pas une cicatrisation de la zone microfissurée due au creusement.

Libellé de l'incertitude	Composants concernés	Référence au paragraphe concerné	Associations à d'autres incertitudes prises en compte dans l'analyse ⁸⁵	Type de scénario	Commentaires
Incertitude sur l'effet mécanique des gaz dans les argilites et dans la bentonite	Tous scellements et bouchons, barrière ouvragée	6.2.6.2	incertitude sur la capacité de gonflement de la bentonite, incertitude sur l'extension de la perturbation alcaline	SEA défaut de scellements, tous scellements, avec sensibilité sur la dégradation de la perméabilité en grand des scellements.	Situation assez proche de la précédente, on imagine cette fois-ci que l'effet mécanique des gaz peut induire des dommages irréversibles dans la bentonite (corps de scellements, barrière ouvragée). Cette situation est très conventionnelle, compte tenu que les pressions de gonflement de la bentonite sont amplement suffisantes pour refermer d'éventuelles fissures si elles sont traversées par les gaz. On l'associe donc aux incertitudes sur la capacité de gonflement de la bentonite ou sa perturbation par un panache alcalin.
Incertitudes sur l'effet des gaz sur le transport pendant le transitoire hydraulique	Alvéoles de déchets B, de déchets C et de combustibles usés	6.2.5.2	toute incertitude conduisant à des relâchements très précoces dans les galeries ou à des relâchements de radionucléides sous forme gazeuse	SEN SEA défaut de colis, avec sensibilité sur le rôle du transitoire hydraulique.	Cette incertitude porte sur le rôle des gaz sur le transport des radionucléides, pendant la phase précoce de montée en pression. Elle est couverte en SEN par une étude de sensibilité sur le transport pendant le transitoire hydraulique pour les alvéoles de déchets B1x et CU1. La sensibilité est prise en compte également en SEA défaut de colis.
Incertitude sur les modèles de dégradation à long terme des bétons	Massifs d'appui de scellements de puits, galeries et des bouchons d'alvéoles	6.2.8.2	incertitude sur la géochimie des eaux	SEA défaut de scellements, Tous scellements	On envisage ici de manière conventionnelle que le massif d'appui des scellements se dégrade de manière précoce et empêche le gonflement des scellements dans de bonnes conditions.

Libellé de l'incertitude	Composants concernés	Référence au paragraphe concerné	Associations à d'autres incertitudes prises en compte dans l'analyse ⁸⁵	Type de scénario	Commentaires
Incertitude sur l'effet pluriséculaire de l'attaque sulfatique sur les bétons	Tous massifs d'appui de scellements	6.2.8.2	incertitude sur la géochimie des eaux	SEA défaut de scellements, Tous scellement	L'incertitude est similaire, dans ces effets, à la précédente.
Incertitude sur l'extension de la perturbation alcaline dans la bentonite	Tous scellements, bouchons d'alvéoles C et CU	6.2.8.4	incertitude sur la capacité de gonflement sous l'effet d'eaux calciques, mise en place avec jeux résiduels	SEA défaut de scellements, et sensibilité sur le relâchement des déchets vitrifiés	En cas d'extension excessive de la perturbation alcaline sur la totalité des bouchons d'alvéoles et sur les scellements de galerie et de puits (très inraisemblable compte tenu des évaluations conduites, même en prenant en compte un effet inattendu des eaux calciques ou des scellements mal mis en place), on peut envisager une baisse de leur efficacité et une augmentation du pH en tête d'alvéoles C et CU. Ce dernier effet est supposé négligeable dans les alvéoles de combustibles usés compte tenu du modèle de relâchement déjà très rapide retenu (50 000 ans). On le prend en compte dans les alvéoles de déchets C en accélérant le relâchement.

Libellé de l'incertitude	Composants concernés	Référence au paragraphe concerné	Associations à d'autres incertitudes prises en compte dans l'analyse ⁸⁵	Type de scénario	Commentaires
Incertitude sur le pH des eaux cimentaires	Tous scellements	6.2.8.4	incertitudes sur les paramètres d'évaluation de la perturbation alcaline	SEA défaut de scellements, sensibilité sur le relâchement des déchets vitrifiés	Un pH excessif et plus pérenne qu'attendu en référence pourrait conduire à une extension plus forte de la reminéralisation associée à la perturbation alcaline, et à des effets similaires à ceux évoqués à la ligne précédente du tableau
Incertitude sur l'effet cumulé des perturbations chimiques	Bouchons d'alvéoles C et CU	6.2.8.7		SEA défaut de scellements, sensibilité sur le relâchement des déchets vitrifiés	On envisage ici un cumul des perturbations alcalines et fer-argile, conduisant à une extension inattendue de celles-ci. Les effets sont similaires à ceux décrits plus haut. L'effet est a priori limité aux bouchons d'alvéoles thermiques, mais le SEA le couvre de manière plus enveloppe en abordant le cas d'une défaillance généralisée des scellements.

Libellé de l'incertitude	Composants concernés	Référence au paragraphe concerné	Associations à d'autres incertitudes prises en compte dans l'analyse ⁸⁵	Type de scénario	Commentaires
Occurrence d'un accident de criticité dans des alvéoles CU	Alvéoles CU	6.2.9.1	Incertitude sur le comportement mécanique des produits de corrosion	SEN SEA défaut de colis	Un accident de criticité suite à un rapprochement des assemblages dans les conteneurs CU a des conséquences similaires à celles d'un défaut de colis.
Insuffisance des spécifications du remblai en argilites au regard des performances mécaniques attendues à long terme	Remblais d'appui	6.2.12.1	incertitude sur les effets de l'attaque sulfatique sur les bétons, sur le modèle de comportement à long terme du béton	SEA défaut de scellements, de scellements de galerie ⁸⁶ avec sensibilité sur la dégradation de l'EDZ	Le remblai d'appui n'est là que pour assurer le confinement à long terme du scellement, le gonflement de celui-ci étant contraint par le massif d'appui en béton. Il faut donc imaginer une mauvaise spécification du remblai couplée à un comportement inattendu du béton pour aboutir à une situation où les scellements de galerie ne pourraient être soutenus correctement, ainsi qu'éventuellement la roche.
Insuffisance des spécifications du remblai en béton au regard des performances mécaniques attendues à long terme	Remblais d'ouvrages d'accès (puits)	6.2.12.1	incertitude similaire à celle portant sur l'état initial du béton (fissuration) et le modèle d'évolution à long terme du béton (voir plus bas)	SEA défaut de scellements, scellement de puits	Si le scellement de puits n'est pas correctement soutenu par le remblai en béton (situation très invraisemblable, compte tenu des faibles exigences mécaniques), le scellement de puits pourrait ne pas gonfler correctement.

⁸⁶ Le SEA envisage en fait une défaillance de tous les scellements ancrés, incluant donc ceux des alvéoles B

Libellé de l'incertitude	Composants concernés	Référence au paragraphe concerné	Associations à d'autres incertitudes prises en compte dans l'analyse ⁸⁵	Type de scénario	Commentaires
Incertitude sur les effets thermo-mécaniques dans les alvéoles de déchets C	Au droit des bouchons d'alvéoles C	6.2.11.3	incertitude sur la capacité de gonflement de la bentonite (eaux calcaïques), sur l'extension de la perturbation alcaline.	SEA défaut de scellements, tous scellements défectueux avec sensibilité sur le relâchement des déchets vitrifiés	Une évolution défavorable de la zone endommagée en ambiance thermique, jointe à un mauvais soutien de la part du bouchon (soit qu'il ne gonfle pas suffisamment, soit qu'il soit mal soutenu par son massif d'appui) peut conduire à un court-circuit par une zone fracturée. Cette situation suppose simultanément un mauvais comportement de la roche et du bouchon. Le cas n'est pas directement traité en SEA, mais couvert par une situation plus pénalisante de contournement de l'ensemble des scellements par une zone fracturée. On imagine, en associant ce cas de figure à une mauvaise évaluation de l'extension de la perturbation alcaline, que le défaut de bouchon entraîne une augmentation de pH dans les alvéoles de déchets C et une accélération du relâchement.
Incertitude sur la capacité à mettre en place des anneaux de bentonite sans jeux résiduels	Barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés.	6.2.12.1		SEA défaut de scellements défectueux avec étude de sensibilité sur la perméabilité de l'argile gonflante	Une éventuelle mauvaise mise en place se traduirait par un défaut de perméabilité locale de la barrière ouvragée, à condition qu'en plus la bentonite ne gonfle pas comme attendu. On n'attend pas d'effet sur la barrière ouvragée en situation normale, dans la mesure où elle n'a qu'un rôle de protection de l'alvéole, et non vis-à-vis du transfert. Le SEA défaut de scellements envisage une défaillance de barrière ouvragée associée à celle des scellements
Incertitude sur la capacité à mettre en place des briques de bentonite sans jeux résiduels	Scellements	6.2.12.1	incertitude sur l'extension de la perturbation alcaline	SEA défaut de scellements défectueux avec sensibilité sur le relâchement pour les déchets vitrifiés.	Equivalent au cas précédent pour les CU : une mauvaise compaction des briques de bentonite dégraderait la performance des scellements. Pour les déchets C, on couple avec une possible extension excessive du panache alcalin à travers le bouchon, et une augmentation du relâchement de ce fait.

Libellé de l'incertitude	Composants concernés	Référence au paragraphe concerné	Associations à d'autres incertitudes prises en compte dans l'analyse ⁸⁵	Type de scénario	Commentaires
Incertitude technologique sur la mise en place des ancrages de scellements	Scellements (galeries, d'alvéole)	6.2.12.1	incertitude sur le modèle de comportement différé de l'argilite, incertitude sur l'effet de re-compression de la bentonite, incertitude sur la durée de la phase d'exploitation	SEA défaut de tous scellements de galerie et d'alvéole B	L'incertitude concerne l'ensemble des scellements munis d'une coupure hydraulique (galeries, bouchons d'alvéoles B), elle consiste à supposer qu'un déconfinement excessif de la roche, par exemple après une longue période d'exploitation, n'est pas repris par le gonflement de l'ancrage. Celui-ci est inefficace car contourné par une EDZ fracturée.
Incertitude technologique sur la dépose du chemisage et la mise en place du bouchon	Bouchons d'alvéoles C	6.2.13	incertitude sur le modèle de comportement différé de l'argilite, incertitude sur la durée de la phase d'exploitation, incertitude sur l'extension du panache alcalin	SEN SEA Défaut de tous scellements de galerie avec étude de sensibilité sur le relâchement des déchets vitrifiés	L'incertitude concerne les bouchons d'alvéoles C et le risque de sur-endommagement au moment de la pose de celui-ci. Des défauts ponctuels sont envisagés en SEN. Il n'y a pas de cas de calcul spécifique de bouchon défaillant en SEA, mais un calcul où tous les scellements sont défaillants, ce qui couvre la situation. En couplant avec une extension excessive de la perturbation alcaline au travers du bouchon défaillant, on envisage des situations où le relâchement par le verre est accéléré.
Erreur systématique lors du contrôle qualité des soudures des conteneurs, non détectée lors du contrôle	Surconteneur C et conteneur CU	6.2.12.2	aucune	SEA défaut de colis	
Forage	A priori, tous les composants	6.2.14.7	aucun	SEA forage	

La typologie des situations altérées issues de l'analyse montre en définitive qu'elle peuvent se rattacher à un nombre limité de scénarios, à condition de définir à l'intérieur de ceux-ci différents cas de calculs destinés à couvrir des configurations différentes.

Les incertitudes sur la caractérisation du milieu géologique ne conduisent pas à considérer des situations altérées, la plupart étant couvertes dès le SEN et les choix d'analyses de sensibilité. Seule la présence d'une hétérogénéité non détectée d'une perméabilité très dégradée et conductrice pourrait relever d'un tel schéma. La présence d'un tel objet ne renvoie à aucune observation effectuée sur le site. Elle pourrait difficilement rester non détectée sur la durée de la construction et de l'exploitation du stockage.

Les scellements et l'EDZ associée sont les composants qui se rattachent au plus grand nombre de situations de défaillance. Cela ne traduit pas nécessairement une faiblesse intrinsèque de ce type de composants, mais renvoie avant tout au fait qu'il s'agit d'objets spécifiques du stockage, au contraire par exemple des conteneurs pour lesquels un retour d'expérience industriel important est disponible. Il est donc naturel que l'analyse de sûreté se focalise sur des composants qui présentent des spécificités et un retour d'expérience relativement moindre.

Les SEA ainsi justifiés, et leurs cas de calculs précisés en fonction de l'analyse qualitative, il est possible de les quantifier. Il sera loisible, au chapitre 7, d'ajouter d'autres cas de calculs non directement issus de l'analyse des risques mais destinés à apporter des éléments de compréhension complémentaires sur le fonctionnement du système de stockage ou sur sa robustesse face à des variations de paramètres. En particulier, on définira un quatrième SEA, dit « de fonctionnement très dégradé », qui ne ressort pas de l'AQS, mais qui englobe plusieurs modes de défaillance simultanément. Un tel scénario se rattache à la famille des scénarios « conventionnels ».

6.4 Conclusions sur la maîtrise des incertitudes

La prise en compte des incertitudes relevées tout au long des études scientifiques a permis de vérifier que le scénario d'évolution normale englobe de manière large un grand nombre de celles-ci, soit en référence soit à travers les études de sensibilité. Des cas limites renvoyant à des incertitudes particulières, ou des combinaisons d'incertitudes, peuvent cependant faire apparaître des situations qui sont hors du champ du scénario d'évolution normale car correspondant à des défaillances peu probables des fonctions de sûreté. A ce stade, il n'est pas possible de dire si elles se traduisent pour autant par un effet significatif sur le transfert des radionucléides, ni par une augmentation de l'impact, et si cette augmentation peut devenir inacceptable. C'est l'objet du chapitre 7 que de procéder à ces calculs.

L'analyse des combinaisons de défaillances qui apparaissent le plus souvent met en évidence quelques observations importantes pour l'analyse de sûreté. Il n'est pas possible de conclure au stade du présent chapitre sur l'importance des incertitudes au regard de la sûreté. Il n'est envisageable de réellement les hiérarchiser qu'après avoir procédé à une quantification de leur influence sur l'évolution du stockage, ce qui est l'objet du chapitre suivant. On peut cependant relever à ce stade quelques grands thèmes qui ressortent du recensement. Ces conclusions intermédiaires complètent celles proposées à la fin du chapitre 5, on n'a donc pas repris les éléments qui ont déjà pu être évoqués à l'issue de l'évaluation de performances.

● Les incertitudes sur le milieu géologique apparaissent bien maîtrisées

Les résultats des investigations conduites sur site, d'abord depuis la surface, puis en forages et enfin lors de la construction du laboratoire souterrain, ont permis de constituer un modèle conceptuel de la formation hôte dont les incertitudes sont maîtrisées. Les caractéristiques favorables du milieu (faible perméabilité et porosité, environnement diffusif, bonne capacité de tampon chimique) limitent également l'influence d'autres incertitudes, portant sur les processus chimiques ou hydrauliques qui pourraient se dérouler au sein du stockage.

La variabilité de la formation hôte à l'échelle de la zone de transposition apparaît faible, les principaux paramètres n'étant susceptibles de connaître que des variations d'un ordre de grandeur au plus. Des variations significatives de la couche à cette échelle sont peu vraisemblables, tant du fait des conditions de dépôts des sédiments que du fait de l'évolution ultérieure de la formation. Des investigations complémentaires, à l'échelle de la zone, permettraient d'affiner ce constat.

Les formations encaissantes n'ont pas de fonction de sûreté et sont représentées en SEN sous des hypothèses conservatives. De ce fait, les incertitudes qui les affectent n'ont pas directement d'influence sur la sûreté, au sens où elles ne modifient pas les conclusions des calculs présentés au chapitre 5. Il n'en demeure pas moins qu'une connaissance plus précise de certaines de leurs caractéristiques permettrait de préciser leur représentation conceptuelle, dans le sens d'une réduction des marges prises en compte dans le calcul. On peut citer la direction des écoulements dans le Dogger, la caractérisation des propriétés de rétention de l'Oxfordien basal et du Kimméridgien, ainsi que la poursuite des travaux sur le rôle hydraulique des failles régionales et de leur environnement (notamment la « zone de fracturation diffuse »).

● La connaissance des transitoires constitue un axe de progrès

La représentation des transitoires hydraulique, thermique, mécanique est suffisante pour procéder à l'évaluation de sûreté et garantir le caractère conservatif des évaluations de performances conduites. Une meilleure connaissance et une modélisation plus fine des transitoires constituent cependant un axe de progrès important pour l'avenir, afin de préciser les conditions d'évaluation de la sûreté du stockage et d'identifier les marges de conservatisme. La problématique des transitoires est indissociable de celle de la modélisation des couplages, qu'elle recoupe largement.

Le transitoire hydraulique met en évidence le rôle prépondérant dans les premiers millénaires de la production et de l'évacuation des gaz, et des couplages mécaniques associés. L'évaluation de sûreté retient à ce stade des études une production de gaz importante liée à une cinétique rapide de corrosion. La réduction des vitesses de corrosion prises en compte, en fonction de l'avancée des connaissances, permettrait de réduire les évaluations de pression au sein du stockage, et de simplifier l'analyse. Les modalités d'évacuation de ce même gaz doivent faire l'objet d'études complémentaires pour préciser le schéma global d'évolution.

Le transitoire thermique est maîtrisé par conception, par l'étanchéité des conteneurs dans les alvéoles pendant la phase thermique. On note cependant que l'évaluation de sûreté a besoin de prendre en compte, dans une approche dictée par la défense en profondeur, la possibilité que des conteneurs soient défaillants. Cela ouvre la question des transferts en ambiance thermique, sujet sur lequel des données ont été recueillies expérimentalement et utilisées pour les évaluations.

- **La zone endommagée des argilites joue un rôle au regard de l'analyse des incertitudes, mais son importance pour la sûreté nécessite d'être quantifiée**

Les défauts de scellements et les possibilités de transfert (d'eau et de gaz) par la zone endommagée sont des situations qui ressortent à plusieurs reprises de l'analyse qualitative. De manière plus générale, les incertitudes sur les caractéristiques de l'EDZ et son évolution dans le temps apparaissent dans la définition de plusieurs situations altérées différentes. L'étude de l'endommagement de la roche, déjà entreprise par l'Andra dans le laboratoire souterrain, doit par conséquent se poursuivre, afin de mieux connaître à la fois les caractéristiques de l'endommagement, et les paramètres qui régissent son évolution à plus long terme.

Dans ce cas également, il importe de souligner que l'analyse n'est à ce stade que qualitative. La quantification des situations où l'EDZ peut jouer un rôle (le SEA « défaut de scellements » notamment) permettra de porter une appréciation plus complète sur cet élément, à l'issue du chapitre 7.

- **L'analyse qualitative permet de vérifier que les conditions d'exploitation du stockage n'influent pas de manière très sensible sur la sûreté à long terme**

Les conditions de construction et d'exploitation du stockage ont une influence sur l'évolution future du stockage. Le chapitre 3 a notamment permis de mettre en évidence comment le soin apporté au creusement des ouvrages permet de contribuer à la maîtrise des circulations d'eau à long terme. Pour autant, l'analyse détaillée des phénomènes susceptibles de se dérouler lors de l'exploitation et d'influer sur l'état initial du stockage en phase de post-fermeture ne fait pas apparaître d'éléments qui pourraient contraindre fortement le futur exploitant du stockage. Un fonctionnement de l'installation sur une durée séculaire a été pris en référence, mais un prolongement vers une échéance pluriséculaire ne soulève pas de difficulté majeure. Ce point est à l'évidence favorable à la réversibilité.

- **Parmi les événements « externes », seul le forage apparaît réellement pénalisant**

L'occurrence d'un forage intrusif atteignant une alvéole de déchets est une situation qui met en cause la raison d'être même du stockage, qui est d'isoler les déchets des actions humaines. Toute solution de gestion des déchets consistant à les rassembler en un endroit les expose de fait à un risque d'intrusion ; celui-ci est la conséquence de la stratégie de concentration-confinement. On notera d'ailleurs que l'intrusion humaine fait l'objet d'études dans tous les pays qui se consacrent à la sûreté des stockages profonds. Il apparaît préférable de prendre ce risque que de disperser les déchets dans l'environnement, ce qui induirait des risques infiniment plus probables, et pas nécessairement moins graves.

Il n'est, par nature, pas possible de prévenir totalement ce risque, ni d'en annuler les effets. En revanche, des dispositions efficaces peuvent être prises pour en réduire l'occurrence ou la gravité : le choix d'un site sans ressources naturelles exceptionnelles, le fractionnement du stockage en zones indépendantes, constituent de telles dispositions. On a vu (chapitre 3) que la préservation de

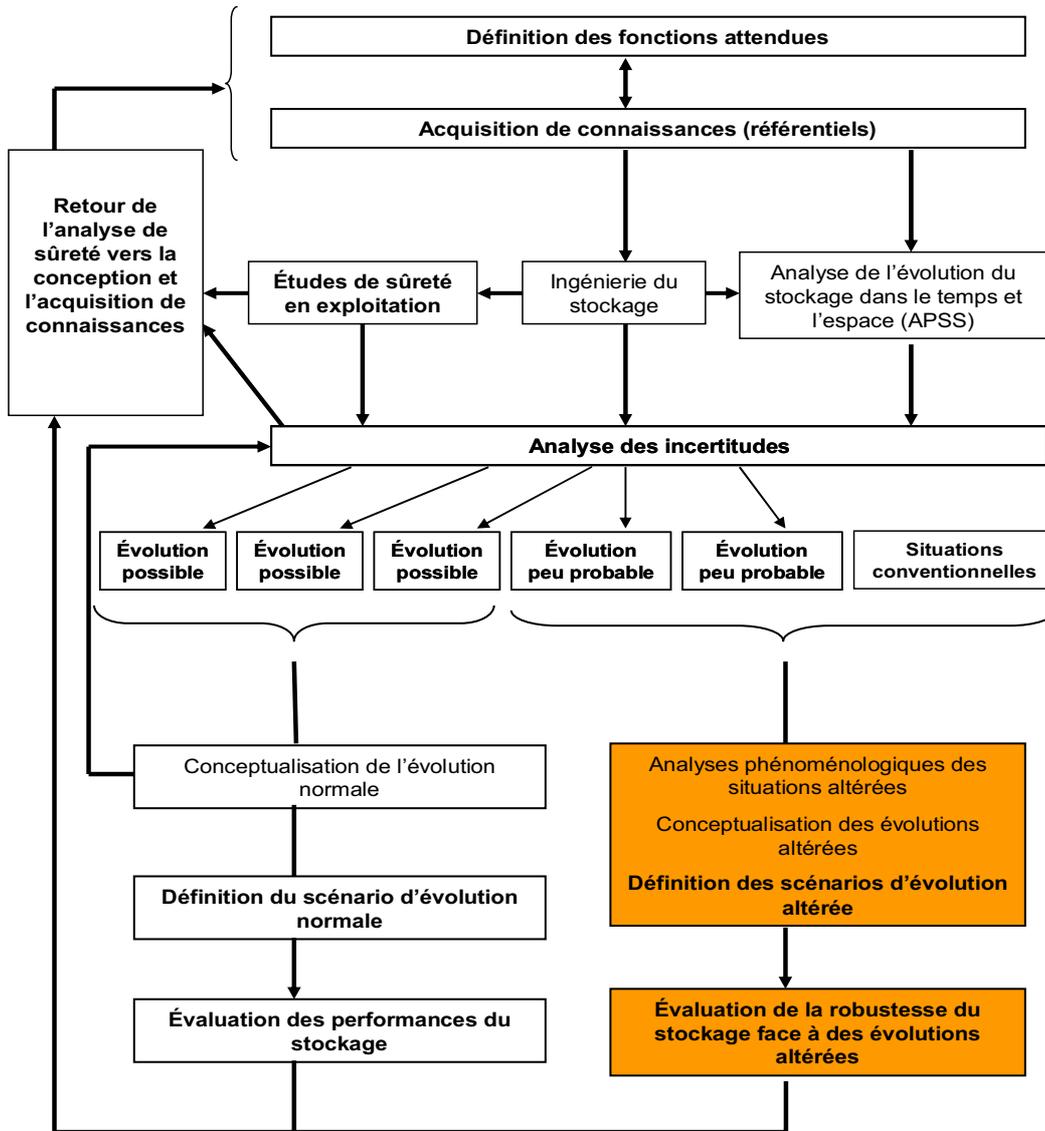
la mémoire du stockage par divers moyens permet de prévenir l'intrusion involontaire, mais qu'on ne peut se reposer indéfiniment sur elle. La quantification de l'impact du forage permettra d'apprécier si les dispositions de protection mises en œuvre suffisent à en réduire l'impact à un niveau acceptable.

Le choix du site et la conception du stockage permettent par ailleurs de négliger ou de limiter fortement l'impact d'autres événements : volcanisme, diagenèse, sismicité.

7

Evaluation des scénarios d'évolution altérée

7.1	Définition des scénarios d'évolution altérée	465
7.2	Le scénario « défaut de scellements ».....	468
7.3	Le scénario « défaut de colis »	514
7.4	Le scénario « forage ».....	531
7.5	Le scénario de « fonctionnement très dégradé »	598
7.6	Conclusion	613



THEME ABORDE EN TANT QUE DE BESOIN DANS LE PRESENT CHAPITRE



THEME TRAITÉ SPECIFIQUEMENT DANS LE PRESENT CHAPITRE

Synoptique 7-1

Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : analyse phénoménologique des situations altérées, définition des scénarios d'évolution altérée et évaluation de la robustesse du stockage en conséquence

L'objectif de ce chapitre est d'une part de décrire les scénarios hypothétiques, qualifiés de scénarios d'évolution altérée, retenus en complément du scénario d'évolution normale (décrit au chapitre 5) ; il permet d'autre part d'évaluer, au regard des résultats de leur quantification, l'aptitude du stockage à résister à différentes sollicitations externes ou défaillances de fonction de sûreté auxquelles il pourrait être soumis.

7.1 Définition des scénarios d'évolution altérée

Dans la logique d'établissement du dossier 2005, les scénarios d'évolution altérée (SEA) ont d'abord fait l'objet d'une définition de principe, sur la base du retour d'expérience de l'Andra, de l'analyse des situations prises en compte à l'international, et des recommandations de la RFS III.2.f [2]. Cette définition a permis d'établir les grands types de situations à couvrir et les principaux cas de calculs.

Ce n'est qu'à l'issue de l'analyse qualitative de sûreté, dont les résultats ont été présentés au chapitre 6, que l'on peut s'assurer que les scénarios d'évolution altérée ainsi identifiés couvrent bien l'ensemble des situations mises en exergue par l'Andra comment sortant du cadre du scénario d'évolution normale et de ses analyses de sensibilités.

Certaines analyses de sensibilité peuvent par ailleurs être dictées par le souci d'évaluer l'influence d'un paramètre, et ne pas être directement issues de l'AQS (voir paragraphe 7.1.1).

Une fois les SEA définis, et leur caractère enveloppe vérifié par l'AQS, il reste à les quantifier.

Pour décrire les séquences d'événements correspondantes, une connaissance suffisante de l'évolution du stockage « hors du domaine d'évolution normale » est nécessaire. C'est la raison pour laquelle des analyses phénoménologiques ont été mises en œuvre pour les situations altérées correspondant aux scénarios [29, 30, 31]. Les SEA sont alors évalués par un modèle de sûreté déduit de celui du SEN, mais prenant en compte les spécificités des évolutions en question.

Les SEA peuvent faire l'objet de calculs de sensibilité destinés à :

- couvrir des variantes des situations envisagées dans le calcul principal, en général renvoyant à des circonstances aggravantes ;
- couvrir des incertitudes sur les paramètres.

Les résultats des calculs des SEA (cas de base et sensibilités) doivent être comparés à des seuils. La RFS III.2.f. ne fournit pas de tels seuils, dans la mesure où il apparaît difficile de définir de manière générique l'acceptabilité des résultats des SEA. En effet, ces scénarios sont, comme on l'a dit, des situations représentant plusieurs évolutions altérées issues de causes d'origine diverse (ainsi, un scénario de défaut de colis peut correspondre à une malfaçon ou à une vitesse de corrosion très accélérée de l'enveloppe). Le SEA représente ces différentes situations de manière « enveloppe », c'est-à-dire qu'il fournit une description qui en majore globalement les différents effets possibles : dans l'exemple cité, on imagine dans le SEA une « disparition » complète du conteneur après 200 ans. S'il est possible d'évaluer la vraisemblance de chaque situation altérée, il est plus délicat de juger de la vraisemblance d'un scénario qui peut en représenter plusieurs, sous des hypothèses stylisées. Dans certains cas, un scénario d'évolution altérée peut ne pas représenter une situation physiquement possible, on parle alors de scénario « conventionnel » ou « what if ».

L'acceptabilité des impacts calculés est jugée au cas par cas. On retient simplement que :

- le critère de 0,25 mSv/an est conservé comme une référence parmi d'autres, c'est-à-dire qu'on compare les résultats obtenus par le calcul à cette valeur, sans imposer que la dose calculée respecte nécessairement cette contrainte ;
- jusqu'à quelques mSv/an (au maximum 10), on peut considérer l'impact comme acceptable sur une base au cas par cas. à condition que la vraisemblance de la (les) situation(s) décrite(s) soit suffisamment faible. En tout état de cause, on cherche à réduire l'impact de ces situations altérées par des moyens de conception appropriés, s'il en existe, même si l'impact est jugé acceptable ;

- un impact calculé dépassant la dizaine de millisieverts doit faire l'objet d'une attention particulière. Le caractère éventuellement trop enveloppe du scénario peut être mis en question, les moyens de conception qui pourraient permettre de se prémunir contre une telle situation doivent être examinés avec soin. Dans le cas de situations purement hypothétiques, pour des scénarios conventionnels, un tel impact n'est cependant pas nécessairement inacceptable en soi, dans la mesure où il ne renvoie pas à une situation pouvant réellement se produire.

7.1.1 Définition des grands types de scénarios

La réflexion initiale ayant conduit à définir les scénarios d'évolution altérée s'est fondée sur le découpage en fonctions. On a cherché à définir un type de situation permettant de décrire une situation de défaillance pour chacune des trois fonctions de sûreté principale, indépendamment de la probabilité de la situation décrite.

Pour la fonction « s'opposer à la circulation d'eau », on a vu au chapitre 3 l'importance des scellements (de puits, de galerie, de module). Il est apparu naturel de construire un scénario de défaillance de combinaisons des scellements [103] en différenciant ceux qui sont munis de coupures hydrauliques. On note que les bouchons d'alvéoles, bien que ne se rattachant pas formellement à la fonction « s'opposer à la circulation d'eau », sont inclus également dans le SEA en tant que composants défaillants, du fait de leur nature similaire à celle des autres scellements.

La fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » est assurée par divers composants en fonction des périodes de temps : conteneurs dans un premier temps (pour les déchets vitrifiés et les combustibles usés), matrices des déchets, forme physico-chimique des éléments relâchés, conditions chimiques et hydrauliques au sein des alvéoles. Il est difficile de définir un scénario couvrant les défaillances de l'ensemble de ces composants. Il a été retenu une défaillance des conteneurs de déchets thermiques [104] permettant à la fois un relâchement anticipé des radionucléides et une diffusion en ambiance thermique, accélérant a priori la migration hors du champ proche.

La fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » fait essentiellement appel à la formation hôte, même si les corps de scellements et les alvéoles interviennent également dans sa réalisation. On rappelle que cette fonction s'exerce par le biais du régime diffusif prédominant au sein de la formation hôte, par la dispersion spatiale que permet celle-ci, et à titre complémentaire en préservant les capacités de dispersion des formations encaissantes (voir chapitre 3). Il est donc apparu utile de considérer un forage intrusif [97] interceptant les formations géologiques et le stockage en divers endroits, défini de manière à court-circuiter y compris les horizons aquifères. Le but était de mettre en échec la dispersion spatiale et de favoriser la convection.

Ces trois situations particulières avaient pour but d'illustrer des cas de défaillance des fonctions, pas de couvrir a priori toute situation possible. L'analyse de sûreté permet d'identifier si les causes envisagées sont vraisemblables, et si d'autres phénomènes que ceux initialement envisagés peuvent provoquer des effets couverts par les scénarios. Ce travail a été présenté au chapitre 6.

Il est apparu utile, en complément de l'ensemble des SEA définis précédemment, d'en définir un quatrième qui permette de prendre en compte une défaillance généralisée des fonctions de sûreté. Il ne se fonde ni sur le retour d'expérience des scénarios définis par les homologues de l'Andra, ni sur les situations altérées identifiées à l'issue de l'AQS. Il s'agit d'un scénario dit de « fonctionnement très dégradé », consistant à réduire de manière systématique les performances des fonctions de sûreté, en les plaçant hors du domaine d'évolution normale. Les SEA précédemment évoqués permettent de tester le degré de redondance des fonctions de sûreté : on cherche à minimiser, voire à annuler, la contribution d'une fonction particulière, et on étudie si les autres fonctions permettent de demeurer conforme aux objectifs de sûreté. Le « fonctionnement très dégradé » évalue la complémentarité des fonctions : en les dégradant toute simultanément, et en comparant le résultat obtenu avec les résultats du scénario d'évolution normale, on peut observer si des niveaux minimaux de performances, hors de ce qui est attendu de manière normale, se complètent suffisamment pour permettre une maîtrise de l'impact.

7.1.2 Vérification de la cohérence avec la RFS III.2.f

La RFS III.2.f recommande de considérer les effets des situations suivantes :

- des changements climatiques majeurs. Ceux-ci ont été abordés au chapitre 6 (voir paragraphe 6.2.14.1 et 6.2.14.2) ; il n'est pas attendu d'effets significatifs du fait de la profondeur d'installation du stockage. Les éventuelles conséquences qui sortiraient de la situation normale de référence pourraient s'apparenter dans le pire des cas à des modifications significatives des modes de vie et habitudes alimentaires des individus vivants au niveau du site ainsi que des caractéristiques des encaissants. Ces cas sont couverts :
 - ✓ d'une part, par une étude préparatoire, ayant considéré un groupe critique associé à une biosphère froide et montré qu'il était moins pénalisant que le groupe choisi en référence,
 - ✓ d'autre part, par des choix d'exutoires proches du site et « profonds » qui sont peu sensibles à un éventuel endommagement des encaissants à proximité de la surface ;
- des mouvements verticaux exceptionnels ou des séismes. Sur le site de Meuse / Haute-Marne, les risques tectoniques sont faibles. Les effets d'un éventuel séisme ont été pris en compte dans l'analyse qualitative (voir paragraphe 6.2.14.4) et on montre qu'ils seraient négligeables tant au niveau des ouvrages que de la roche ;
- une intrusion humaine, sous diverses formes possibles. Ces cas sont traités par le SEA « forage » ;
- des défauts de barrière géologique. La RFS propose de considérer, pour les sites argileux, des hiatus de sédimentation sous forme de lentilles de sables. De telles structures sont exclues dans les argilites du Callovo-Oxfordien. L'analyse de sûreté menée au chapitre 6 (paragraphe 6.2.1.1) met en évidence que les seules structures non détectées qui pourraient être présentes seraient des structures mineures présentant une extension et un rejet limité. Les effets associés à de telles structures sont a priori très faibles. En dernier ressort ils sont couverts par le scénario de forage ;
- des défauts de scellements, qui font l'objet d'un SEA ;
- des défauts de colis, au moins au titre d'une analyse de sensibilité. Ce cas de figure est abordé à la fois dans le scénario d'évolution normale et sous forme d'un SEA spécifique.

7.1.3 Modalités génériques de traitement

Les calculs des SEA se fondent sur le même modèle que le SEN, adapté en fonction de la défaillance qu'il s'agit de représenter. Les paragraphes suivants détaillent, pour chaque scénario, les choix effectués.

La sélection opérée pour limiter le nombre de radionucléides à traiter dans les calculs, présentée au paragraphe 5.3.1.5, demeure pertinente pour les SEA. En fonction des temps de transfert attendus, on a pu au cas par cas compléter la liste. Ainsi, pour le SEA forage, on a par exemple pris en compte les radionucléides de période supérieure à 30 ans et les chaînes d'actinides.

7.2 Le scénario « défaut de scellements »

7.2.1 Définition du scénario

Ce scénario a pour objectif de traiter un défaut de tout ou partie des scellements, afin d'évaluer la robustesse du système de stockage face à différentes combinaisons de défaillances de ces composants (puits, galeries et fractionnement de modules), ou des bouchons d'alvéoles. On inclut également dans ce scénario tout défaut qui pourrait être lié au développement d'une zone endommagée autour des ouvrages plus significative que celle considérée en SEN et qui pourrait constituer une voie de transfert des radionucléides et/ou influencer l'évolution du stockage sur le long terme, même si le cas échéant cette évolution défavorable n'est pas due aux scellements eux-mêmes (par exemple, dans un cas d'endommagement de l'EDZ par les gaz tel qu'il a pu être évoqué dans le chapitre 6).

L'événement redouté est le relâchement de radionucléides à la sortie du puits au toit du Callovo-Oxfordien, à une date quelconque, à un flux supérieur à ce qui est prévu en évolution normale pendant la phase de post-fermeture.

L'analyse qualitative de sûreté a montré que le scénario « défaut de scellements » avait vocation à couvrir différents types de situations :

- un court-circuit partiel de la formation hôte, dû soit à un mauvais contact roche-argile gonflante, soit à une extension excessive de l'EDZ. Les radionucléides pourraient alors transiter préférentiellement par les galeries et puits vers la surface selon un mode de transport convectif et non diffusif ;
- dans certaines situations, une modification des conditions d'environnement hydro-chimique au sein des alvéoles (en dehors des plages de valeurs dans lesquelles les composants sont susceptibles de remplir au mieux leurs fonctions de sûreté), ce qui induit également une défaillance partielle de la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » ;
- dans certaines situations très peu probables, une dégradation d'ensemble de la perméabilité des scellements.

Sont retenus les ouvrages de scellement suivants :

- le bouchon d'alvéole de déchets C et de combustibles usés ;
- le scellement de galerie de liaison internes aux zones de stockage de déchets C et de combustibles usés (scellements de modules et scellements de zone), le scellement d'alvéole de déchets B et le scellement de zone de déchets B, le scellement des infrastructures de liaison à proximité des ouvrages d'accès surface-fond, le scellement d'ouvrages de liaison surface-fond (le puits).

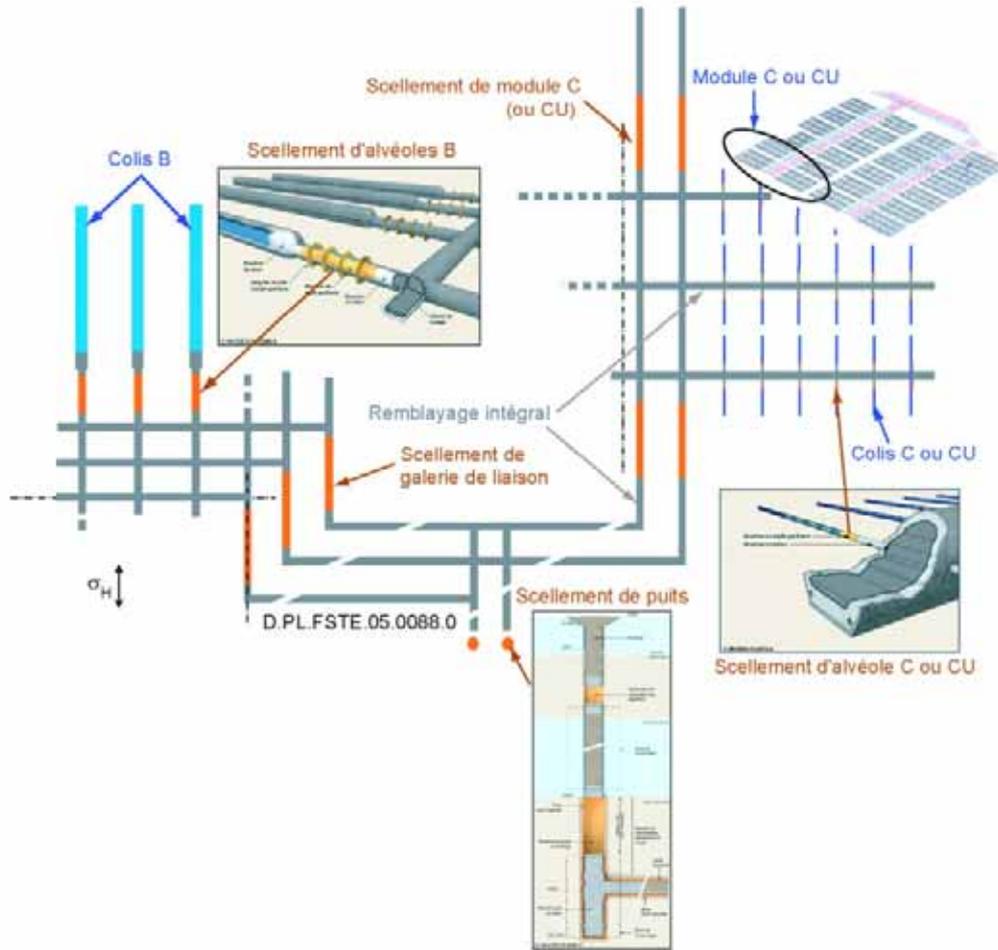


Figure 7.2-1 Représentation schématique des différents ouvrages de scellement

Le chapitre 6 a permis d'identifier un certain nombre de situations à traiter qui sont des situations enveloppes des éventuelles défaillances identifiées lors de l'analyse qualitative de sûreté. Trois familles de cas de calcul ont été traitées, et une situation a été ajoutée pour compléter la liste, bien que non directement issue de l'AQS (voir Tableau 7.2-1) :

- cas de calcul de défaillance des scellements de puits ;
- cas de calcul de défaillance des scellements réalisés avec des coupures hydrauliques⁸⁷ (scellements d'alvéoles/modules de déchets B, de zone de stockage, de galerie de liaison) ;
- cas de calcul de défaillance de tous les scellements ;
- cas de calcul d'abandon du stockage sans scellement des ouvrages d'accès surface-fond.

⁸⁷ Dans la suite du texte, on désignera par commodité ce cas de calcul sous le nom « scellements de galerie défaillants », bien que stricto sensu il inclue également les scellements d'alvéoles B

	Bouchons d'alvéoles	Scellements de modules et de zones de stockage	Scellements de galeries de liaison	Scellements des ouvrages d'accès
SEN (Rappel)	Défaillance isolée ⁸⁸	Efficaces	Efficaces	Efficaces
Scellements de puits défaillants	Défaillance isolée	Efficaces	Efficaces	Défaillants
Scellements de galerie défaillants	Défaillance isolée	Défaillants	Défaillants	Efficaces
Tous scellements défaillants	Défaillance des bouchons d'alvéoles de déchets C et de déchets B	Défaillants	Défaillants	Défaillants
Abandon du stockage	Défaillance isolée	Efficace	Efficace	Non Scellé

Tableau 7.2-1 *SEA défaut de scellements - Tableau résumant la liste des cas de calcul traités*

7.2.2 Traitement du scénario

On expose dans ce paragraphe la manière dont sont représentés les défauts de scellements. Tous les modèles et paramètres qui ne sont pas évoqués sont implicitement identiques à ceux qui sont considérés en scénario d'évolution normale (modèles de relâchement, durée de vie des conteneurs, prise en compte d'une défaillance isolée de conteneur, etc.).

7.2.2.1 Eléments génériques pour l'ensemble des cas de calcul

La défaillance des scellements est représentée par un défaut d'interface argile gonflante – roche (suppression de la coupure hydraulique, ou présence d'une zone fracturée pour les scellements non ancrés). Le noyau du scellement conservant des propriétés hydrauliques comme en SEN, on suppose que les zones de stockage sont suffisamment éloignées pour qu'elles soient indépendantes du point de vue des transferts de radionucléides. En revanche, la dégradation de la fonction hydraulique peut les rendre dépendantes du point de vue des circulations d'eau. La contribution hydraulique de l'ensemble des zones de stockage est prise en compte par le biais des conditions aux limites, qui ont été déterminées à partir d'un calcul préliminaire intégrant l'ensemble des zones de stockage.

On a choisi, pour limiter le nombre de cas de calculs, de ne traiter que les zones de stockage ayant conduit à l'impact le moins faible en SEN. Sont ainsi systématiquement traitées les zones de combustibles usés CU1 et CU2, ainsi que les zones de déchets vitrifiés C1/C2 et C3/C4 [105]. Les zones de déchets B ne sont abordées que dans le cas de figure « tous scellement défaillants », en se limitant aux déchets de type B1x (voir chapitre 5) et aux boues bitumées.

Afin de représenter un effet possible de l'instauration d'un régime convectif au sein des alvéoles de déchets vitrifiés, venant perturber la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », notamment en cas de perte de bouchons, on prend en compte un modèle de relâchement dégradé du verre pour les colis types considérés (C1/C2 et C3/C4). L'effet d'un régime convectif dans les alvéoles de déchets vitrifiés est dans ce cas pris en compte par une vitesse de dissolution de la matrice vitreuse constante, égale à la vitesse initiale (modèle « $V_0.S$ »).

⁸⁸ On rappelle que la défaillance isolée est traitée en considérant un bouchon d'alvéole C défaillant. Les calculs ont montré que cela est sans incidence en scénario d'évolution normale.

Compte tenu que l'on s'attend à des transferts relativement rapides dans les ouvrages, on a retenu pour le calcul un gradient hydraulique correspondant au modèle hydrogéologique actuel. Celui-ci est de 0,2 m/m (gradient le plus fort sur la zone). Une étude de sensibilité considère cependant des gradients encore plus forts, pour compléter l'analyse.

On notera enfin que, dans l'hypothèse où ce paramètre aurait une influence sur les quantités d'eau transitant dans les ouvrages d'accès soumis à un défaut de scellements, la dépendance explicite de la perméabilité du Callovo-Oxfordien et de la bentonite en fonction de la température est retenue. L'effet de la température a été pris en compte par le biais d'un facteur correctif de la perméabilité en considérant différents états hydrauliques permanents dans le temps. Ces différents états hydrauliques sont obtenus en adaptant la perméabilité en fonction de la température moyenne des différents matériaux. Ces températures sont issues des modèles thermiques en 2D et sont représentées constantes par intervalle de temps (Figure 7.2-2).

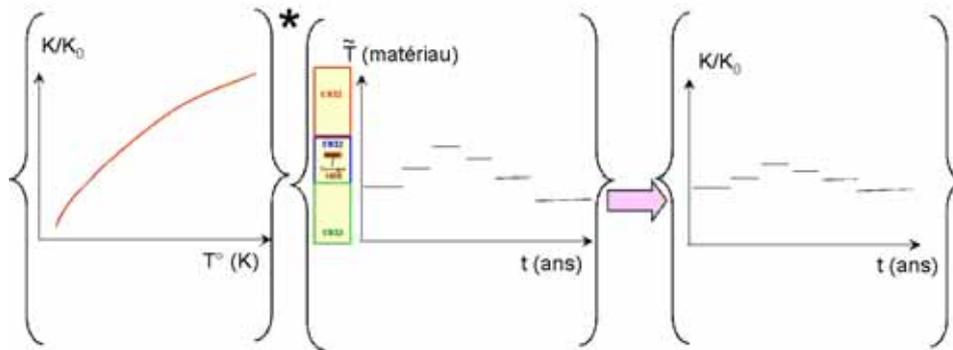


Figure 7.2-2 SEA défaut de scellements - Prise en compte de la variation de la perméabilité des matériaux

Les transferts de radionucléides considérés sont uniquement des transferts de solutés. On a vu au chapitre 6 que, dans tous les cas, le carbone 14 contenu dans les colis de déchets et susceptible de migrer sous forme gazeuse est en quantité très faible et aurait très significativement décliné avant d'avoir atteint les exutoires. Les autres radionucléides gazeux ont soit une période radioactive plus courte que le carbone 14, soit une affinité pour l'eau plus importante.

On note enfin que l'influence du transitoire hydraulique, dû aux gaz de corrosion, n'est pas prise en compte. En tout point où un scellement est défaillant, il est perméable aux gaz plus encore qu'à l'eau et les pressions s'équilibrent de part et d'autre du scellement. Les gaz n'induisent dans ce cas pas de gradient de surpressions, hormis éventuellement dans les alvéoles de combustibles usés du fait de la présence d'une barrière ouvragée continue. Dans un tel cas, seul le colis défaillant pourrait relâcher dans des conditions de gradients hydrauliques forts. Ce cas correspond à une défaillance multiple et mobilise un inventaire très faible, il n'est pas retenu.

7.2.2.2 Distinction selon les cas de calcul

● Cas de calcul 1 : défaillance des scellements de l'ensemble des puits

Ce cas de calcul couvre la défaillance des scellements de tous les puits. On prend en compte contrairement au SEN (voir chapitre 5) une zone fracturée continue autour du puits sur toute la hauteur du Callovo-Oxfordien. Celle-ci est supposée avoir une extension de 0,1 R (où R est le rayon du puits) et n'être pas comprimée par le scellement. Cette extension est arbitraire, dans la mesure où les modèles ne prévoient pas de zone fracturée dans cette zone du Callovo-Oxfordien (voir Figure 7.2-3). Les valeurs de perméabilité retenues pour le noyau de scellement, la partie fracturée et micro-fissurée de l'EDZ sont similaires à celles retenues en SEN et rappelées dans le Tableau 7.2-2.

Perméabilité dans le noyau des scellements	$K = 10^{-11}$ m/s
Perméabilité de la zone fracturée	$K = 5.10^{-9}$ m/s
Perméabilité de la zone microfissurée	$K = 5.10^{-11}$ m/s
Perméabilité verticale dans le Callovo-Oxfordien sain	$K_V = 5.10^{-14}$ m/s
Perméabilité horizontale dans le Callovo-Oxfordien sain	$K_H = 5.10^{-13}$ m/s

Tableau 7.2-2

SEA défaut de scellements - Valeur de perméabilités dans la zone fracturée, microfissurée, le noyau de scellement et la barrière géologique saine (rappel)

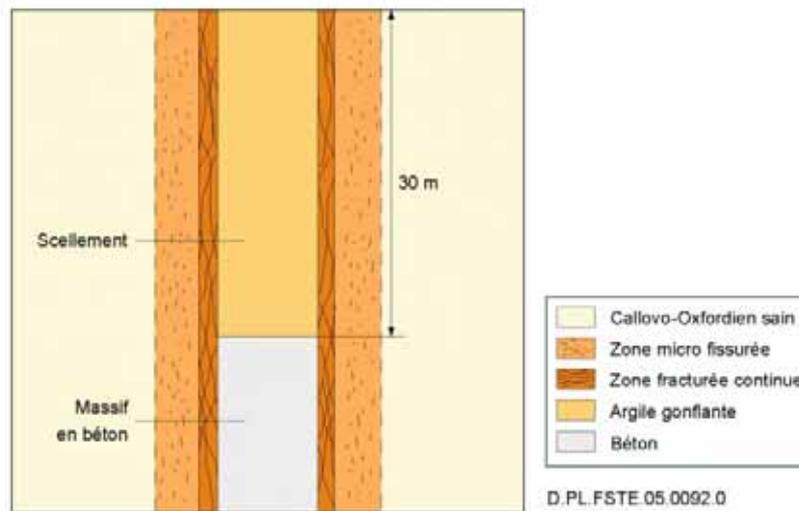


Figure 7.2-3

Représentation schématique d'un scellement de puits défaillant

La date de début de défaillance est difficile à évaluer, dans la mesure où elle dépend du processus qui est à l'origine du défaut. S'il s'agit par exemple d'un gonflement insuffisant de la bentonite, alors le scellement n'est jamais efficace. Il devient donc « défectueux » à partir du moment où, en situation d'évolution normale, il est censé avoir suffisamment gonflé pour remplir sa fonction. S'il s'agit en revanche de causes liées à la propagation d'une perturbation chimique, telle que la perturbation alcaline, alors la défaillance nécessite qu'au préalable les ouvrages en béton aient pu se dégrader et le panache alcalin ait pu pénétrer suffisamment dans l'interface entre la roche et la bentonite, ce qui nécessite plusieurs millénaires.

On retient en définitive, de manière conventionnelle, que la défaillance des scellements est effective quelques siècles⁸⁹ après la fermeture du stockage.

Ce cas de calcul permet d'étudier dans quelle mesure les scellements de galeries et d'alvéoles offrent une redondance par rapport aux scellements de puits.

⁸⁹ On retient pour les besoins du calcul une date de 500 ans après le début de la décroissance des radionucléides. Cette date de 500 ans est purement arbitraire et n'a bien évidemment pas de lien avec celle liée à la période de surveillance institutionnelle du stockage.

● **Cas de calcul 2 : défaillance des scellements réalisés avec coupure hydraulique (des infrastructures et des zones de stockage)**

La cas de calcul 2 couvre la défaillance de tous les scellements réalisés en galeries ainsi qu'en tête d'alvéole de déchets B, par un mode commun de défaillance des coupures hydrauliques qui permettent d'interrompre la zone fracturée de plus forte perméabilité en paroi des ouvrages. Comme dans le SEN, les scellements de galeries sont représentés avec un noyau de scellement et un ancrage équivalent. En cas de défaut de scellements de galerie, seuls les paramètres de la coupure hydraulique diffèrent de ceux du SEN. Ces derniers correspondent à ceux de la zone fracturée.

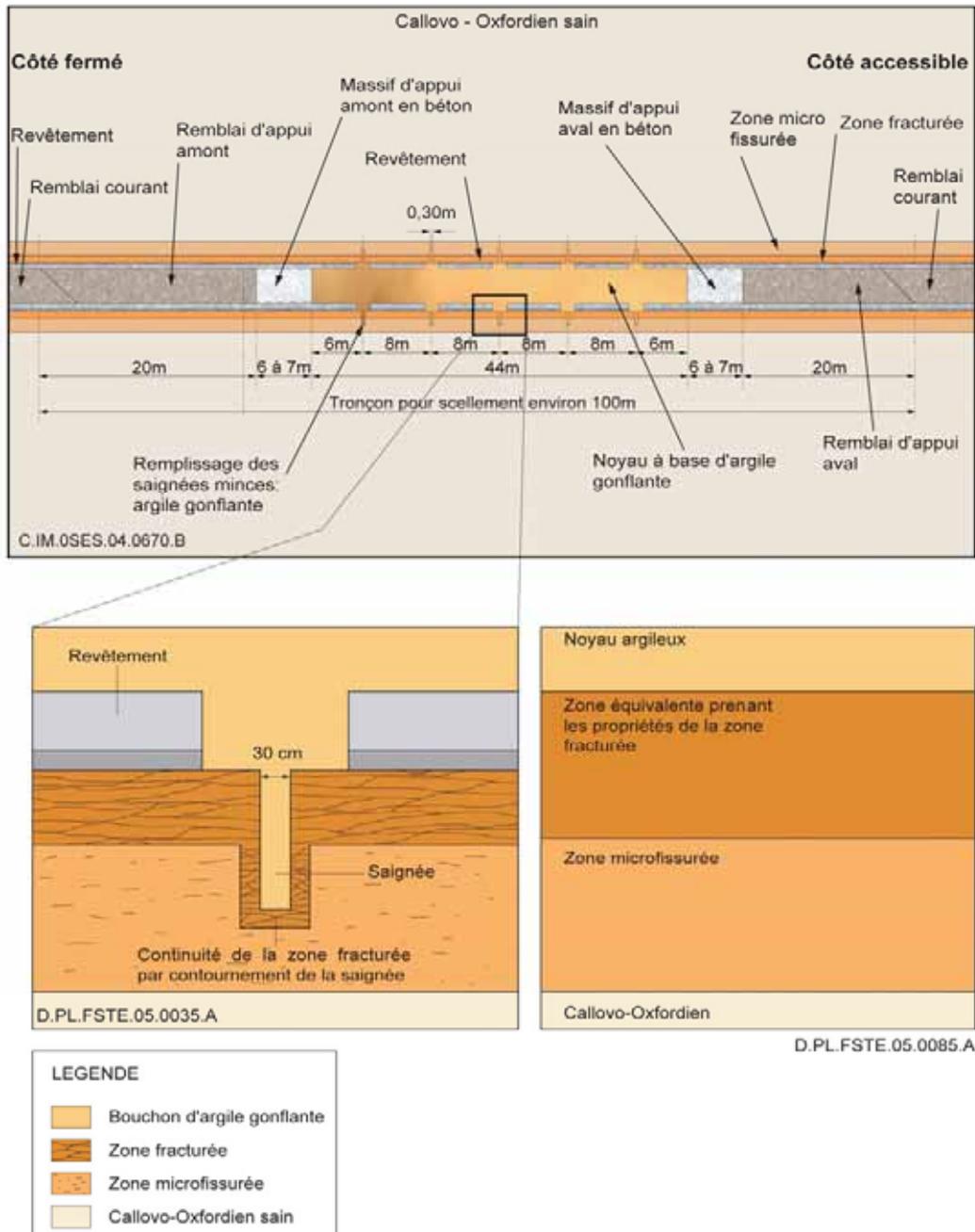


Figure 7.2-4

Représentation schématique de la défaillance des scellements de galerie par les ancrages

Dans cette situation, les scellements des puits jouent pleinement leur rôle d'isolation du stockage des aquifères. Ce cas de calcul permet d'étudier si ces ouvrages offrent une certaine redondance par rapport aux scellements implantés dans les galeries.

● **Cas de calcul 3 : défaillance de tous scellements**

Cette situation nécessite de traiter l'ensemble des zones de stockage ; elle couvre la défaillance des tous les ouvrages de scellements depuis les bouchons d'alvéoles jusqu'aux puits d'accès. Elle conduit à considérer l'existence d'une zone fracturée continue depuis les colis de déchets jusqu'aux encaissants. Ce type de situation peut couvrir, par exemple, une évolution non anticipée de la zone endommagée, ou un sur-endommagement lié par exemple aux gaz.

Dans cette situation, la défaillance des scellements de puits est représentée de la même manière que pour le premier cas de calcul. La défaillance des scellements de galerie est modélisée de façon similaire à ce qui est fait pour le deuxième cas de calcul.

● **Cas de calcul 4 : abandon du stockage sans scellement de puits.**

L'hypothèse est faite que le stockage est abandonné alors que les puits ne sont pas scellés. Néanmoins, tous les autres ouvrages (galeries de liaison principales, secondaires et galeries d'accès aux alvéoles) sont remblayés et scellés ; tous les scellements de galeries sont efficaces. Cette situation est traitée différemment des autres puisque l'occurrence de l'événement perturbateur (absence de puits scellé) intervient dès la fermeture du stockage.

Dans cette situation particulière, l'absence de scellements de puits est modélisée par une perméabilité élevée de 10^{-6} m/s à l'emplacement où aurait dû se trouver le corps de scellement, au lieu de 10^{-11} m/s lorsqu'il est présent et efficace.

7.2.2.3 Etudes de sensibilité

Les études de sensibilité suivantes sont conduites :

- dans tous les cas de calcul, pour tenir compte d'un éventuel sur-endommagement de l'EDZ (par exemple, à la suite d'une évolution non anticipée des propriétés de celle-ci), on a retenu d'étudier en sensibilité une situation où les propriétés de transport hydrauliques et géochimiques de la zone fracturée et de la zone microfissurée sont dégradées vers des valeurs plus défavorables qu'en référence. Elles sont rappelées dans le Tableau 7.2-3. Dans cette même étude, on représente un endommagement possible des barrières ouvragées et des noyaux de scellement en dégradant leur perméabilité d'ensemble de 10^{-11} m/s à 10^{-9} m/s ;

	Calcul de référence EDZ phénoménologique	Calcul de sensibilité EDZ « dégradée »
Zone fracturée	$K = 5.10^{-9} \text{ m/s}$ <u>Anions :</u> $De_{\text{Anions}} = 1.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,15$ <u>Cations :</u> $De_{\text{Cations}} = 5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,20$ Rétention géochimique phénoménologique	$K = 10^{-6} \text{ m/s}$ Coefficient pénalisant ($Dp = De / \omega = 2.10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) Pas de rétention géochimique
Zone microfissurée	$K = 5.10^{-11} \text{ m/s}$ <u>Anions :</u> $De_{\text{Anions}} = 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,05$ <u>Cations :</u> $De_{\text{Cations}} = 2,5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,18$ Rétention géochimique phénoménologique	$K = 5.10^{-9} \text{ m/s}$ <u>Anions :</u> $De_{\text{Anions}} = 1.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,04$ <u>Cations :</u> $De_{\text{Cations}} = 5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,21$ Rétention géochimique conservative

Tableau 7.2-3 *SEA défaut de scellement – Sensibilité aux valeurs des paramètres hydrauliques de transfert et de rétention chimique de l'EDZ*

- pour prendre en compte la possibilité, très peu probable selon les évaluations conduites, d'une propagation du panache alcalin à travers le bouchon d'alvéole défaillant, et jusqu'aux premiers colis de déchets vitrifiés, on considère un relâchement accéléré, au moins pour le colis le plus proche du bouchon, dans un environnement de pH supérieur à 9. Il n'existe pas de modèle pour représenter directement un tel relâchement. On choisit de le prendre en compte en étude de sensibilité en appliquant à tous les déchets vitrifiés (ce qui est très pénalisant) une vitesse de dissolution conservative et un taux de fracturation de 40, huit fois plus fort que pour le modèle de référence. Cela conduit à une dissolution complète du verre en quelques siècles, équivalente de fait à un relâchement labile au regard des temps de transfert dans la formation hôte ou dans les ouvrages d'accès. Cette étude est conduite conjointement avec des paramètres dégradés d'EDZ et une perméabilité élevée de la bentonite (10^{-9} m/s au lieu de 10^{-11} m/s en référence). Cette étude de sensibilité est menée pour la situation « tous scellements défaillants » et à titre illustratif pour la situation « scellements de puits défaillants » ;
- pour prendre en compte une éventuelle dégradation de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » au sein du corps des scellements ou de la barrière ouvragée des alvéoles qui en sont munies, du fait d'une perte partielle de leurs propriétés (par exemple à la suite d'une extension hétérogène d'une perturbation chimique au sein de la bentonite), on considère également une étude de sensibilité dans laquelle les propriétés de transfert et de rétention chimique de la bentonite sont conservatives. Les valeurs de paramètres de transport et de rétention chimique, déjà retenues en sensibilité du SEN, sont présentées dans le Tableau 7.2-4 ;

	Calcul de référence					Sensibilité aux paramètres géochimique	
	Période [ans]	$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]	R [-]	Csat [mol/m ³]
¹⁰ Be	1 600 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	973	10 ⁻²	1	10
¹⁰ Be (deltaT>20)	1 600 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	98	10 ⁻²	1	10
¹⁴ C	5 730	0,05	5.10 ⁻¹²	1	2,3	1	9
³⁶ Cl	302 000	0,05	5.10 ⁻¹²	1	soluble	1	soluble
⁴¹ Ca	103 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	6	2,3	1	9
⁴¹ Ca (deltaT>20)	103 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	1,5	2,3	1	9
⁵⁹ Ni	75 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	2 430	5.10 ⁻²	487	1
⁷⁹ Se	65 000	0,05	5.10 ⁻¹²	1	5.10 ⁻⁷	1	5.10 ⁻⁴
⁹³ Zr	1 530 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	486 000	2.10 ⁻⁵	48 600	3.10 ⁻³
^{93m} Mo	3 500	0,05	5.10 ⁻¹²	1	1.10 ⁻⁵	1	1.10 ⁻³
^{93m} Nb	16,4	0,05	5.10 ⁻¹²	350 000	2.10 ⁻⁴	35 000	2.10 ⁻³
⁹⁴ Nb	20 300	0,05	5.10 ⁻¹²	350 000	2.10 ⁻⁴	35 000	2.10 ⁻³
⁹⁹ Tc	213 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	146 000	4.10 ⁻⁶	48 600	1.10 ⁻⁴
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	4 380	4.10 ⁻⁴	4 380	1.10 ⁻²
¹²⁶ Sn	100 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	53 500	1.10 ⁻⁵	14 600	1.10 ⁻⁴
¹²⁹ I	15 700 000	0,05	5.10 ⁻¹²	1	soluble	1	soluble
^{166m} Ho	1 200	0,36	5.10 ⁻¹⁰	58 300	1.10 ⁻⁴	5 830	1.10 ⁻³
¹³⁵ Cs	2 300 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	487	soluble	290	soluble
¹³⁵ Cs (deltaT>20)	2 300 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	49	soluble	30	soluble

Tableau 7.2-4 *SEA défaut de scellements - Valeurs de référence et de sensibilité des paramètres de rétention chimique dans la barrière ouvragée argileuse et dans les scellements*

- pour prendre en compte les incertitudes sur la valeur du gradient de charge vertical et en particulier son évolution au cours du temps, une étude de sensibilité a été réalisée en considérant un gradient ascendant de 0,4 m/m, correspondant au modèle à un million d'années, et un gradient pénalisant ascendant de 1 m/m. Ce dernier n'a pas de réalité physique, mais permet de tester l'influence de ce paramètre particulier, dans un contexte où la convection est susceptible d'être un mode de migration important.

Le Tableau 7.2-5 résume les études de sensibilité, avec les colis types pour lesquels elles ont été conduites.

	Situations	Colis type
Sensibilité à l'EDZ (EDZ dégradée + Knoyau = 10^{-9} m/s)	Tous scellements défailants	CU1, CU2
	Scellements des ouvrages d'accès défailants	CU1, CU2
Sensibilité à l'EDZ (EDZ dégradée + Knoyau = 10^{-9} m/s) + Terme source verre pénalisant ($V_0.S$ pénalisant)	Tous scellements défailants	C1/C2, C3/C4
	Scellements des ouvrages d'accès défailants	C1/C2, C3/C4
Sensibilité à la géochimie de la bentonite (géochimie conservative)	Tous scellements défailants	CU2
Gradient ascendant fort	Tous scellements défailants	CU1

Tableau 7.2-5 *SEA défaut de scellements - Liste des études réalisées en sensibilité du scénario « défaut de scellements »*

7.2.3 Effets sur les fonctions de sûreté

Comme pour le scénario d'évolution normale, la démarche d'analyse des résultats suit deux objectifs :

- le premier consiste à comprendre le fonctionnement du système en cas de situation de défaut de scellements ou de non fermeture du stockage. L'utilisation d'indicateurs intermédiaires permet de vérifier l'efficacité des fonctions mises en jeu ;
- le second vise à évaluer l'impact radiologique associé aux différentes situations envisagées en référence et en sensibilité.

Comme vu précédemment, le défaut de scellements engendre une dégradation ou une modification des performances associées aux trois fonctions de sûreté. En effet, les situations telles qu'elles sont définies remettent en cause directement ou indirectement les propriétés hydrauliques associées aux scellements. Dans de telles configurations, les circulations d'eau dans les ouvrages peuvent s'intensifier dégradant ainsi les performances associées à la fonction de sûreté « s'opposer à la circulation d'eau ». Par ailleurs, un défaut de scellements généralisé induit un court-circuit potentiel des barrières de confinement situées entre les colis et l'homme et donc une détérioration des performances associées à la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ». Enfin, comme pour le SEN, on considère que quelques conteneurs de combustibles usés ou surconteneurs de déchets C présentent une défaillance prématurée dès 200 ans après la fermeture du stockage (voir chapitre 5). Celle-ci engendre alors une diminution des performances associées à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » dans la mesure où elle entraîne un relâchement et une migration de radionucléides durant le transitoire thermique.

Sont présentés dans un premier temps les effets des différentes situations de défaut de scellements sur les trois fonctions de sûreté par le biais d'indicateurs intermédiaires qui sont identiques à ceux utilisés en SEN (voir chapitre 5.3), puis dans un second temps, les impacts associés à la fraction d'activité qui suit une évolution « altérée » et circule par les voies d'accès. L'impact associé au reste de l'activité, suit une évolution normale. Il n'est pas représenté car il est indiscernable de l'impact résultant du SEN.

Les résultats peuvent être différents selon la zone de déchets concernée et l'analyse spécifique à chaque radionucléide. Chaque fois que nécessaire, on différencie les résultats par type de déchets et par radionucléide. Quand il s'agit d'illustrer un résultat, on retient par défaut le cas particulier de l'iode 129 pour la zone de combustibles CU1, qui induit l'impact le plus élevé.

7.2.3.1 Combustibles usés CU1

- **Effet sur la fonction « s'opposer à la circulation d'eau »**

Situation de défaillance du scellements de puits ou d'abandon du stockage puits non scellés (cas de calcul 1 et 4)

Ces deux situations sont traitées ensemble dans la mesure où elles remettent toutes deux en cause la fonction hydraulique du scellement des puits soit par la présence d'une zone fracturée continue autour de ce dernier, soit par une absence de scellements. Elles diffèrent néanmoins car la perméabilité de la zone fracturée autour du puits retenue dans le premier cas ($K=5.10^{-9}$ m/s) est nettement plus faible que la perméabilité retenue dans le puits en cas d'abandon du stockage (10^{-6} m/s). Notons qu'en cas de scellement de puits efficace (pas de zone fracturée), la perméabilité la plus élevée au niveau des puits est celle de la zone microfissurée de 5.10^{-11} m/s.

En cas de scellements efficaces, l'influence hydraulique des encaissants sus-jacents sur le stockage est faible ; les écoulements dans les stockages restent lents et limités (débit d'eau sortant du puits de $0,5\text{m}^3/\text{an}$) et la fonction de limitation des circulations d'eau est effective. Dès lors que la perméabilité équivalente du scellement de puits augmente, et dans la mesure où les gradients de charges dans le Callovo-Oxfordien sont imposés de façon pénalisante ascendants sur toute la zone de transposition et donc au niveau des puits, on observe une perte de charges dans le puits qui tend à s'équilibrer avec celle des encaissants sus-jacents.

Dans les deux situations de défaillance étudiées, les perméabilités au niveau des puits sont suffisamment élevées pour que la charge dans les encaissants sus-jacents se transmette à la base du puits ; cette faible charge tend à se transmettre à son tour dans les ouvrages de stockage mais son influence est limitée du fait de l'efficacité des scellements de galeries, qui sont redondants avec le scellement de puits, et dont la perméabilité équivalente est de l'ordre de 5.10^{-9} m/s. La perte de charge engendrée dans le stockage est de l'ordre de 2 mètres par rapport à la situation de référence comme illustré sur les coupes piézométriques de la Figure 7.2-5 et de la Figure 7.2-6.

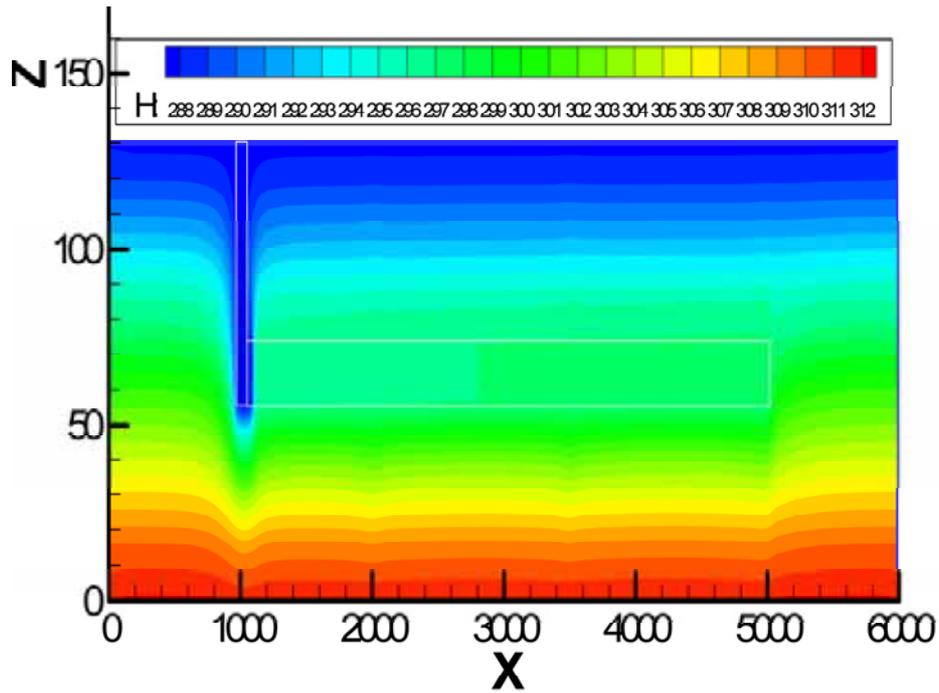


Figure 7.2-5

SEA défaut de scellements : coupe verticale traversant les ouvrages de liaison et le puits - Piézométrie dans la zone de stockage de combustibles usés CUI – scellements de puits défailants (H = charge hydraulique en mètres NGF⁷¹)

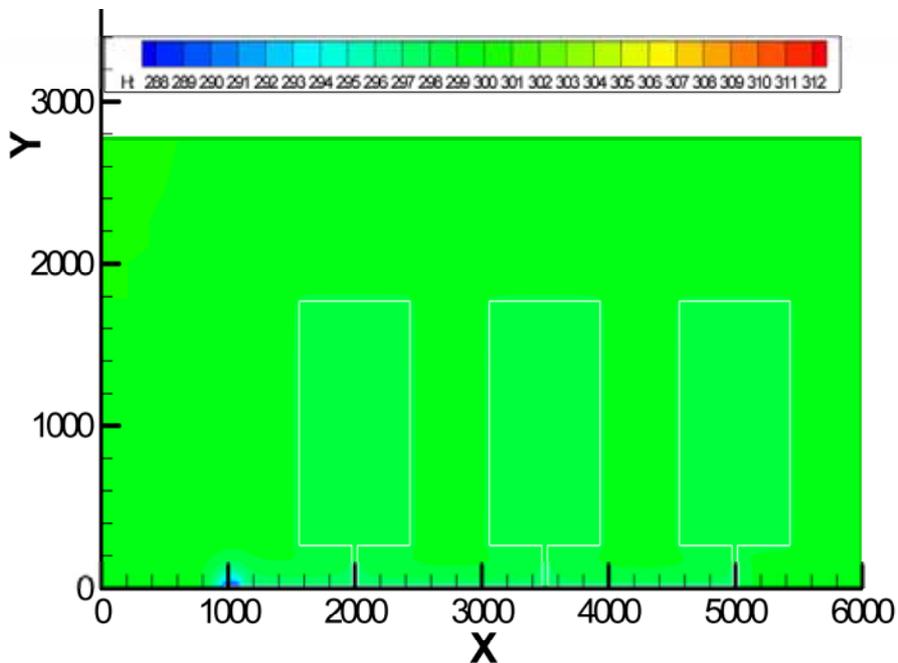


Figure 7.2-6

SEA défaut de scellements - Coupe horizontale traversant le stockage – Piézométrie dans la zone de stockage de combustibles usés CUI – Scellements de puits défailants (H = charge hydraulique en mètres NGF⁷¹)

Par ailleurs, les gradients de charges horizontaux entre les ouvrages de stockage et le puits favorisent les écoulements d'eau vers le puits. Dans la situation de défaillance des scellements de puits, le débit d'eau en sortie de puits est de $1 \text{ m}^3/\text{an}$.

Le transport est convectif en entrée de zones de stockage : le nombre de Péclet est de l'ordre de 20 en entrée de galerie de liaison secondaire, alors qu'il est de l'ordre de 10 en évolution normale.

Dans la situation d'abandon de puits, la perméabilité plus importante retenue engendre une perturbation hydraulique légèrement plus importante des ouvrages de stockage. On note en particulier des débits d'eau sortant du puits de l'ordre de $1,4 \text{ m}^3/\text{an}$.

Soulignons néanmoins que ces débits restent faibles même s'ils sont sensiblement supérieurs à la situation de référence ($0,5 \text{ m}^3/\text{an}$). En effet, l'efficacité des différentes coupures hydrauliques des scellements de galeries, même avec la représentation pessimiste qui est la leur dans le scénario (non interruption de la zone microfissurée), joue un rôle redondant de celui des scellements de puits et réduit de manière significative la perturbation hydraulique dans le stockage (voir Figure 7.2-7).

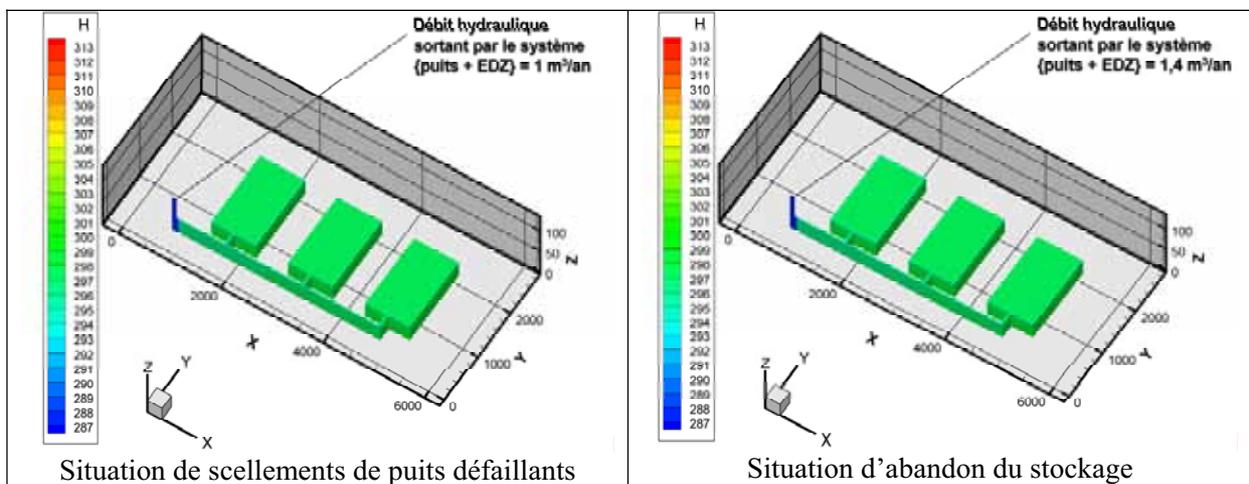


Figure 7.2-7

SEA défaut de scellements - Colis type CUI - Débit hydraulique sortant des puits - situation de scellements des puits défailnants et abandon du stockage ($H = \text{charge hydraulique en mètres NGF}^{71}$)

Au niveau des galeries d'accès et dans les alvéoles, le système reste diffusif (nombre de Péclet de l'ordre de 0,2 au milieu des galeries d'accès). Dans ces conditions, la répartition des voies de transfert au niveau de l'alvéole (le flux entrant dans la barrière géologique et celui entrant dans la galerie) ne diffère pas de celle du SEN.

Le défaut de bouchon isolé n'a quant à lui, ni dans ce cas, ni dans les suivants, d'influence visible sur les écoulements.

Situation de défaillance des scellements avec coupure hydraulique (Cas de calcul 2)

Cette situation engendre une perturbation hydraulique du stockage plus limitée que dans les situations étudiées précédemment dans la mesure où les scellements des puits restent efficaces. La perte de charges dans les ouvrages de stockage est plus limitée (de l'ordre de 1 mètre).

Cette situation est proche de l'évolution normale dans la mesure où la charge à la base du puits n'est pas perturbée par celle des encaissants sus-jacents. Néanmoins, la défaillance des scellements de galeries, se caractérisant par une augmentation d'un facteur 5 de la perméabilité équivalente des coupures hydrauliques⁹⁰, engendre des circulations d'eau un peu supérieures à celles évaluées en SEN ($0,75 \text{ m}^3/\text{an}$ contre $0,5 \text{ m}^3/\text{an}$ en sortie de puits). Dans les deux cas, les débits restent extrêmement faibles.

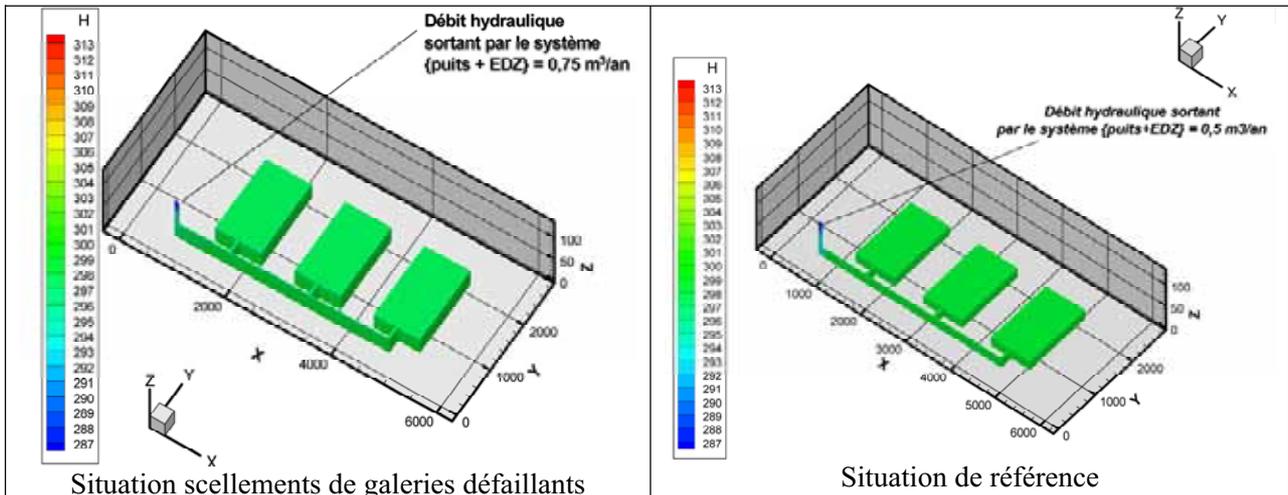


Figure 7.2-8

SEA défaut de scellements - Colis type CUI - Débit hydraulique sortant des puits - Situation de défaillance des scellements de galeries - Calcul de référence ($H = \text{charge hydraulique en mètres NGF}^{71}$)

Dans la zone de stockage, les phénomènes convectifs sont légèrement supérieurs à ceux de la configuration de défaillance des scellements de puits seuls, du fait de l'inefficacité des scellements de galeries (nombre de Péclet en sortie de zone de l'ordre de 25 contre 20 en situation de défaillance du scellement de puits et 10 en SEN).

En revanche, le système reste diffusif ou en codominance diffusive - convective dans les modules de stockage et au niveau des alvéoles. Ainsi, comme pour les situations précédentes, la répartition des voies de transfert au niveau de l'alvéole ne diffère pas de celle du SEN.

Situation tous scellements défailants (Cas de calcul 3)

Cette situation engendre une perturbation hydraulique plus importante que les deux précédentes dans la mesure où tous les dispositifs de scellements contribuant à rendre les ouvrages d'accès (galeries et puits) résistants d'un point de vue hydraulique sont défailants. La charge dans les encaissants sus-jacents se propage ainsi plus facilement depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusque dans le stockage engendrant une perte de charge de l'ordre de 4 mètres dans le stockage par rapport à la situation de référence comme illustré sur la Figure 7.2-9 et la Figure 7.2-10.

⁹⁰ C'est-à-dire la perméabilité globale du système constitué par coupure, le revêtement en béton non retiré entre les clés d'ancrage et la zone fracturée environnante.

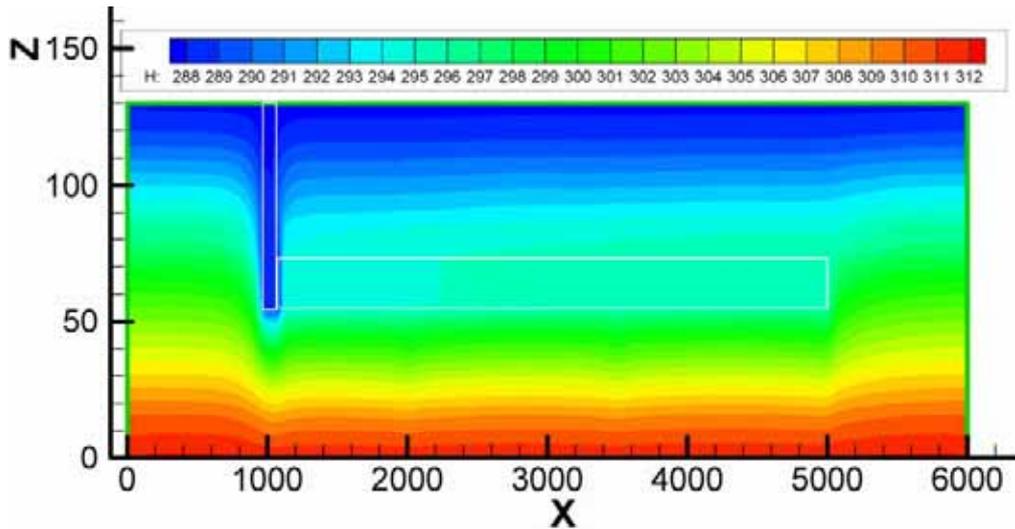


Figure 7.2-9

SEA défaut de scellements - Coupe verticale traversant les ouvrages de liaison et le puits – piézométrie dans la zone de stockage de combustibles usés CUI - tous scellements défailants (H = charge hydraulique en mètres NGF⁷¹)

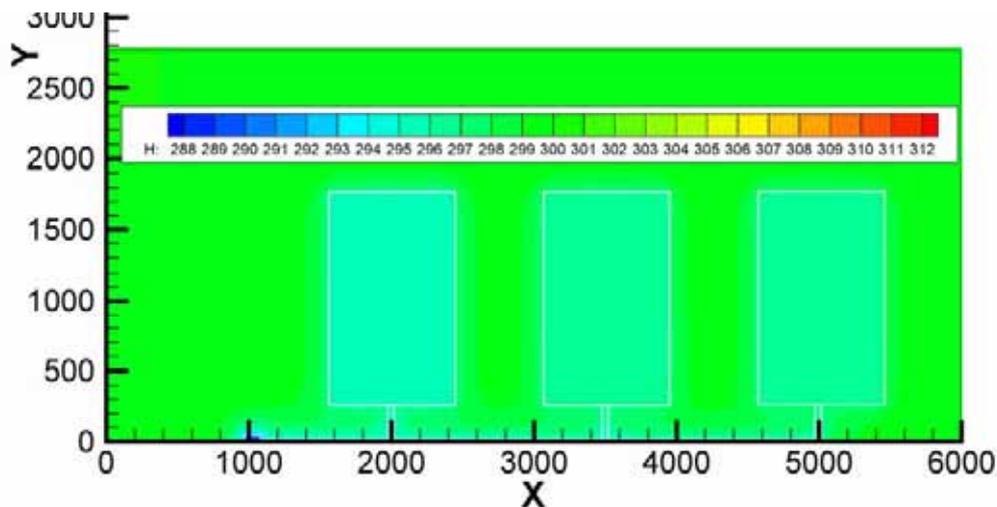


Figure 7.2-10

SEA défaut de scellements - Coupe horizontale traversant le stockage – Piézométrie dans la zone de stockage de combustibles usés CUI - tous scellements défailants (H = charge hydraulique en mètres NGF⁷¹)

Par ailleurs, la perte de charge au niveau du scellement de puits et la perméabilité des coupures hydrauliques dégradées concourent toutes deux à accroître les circulations d'eau dans le stockage. Le débit d'eau sortant du puits est également plus important (de l'ordre de 2,4 m³/an) (voir Figure 7.2-11).

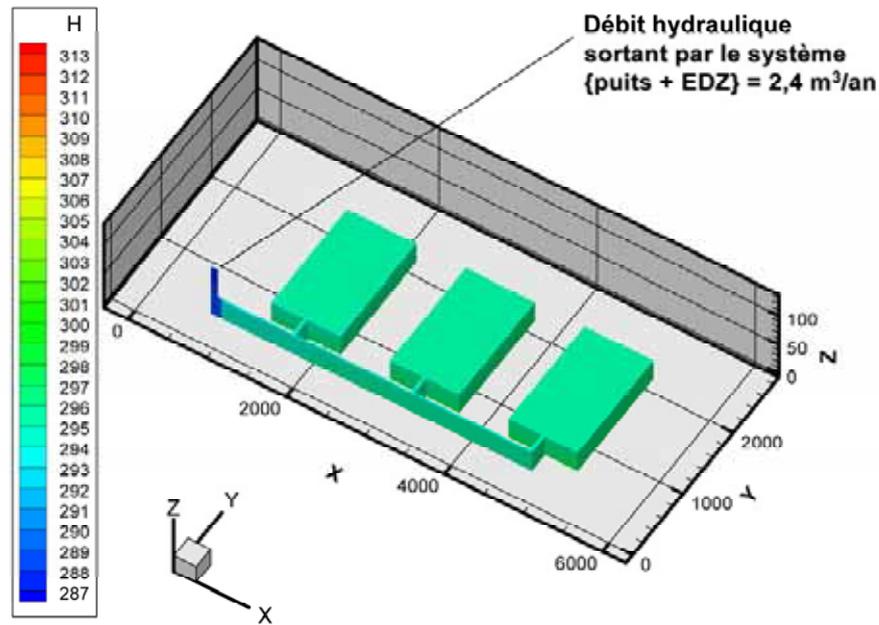


Figure 7.2-11

SEA défaut de scellements - Colis type CU1 - débit hydraulique sortant des ouvrages d'accès - situation « tous scellements défailants » - calcul de référence

● **Effet sur la fonction « retarder et atténuer le flux de radionucléides »**

L'analyse qui précède a mis en évidence que, malgré la défaillance de scellements, le transport reste diffusif (ou en codominance diffusive convective) au niveau des alvéoles et dans les galeries d'accès aux alvéoles. Néanmoins, dans le reste du stockage, la défaillance des scellements envisagée dans les différents cas de calcul présentés engendre un accroissement des cinétiques convectives ; ce phénomène contribue à accélérer le transfert des radionucléides dans les ouvrages depuis les colis jusqu'au toit du stockage.

Il convient alors d'évaluer l'effet des différents types de défauts de scellements sur le confinement des radionucléides et plus particulièrement sur la capacité du stockage et du milieu géologique à retarder et atténuer la migration des radionucléides.

En cas de défaut de scellements et une fois relâchés par les colis, les radionucléides migrent dans le corps ou le bouchon de l'alvéole. L'activité qui atteint finalement les puits est fonction de :

- l'activité initiale présente dans les colis ;
- la répartition entre les voies de transfert au niveau de l'alvéole elle-même (Voir Figure 7.2-12) ; Une fraction de l'activité suit une trajectoire à composante horizontale (voie 2) avant d'atteindre les galeries d'accès, l'autre suit une trajectoire à composante verticale (voie 1) avant d'atteindre et de rester dans le Callovo-Oxfordien. La répartition entre ces deux voies de transfert dépend, entre autres, de l'aptitude des radionucléides à se sorber dans la formation hôte et dans les ouvrages. Dans la mesure où le régime de transport reste diffusif (ou en co-dominance diffusive/convective) au niveau de l'alvéole, la répartition entre les voies de transfert est comparable à celle observée en SEN ;

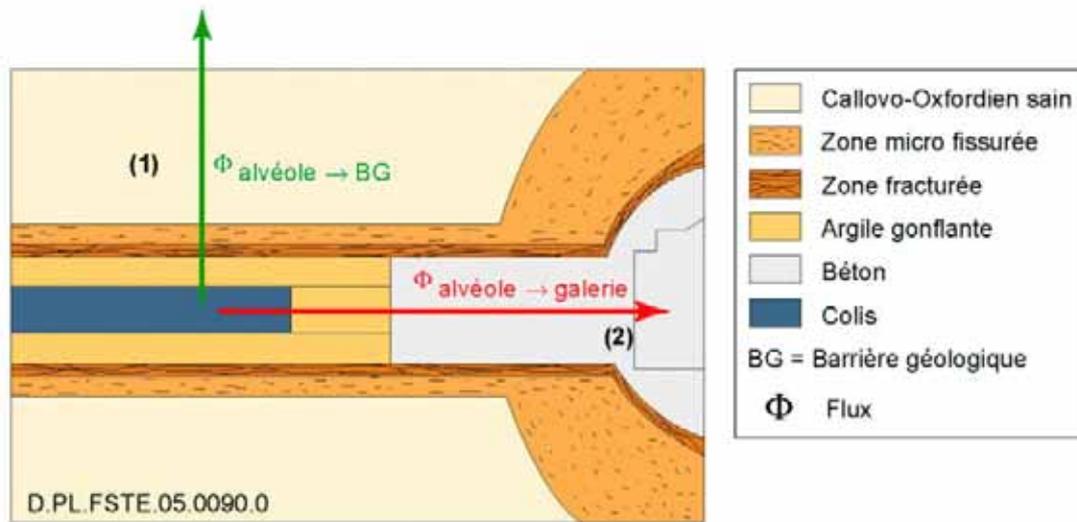


Figure 7.2-12 SEA défaut de scellements - Voies de transfert dans le cas des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés

- l'aptitude des radionucléides qui ont atteint les galeries d'accès à migrer et rester confinés dans celles-ci. En effet, le flux de radionucléides qui migrent dans les galeries peut être atténué entre la sortie de l'alvéole et du puits du fait d'une migration par diffusion dans le Callovo-Oxfordien depuis les galeries et/ou de la décroissance radioactive des radionucléides (voir Figure 7.2-13).

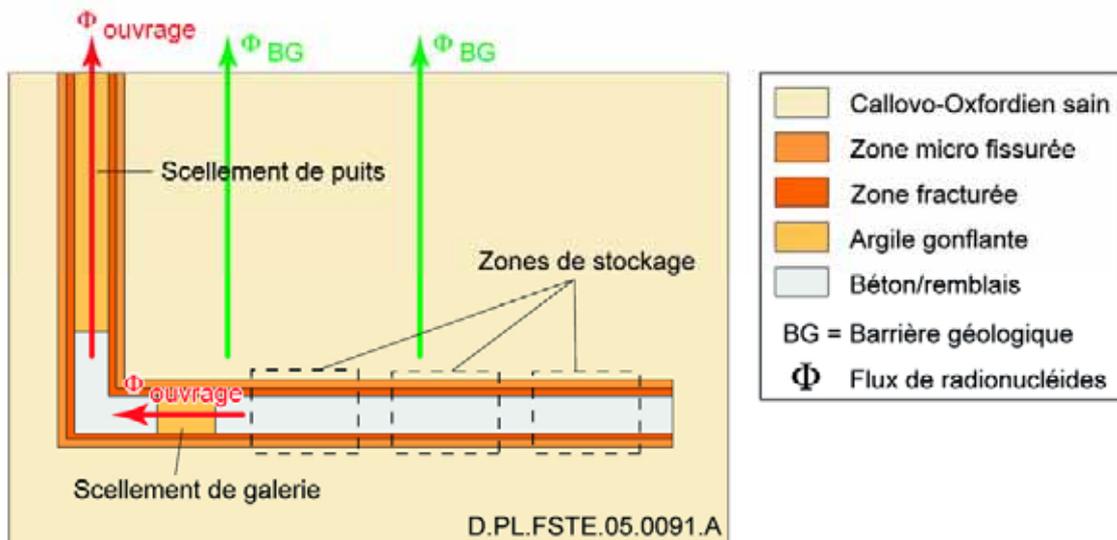
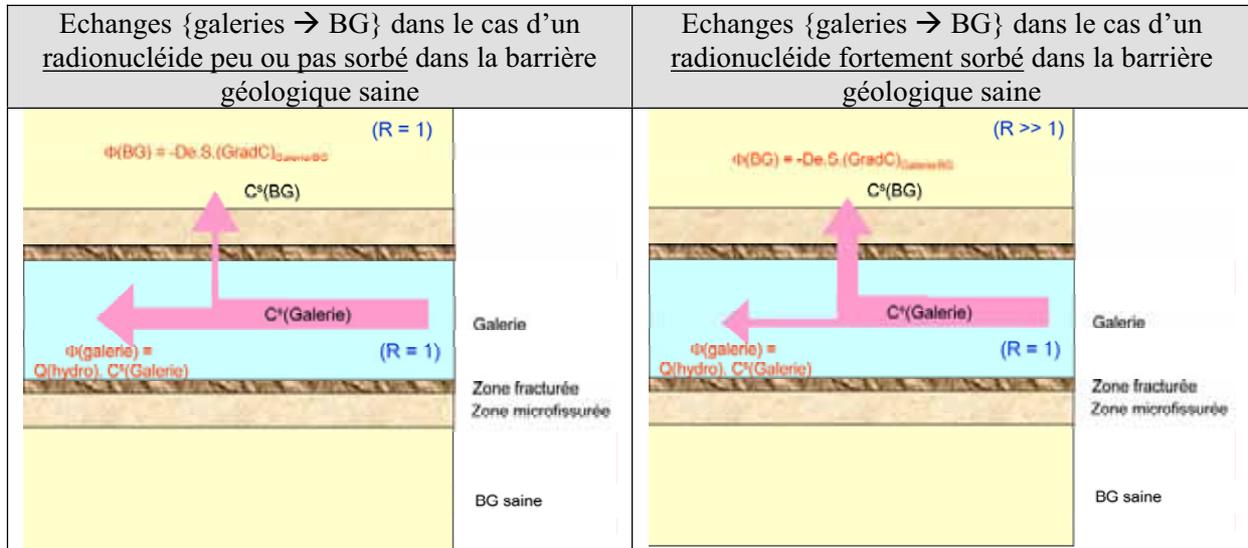


Figure 7.2-13 SEA défaut de scellements - Voies de transfert potentielles en cas de défaut de scellements

L'évaluation menée met en évidence que la plupart des radionucléides présents initialement dans les colis bénéficient de la décroissance radioactive dans les galeries compte tenu des cinétiques de transfert lentes et/ou migrent dans le Callovo-Oxfordien avant d'atteindre la sortie de la zone de stockage de combustibles usés. En effet, pour toutes les situations, les radionucléides à vie longue dont la sorption dans la barrière géologique est significative (^{59}Ni , ^{107}Pd , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{10}Be , ^{41}Ca , ^{135}Cs ... et tous les actinides) présentent un débit molaire en sortie de zone de stockage très faible, voire nul. Les centaines de mètres de galeries au sein de la zone, dans lesquels la convection est lente, favorisent les échanges avec la barrière géologique. Celle-ci joue un rôle de « barrière absorbante » (voir Figure

7.2-14). En outre, le débit molaire des radionucléides à vie moyenne et peu ou pas sorbés dans la barrière géologique (^{93}Mo) est presque totalement atténué en sortie de sous-zone de stockage du fait de la décroissance radioactive. Aussi, en sortie de zone, seuls le ^{14}C , le ^{36}Cl , le ^{79}Se et l' ^{129}I présentent un débit molaire non négligeable. L'analyse qui suit porte sur ces quatre radionucléides.



Avec : R = coefficient de retard ($R = 1$ dans la galerie pour tous les radionucléides), BG = barrière géologique
 De : coefficient de diffusion dans la barrière géologique saine
 $C^s(BG)$: concentration en solution dans la barrière géologique
 $C^s(\text{Galerie})$: concentration en solution dans la galerie
 $\Phi(BG)$: flux de radionucléides entrant dans la barrière géologique saine
 $\Phi(\text{Galerie})$: flux transitant dans la galerie remblayée
 $Q(\text{hydro})$ = débit hydraulique circulant dans les galeries
 S = surface d'échange
 $(\text{GradC})_{\text{Galerie/BG}}$: gradient de concentration en solution entre la galerie et la barrière géologique saine

Figure 7.2-14 *SEA défaut de scellements - Echanges depuis la galerie vers la barrière géologique dans le cas de radionucléides non sorbés et fortement sorbés dans la barrière géologique*

Au niveau de l'alvéole

Comme vu précédemment, la répartition de la masse de radionucléides entre la trajectoire à composante verticale et celle à composante horizontale est liée aux propriétés de rétention des radionucléides dans la formation hôte et, pour les alvéoles de combustibles usés, dans la barrière ouvragée.

Les principales caractéristiques intrinsèques des éléments qui interviennent dans le transfert des radionucléides sont présentées dans le chapitre 5. On rappelle dans le Tableau 7.2-6, les caractéristiques de sorption et la constante de décroissance radioactive des quatre radionucléides étudiés plus précisément.

Radionucléides	Période de décroissance radioactive [ans]	Barrière géologique		Barrière ouvragée	
		Coefficient de Retard [-]	Solubilité [mol/m ³]	Coefficient de Retard [-]	Solubilité [mol/m ³]
³⁶ Cl	302 000	1	Soluble	1	Soluble
⁷⁹ Se	65 000	1	5.10 ⁻⁷	1	5.10 ⁻⁷
¹²⁹ I	15 700 000	1	Soluble	1	Soluble
¹⁴ C	5 730	6	2,3	1	2,3

Tableau 7.2-6 *SEA défaut de scellements - Caractéristiques de rétention chimique des radionucléides mobilisées dans le Callovo-Oxfordien et dans les composants en argile gonflante pour les radionucléides contribuant à l'impact en SEA défaut de scellements*

La répartition de la masse émise par les colis dans le champ proche de l'alvéole est détaillée dans le Tableau 7.2-7. Sont fournis, à l'échéance du million d'années :

- le pourcentage de la masse qui traverse les premiers mètres de barrière géologique et qui reste dans cette dernière, par rapport à la masse totale initiale de la zone de stockage,
- le pourcentage de la masse qui entre dans la galerie, par rapport à la masse totale initiale contenue dans la sous-zone de stockage,
- le cumul des deux.

Radionucléides	Masse sortant du champ proche de l'alvéole ("entrant et restant dans la formation hôte" + "entrant dans la galerie")	Répartition du relâchement des alvéoles	
		Masse « entrant et restant dans la formation hôte » (voie 1 - Figure 7.2-12)	Masse « Entrant dans la galerie » (voie 2 - Figure 7.2-2)
¹²⁹ I	100,00 %	41%	59 %
³⁶ Cl	89 %	32 %	47 %
¹⁴ C	12 %	8 %	4 %
⁷⁹ Se	0,29 %	0,17 %	0,12 %

Tableau 7.2-7 *SEA défaut de scellements - Répartition des voies de transfert en champ proche de l'alvéole intégrées à un million d'années – colis-type CUI*

Ces résultats mettent en évidence que :

- l'iode 129 et le chlore 36, radionucléides à vie longue, solubles, non ou très faiblement sorbés dans la formation hôte ou la bentonite sortent en totalité ou quasi-totalité de l'alvéole à l'échelle du million d'années. Dans ce cas, l'atténuation de la masse dans le champ proche est très faible, voire nulle. La masse émise par les colis atteint préférentiellement les galeries en migrant par diffusion dans les ouvrages situés entre les colis et la galerie d'accès (59 % entrant dans la galerie contre 41 % entrant dans le Callovo-Oxfordien pour l'iode 129). Il est à noter que les conditions aux limites choisies (concentration nulle au droit du bouchon) tendent à favoriser la migration à l'horizontale pour tous les radionucléides, la quantité d'iode 129 entrant dans la galerie est donc probablement surestimée ;
- le carbone 14, radionucléide à vie moyenne faiblement sorbé dans le Callovo-Oxfordien, bénéficie de la décroissance radioactive et reste confiné pour l'essentiel (au minimum 80 %) dans le champ proche de l'alvéole. Cet élément, étant de plus légèrement sorbé dans la barrière géologique, migre préférentiellement dans cette dernière ;

- le sélénium 79, non sorbé mais précipitant dans le champ proche, présente un débit d'activité fortement atténué en sortie d'alvéole. Cette atténuation se répercute sur la masse sortant du champ proche de l'alvéole.

Cette répartition est valable pour l'ensemble des situations traitées pour les combustibles usés CUI dans la mesure où le système reste diffusif dans les galeries d'accès et au niveau des alvéoles dans toutes les situations envisagées.

Transfert jusqu'au puits

La démarche consiste à évaluer quelle est la fraction d'activité qui atteint le puits par rapport à l'inventaire total de la zone de stockage. Comme vu précédemment, la quantité d'activité qui atteint le puits est étroitement liée :

- au temps de transfert des radionucléides dans les ouvrages depuis les colis jusqu'au puits. En effet, plus les temps de transfert dans les ouvrages sont longs, plus les radionucléides bénéficient de la décroissance radioactive avant d'atteindre le puits. Par ailleurs, plus la masse transite lentement dans les ouvrages, plus elle a tendance à migrer par diffusion dans le Callovo-Oxfordien depuis les galeries ;
- à l'aptitude des radionucléides à se sorber dans la barrière géologique.

Du Tableau 7.2-8 au Tableau 7.2-12, on présente la répartition des voies de transfert pour les quatre cas de défaillances traités et pour l'évolution normale, des alvéoles jusqu'au puits, sur un million d'années.

	Alvéole		Zone de stockage Efficacité des scellements de zones		Ouvrages d'accès Efficacité des scellements de puits	
	<i>entrant dans les galeries</i>	<i>entrant dans le Callovo-Oxfordien sain</i>	<i>sortie sous-zone de stockage soit « avant scellements de zone »</i>	<i>sortie scellements de zone</i>	<i>sortie scellements de galeries de liaison principales</i>	<i>sortie {puits + EDZ}</i>
¹⁴ C	4%	8%	0,000006%	0,0000001%	nul	nul
³⁶ Cl	46%	32%	0,0092%	0,0011%	0,00017%	0,00014%
¹²⁹ I	59%	41%	0,015%	0,0022%	0,00055%	0,00048%
⁷⁹ Se	0,12%	0,17%	0,000013%	0,0000008%	0,000000033%	0,000000023%

Tableau 7.2-8

SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – scellements de puits défaillants colis type CUI

	Alvéole		Zone de stockage Efficacité des scellements de zones		Ouvrages d'accès Efficacité des scellements de puits	
	entrant dans les galeries	entrant dans le Callovo-Oxfordien sain	sortie sous-zone de stockage soit « avant scellements de zone »	sortie scellements de zone	sortie scellements de galeries de liaison principales	sortie {puits + EDZ}
¹⁴ C	4%	8%	0,000007%	0,00000000%	nul	nul
³⁶ Cl	46%	32%	0,0106%	0,0010%	0,00011%	0,00008%
¹²⁹ I	59%	41%	0,017%	0,0021%	0,00038%	0,00030%
⁷⁹ Se	0,12%	0,17%	0,000014%	0,0000007%	0,000000015%	0,000000008%

Tableau 7.2-9 SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – scellements de galerie défailants - colis type CUI

	Alvéole		Zone de stockage Efficacité des scellements de zones		Ouvrages d'accès Efficacité des scellements de puits	
	entrant dans les galeries	entrant dans le Callovo-Oxfordien sain	sortie sous-zone de stockage soit « avant scellements de zone »	sortie scellements de zone	sortie scellements de galeries de liaison principales	sortie {puits + EDZ}
¹⁴ C	4%	8%	0,000032%	0,00000053%	nul	nul
³⁶ Cl	47%	32%	0,033%	0,011%	0,005%	0,004%
¹²⁹ I	59%	41%	0,056%	0,022%	0,012%	0,011%
⁷⁹ Se	0,12%	0,17%	0,000042%	0,000001%	0,0000019%	0,0000016%

Tableau 7.2-10 SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – tous scellements défailants - colis type CUI

	Alvéole		Zone de stockage Efficacité des scellements de zones		Ouvrages d'accès Efficacité des scellements de puits	
	entrant dans les galeries	entrant dans le Callovo-Oxfordien sain	sortie sous-zone de stockage soit « avant scellements de zone »	sortie scellements de zone	sortie scellements de galeries de liaison principales	sortie {puits + EDZ}
¹⁴ C	4%	8%	0,000006%	0,00000003%	nul	nul
³⁶ Cl	46%	32%	0,0092%	0,0011%	0,00019%	0,00017%
¹²⁹ I	59%	41%	0,015%	0,0024%	0,00061%	0,00055%
⁷⁹ Se	0,12%	0,17%	0,000013%	0,0000009%	0,000000039%	0,000000028%

Tableau 7.2-11 SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – abandon du puits - colis type CUI

	Alvéole		Zone de stockage		Ouvrages d'accès	
	<i>entrant dans les galeries</i>	<i>entrant dans le Callovo-Oxfordien sain</i>	<i>sortie sous-zone de stockage soit « avant scellements de zone »</i>	<i>sortie scellements de zone</i>	<i>sortie scellements de galeries de liaison principales</i>	<i>sortie {puits + EDZ}</i>
¹⁴ C	4%	8%	0,000003%	nul	nul	nul
³⁶ Cl	46%	32%	0,0045%	0,0002%	0,00001%	0,00001%
¹²⁹ I	59%	41%	0,007%	0,0005%	0,00005%	0,00003%
⁷⁹ Se	0,12%	0,17%	0,000006%	0,00000014%	0,000000001%	nul

Tableau 7.2-12 *SEA défaut de scellements - Pour mémoire : répartition et quantification des différentes voies de transfert - tous scellements efficaces (SEN) - colis type CUI*

On note qu'au niveau des sous-zones de stockage :

- les cinétiques convectives très lentes dans les galeries (de l'ordre de 3.10^{-3} m/s au maximum dans les galeries de liaison secondaires en situation « tous scellements défailants ») favorisent les échanges avec la barrière géologique. Ainsi, l'essentiel de la masse sortant de la sous-zone provient du module de stockage le plus proche des galeries principales ;
- pour tous les radionucléides, le débit molaire sortant de la zone de stockage est très atténué : dans la situation la plus pénalisante, seulement 0,06 % de l'inventaire de l'iode 129 et 0,03 % de l'inventaire de chlore 36 sont sortis de la sous-zone de stockage par les puits, au bout d'un million d'années.

En ce qui concerne les radionucléides présentant un débit non négligeable en sortie de puits, on note que :

- l'iode 129 et le chlore 36 présentent la fraction d'activité atteignant le toit du Callovo-Oxfordien la plus importante. La fraction d'activité de l'iode 129 atteignant le puits est plus importante que celle de ³⁶Cl car ce dernier bénéficie de la décroissance radioactive. Le pourcentage de la masse d'iode 129 atteignant le puits par rapport à la masse présente initialement dans la zone de stockage, varie de 0,011 % lorsque tous les scellements sont défailants à 0,0003 % lorsque seuls les scellements de galeries sont défailants (voir Figure 7.2-15). En SEN, ce pourcentage est encore 10 fois plus faible (0,00003 %). L'efficacité des coupures hydrauliques permet de réduire d'un ordre de grandeur la quantité d'iode 129 qui sort du puits sur 1 million d'années ;

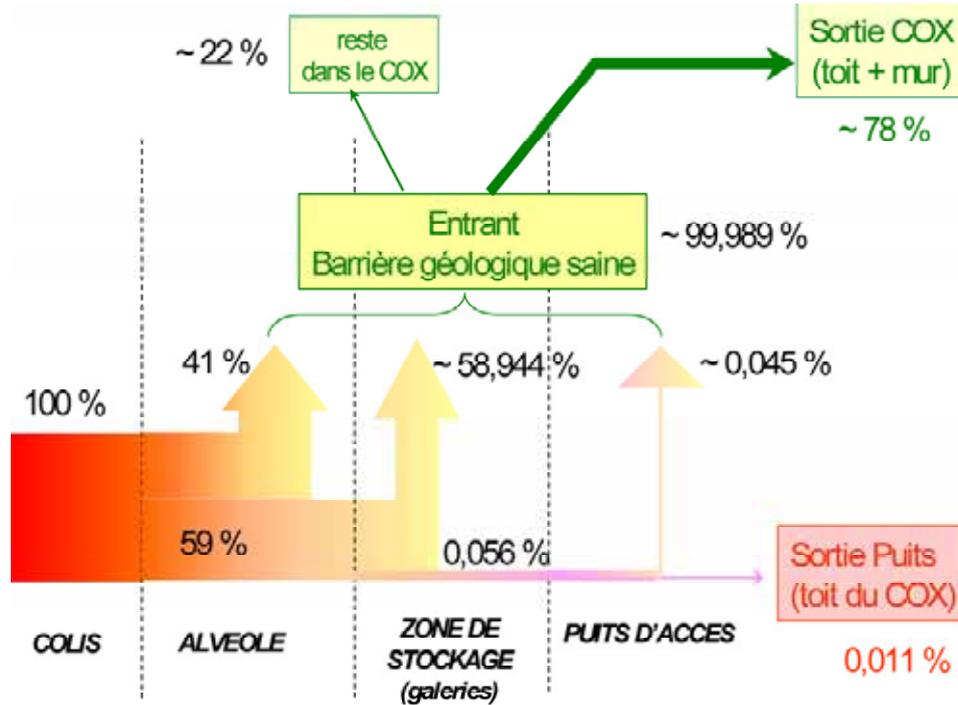


Figure 7.2-15

SEA défaut de scellements - Répartition des voies de transfert intégrées à un million d'années - situation de tous scellements défailants - ^{129}I - colis types CU1

- le carbone 14 soluble présente une masse très fortement atténuée en sortie de zone de stockage pour toutes les situations. D'une part, son aptitude à se sorber dans la formation hôte favorise sa migration depuis les galeries vers la formation hôte, d'autre part, sa période de décroissance radioactive est suffisamment courte devant le temps de transfert dans les ouvrages pour qu'il puisse bénéficier de la décroissance radioactive. Dans toutes les situations, la masse de carbone 14 est totalement atténuée en sortie de scellements de galerie de liaison principale ;
- le sélénium 79 est fortement limité par sa solubilité, induisant une faible contribution en sortie de puits. Par ailleurs, sa période est suffisamment courte devant les temps de transfert pour qu'il puisse commencer à bénéficier de la décroissance radioactive.

La Figure 7.2-16 présente les débits molaires en différents emplacements du stockage, dans le cas de l'iode 129 des CU1 et pour les quatre cas de calculs. Comme pour le SEN, on note l'influence du colis défailant, très visible au niveau du relâchement dans l'alvéole, et de plus en plus estompée au fur et à mesure que l'on s'en éloigne.

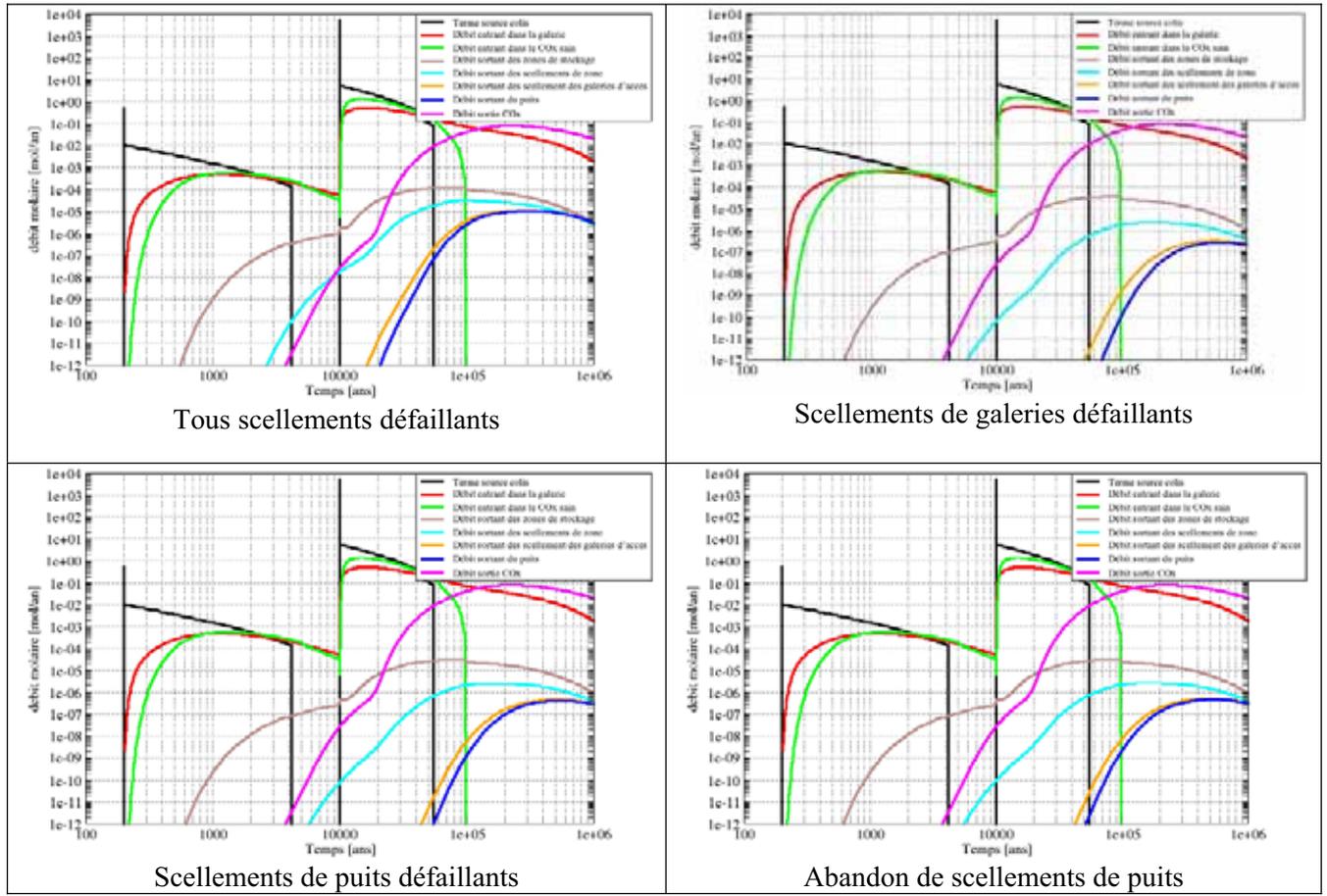


Figure 7.2-16 SEA défaut de scellements - toute situation de défaillance – historique de débit molaire - calcul de référence : colis type CUI-¹²⁹I

● Rôle relatif des différents scellements

La comparaison des temps d'apparition de l'iode 129 en sortie de zone de stockage et à la sortie du puits, détaillés dans le Tableau 7.2-13, ainsi que les atténuations de la masse, permettent d'évaluer le gain associé à chacun des types de scellements en terme de temps de transfert et de masse atténuée. Ainsi on montre que :

- la défaillance des scellements de puits ou leur absence fait que les maxima de débit molaire en sortie de puits apparaissent environ 300 000 ans plus tôt par rapport au SEN et sont supérieurs d'un facteur 15 à 20. La charge des encaissants sus-jacents qui se transmet à la base du puits engendre des gradients horizontaux qui accélèrent les cinétiques convectives. Les deux situations (absence ou défaillance des scellements de puits) sont néanmoins relativement équivalentes du point de vue de l'hydraulique du stockage et de la migration des radionucléides ;
- la perte des scellements de galeries fait que les maxima de débit molaire en sortie de puits apparaissent environ 200 000 ans plus tôt par rapport au SEN et ils sont supérieurs d'un facteur 10. Cette situation permet de mettre en évidence que l'efficacité des scellements de galerie fait bénéficier d'une atténuation et d'un retard significatifs.

Ces deux situations diffèrent peu dans la mesure où les scellements de puits ou de galeries sont en redondance les uns des autres. La défaillance d'un type de scellement est partiellement compensée par l'efficacité de l'autre type.

La perte de l'ensemble des scellements engendre un rapprochement des dates d'apparition des maxima de débit molaire en sortie de puits de l'ordre de 500 000 ans par rapport au SEN et les débits molaires correspondant sont supérieurs d'un facteur 400.

	Temps d'apparition des maxima de débit molaire en sortie de zone [ans]	Temps d'apparition des maxima de débit molaire en sortie de puits [ans]
Tous scellements défaillants	80 000	320 000
Scellement de puits défaillants	83 000	550 000
Abandon du puits	83 000	540 000
Scellements de galerie défaillant	83 000	610 000
Tous scellements efficaces	100 000	800 000

Tableau 7.2-13 *SEA défaut de scellements - Temps d'apparition des maxima de débit molaire en sortie de zone et sortie de puits pour toutes les situations de défaillances et le SEN – combustibles usés CU1*

Notons néanmoins que, pour toutes les situations, le débit molaire des radionucléides sortant du puits est inférieur de plusieurs ordres de grandeurs (facteur 10 000 pour l'iode 129 au minimum dans la situation de défaillance de l'ensemble des scellements) au débit molaire transitant par la formation hôte. Compte tenu en particulier des performances hydrauliques de la barrière géologique et de l'EDZ associée, même dans une situation de défaillance tous les scellements du stockage, la voie de transfert prépondérante reste celle par la barrière géologique saine pour la totalité des radionucléides.

7.2.3.2 Combustibles usés CU2

L'hydraulique dans le cas des combustibles usés CU2 est identique à celle traitée pour les combustibles CU1. Les commentaires relatifs aux parties transport (atténuations, débits molaires) sont qualitativement similaires à celles du colis type CU1. Seuls les résultats de l'impact diffèrent et sont présentés au paragraphe 7.2.4.2.

7.2.3.3 Déchets C

Les résultats associés aux déchets C (voir Figure 7.2-17) sont qualitativement similaires à ceux des combustibles usés CU1. Néanmoins, les zones de stockage associées au scénario de gestion des combustibles usés S1b (retenu pour l'étude des colis types C1/C2), et par conséquent la surface d'échange avec le Callovo-Oxfordien, étant plus limitée que celles des combustibles usés CU1 (étudiés dans le cadre du scénario de gestion S2), l'apport d'eau du Callovo-Oxfordien dans le stockage est également plus faible. La perte de charges engendrée par la défaillance des scellements est alors plus importante pour les déchets C que pour les combustibles usés, mais les débits plus faibles.

Pour la situation la plus pénalisante de défaillance de tous les scellements, la perte de charges est de l'ordre de 5 mètres pour les colis types C1/C2 et de 6 mètres pour les colis type C3/C4⁹¹. Les débits d'eau sortant des puits sont plus faibles que ceux évalués pour les combustibles usés CU1 dans la même situation.

⁹¹ Cette faible différence est en fait un artéfact lié à la configuration du stockage selon l'inventaire pris en compte : les transferts dans les zones de déchets C1/C2 sont calculés sur la base du scénario de production de déchets S1b du MID, car c'est dans ce scénario qu'ils sont en nombre le plus important. Dans ce scénario de production, les combustibles MOX ne sont pas retraités, et une zone de stockage est dédiée aux combustibles usés correspondants. C'est l'influence hydraulique de cette zone qui contribue à diminuer la perte de charge. Elle est absente dans le cas des déchets C3/C4, qui eux sont supposés stockés dans le cadre d'un scénario de gestion conduisant au retraitement des MOX.

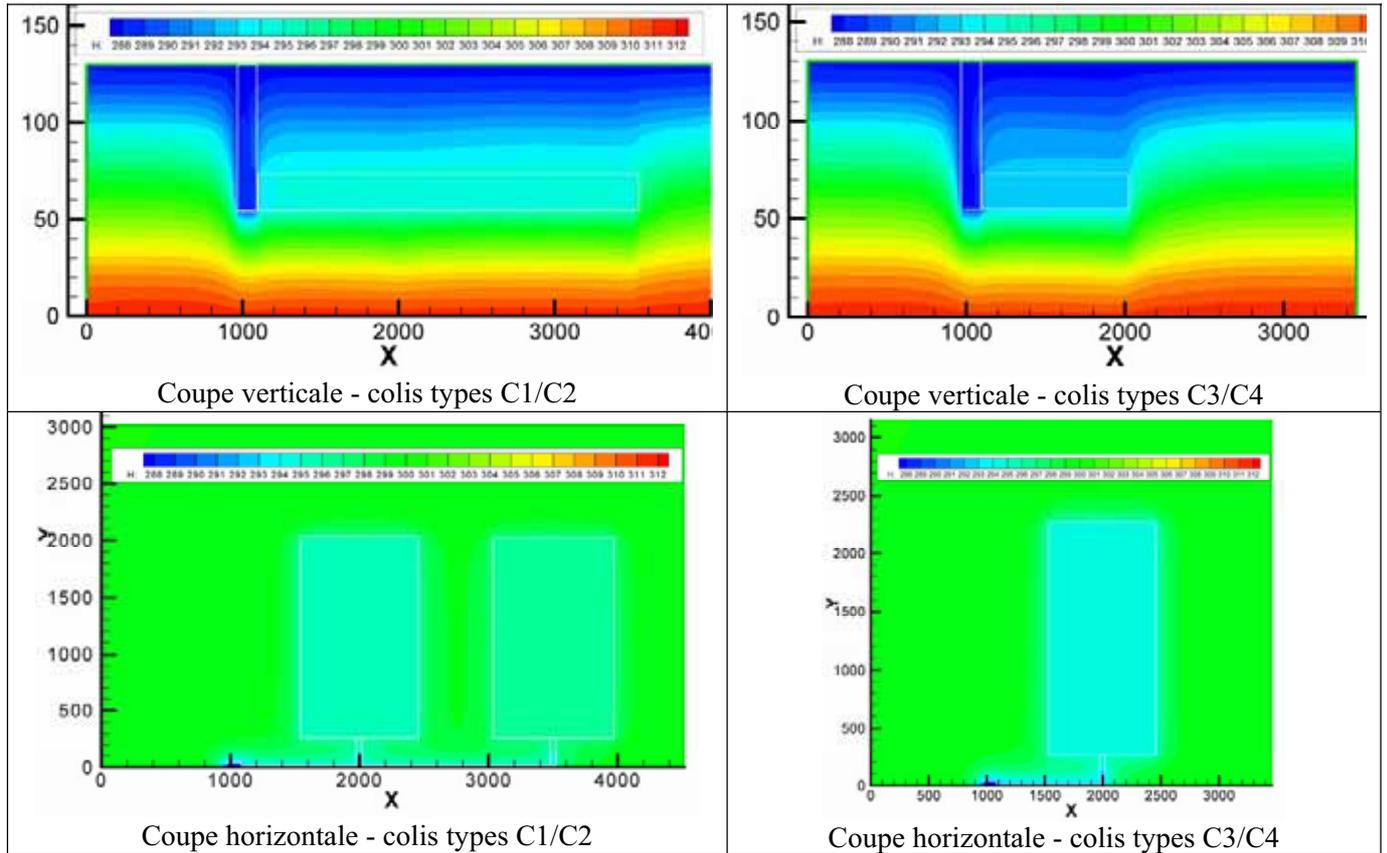


Figure 7.2-17 SEA défaut de scellements - Coupe verticale et horizontale traversant les ouvrages et le puits – piézométrie (en mètres NGF⁷¹) - colis types C1/C2 et C3/C4 – tous scellements défailants

Dans la situation de défaillance de tous les scellements, les temps de transfert convectifs sont de l'ordre de 150 000 ans depuis la sortie de la zone de stockage jusqu'aux puits, pour les colis types C1/C2 et les colis types C3/C4.

La Figure 7.2-18 présentent les historiques de débit molaire en différents emplacements du stockage, dans le cas des colis types C1/C2, pour la situation de défaillance de l'ensemble des scellements et la situation de défaillance du scellement de puits. Comme pour le SEN, on note l'influence du colis défailant, très visible au niveau du relâchement dans l'alvéole, et de plus en plus estompée au fur et à mesure que l'on s'en éloigne.

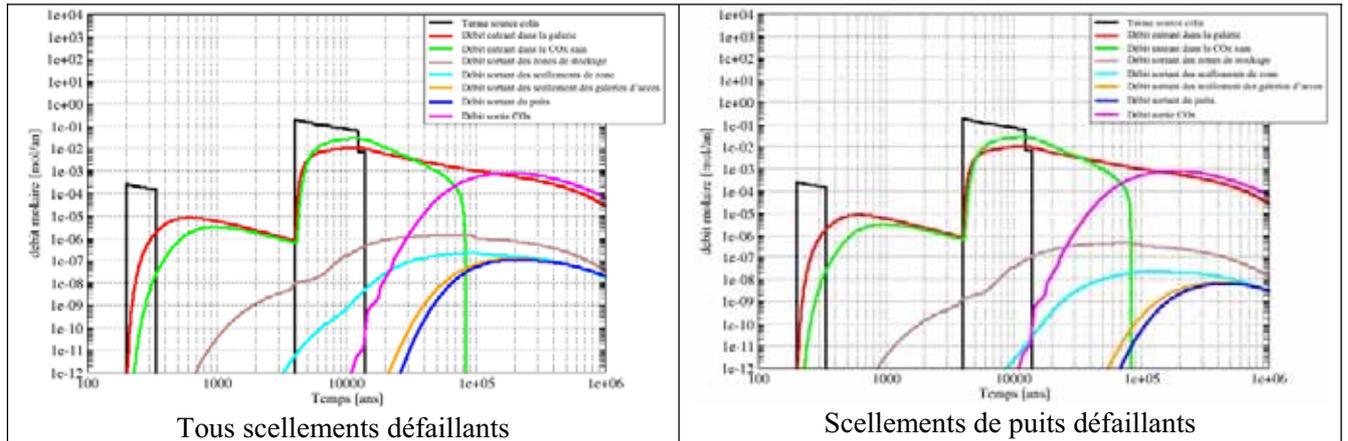


Figure 7.2-18 SEA défaut de scellements - situation de défaillance de tous les scellements – historique de débit molaire - calcul de référence - colis type C1/C2 - ¹²⁹I

7.2.3.4 Déchets B non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (stockés dans les alvéoles B1x)

On rappelle que les déchets B n'ont été traités que dans le cas du scénario enveloppe « tous scellements défailants ».

Pour les déchets B, la perte de charge engendrée par la défaillance de tous les scellements est significative (de l'ordre de 13 mètres). La quantité d'eau drainée par le stockage de déchets B est en revanche très faible comparée à celle qui est mobilisée dans le cas des combustibles usés. Cela s'explique par la faible extension de la zone de stockage correspondante. Les écoulements sont très lents ; de ce fait les temps de transfert sont très importants jusqu'au puits d'accès, favorisant les échanges avec la barrière géologique le long des galeries de liaison principales (voir Figure 7.2-19).

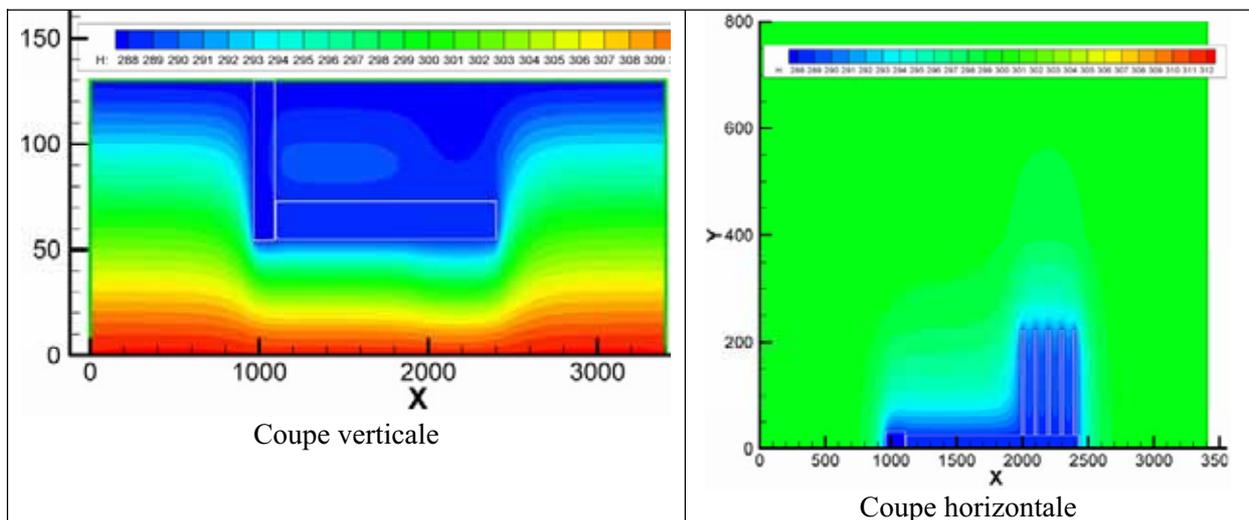


Figure 7.2-19 SEA défaut de scellements - Coupes verticale et horizontale traversant les ouvrages – Piézométrie au niveau des modules de déchets B accueillant les colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (alvéole type B1x) – Tous scellements défailants

Pour les déchets B, chaque alvéole de stockage correspond à un module de stockage. Dans ce cas, le transfert dans la zone de stockage est limité au strict transfert au niveau des alvéoles : la masse sortant de chacune d'elles par les ouvrages arrive directement dans les galeries de liaison principales. La Figure 7.2-20 confirme que le transport jusqu'aux puits d'accès est lent : les temps d'apparition des maxima de débit molaire sont effectivement très éloignés. Ils se situent aux alentours du million d'années pour l'iode 129 et vers 600 000 ans pour le chlore 36 qui commence sur ces durées à bénéficier de la décroissance radioactive.

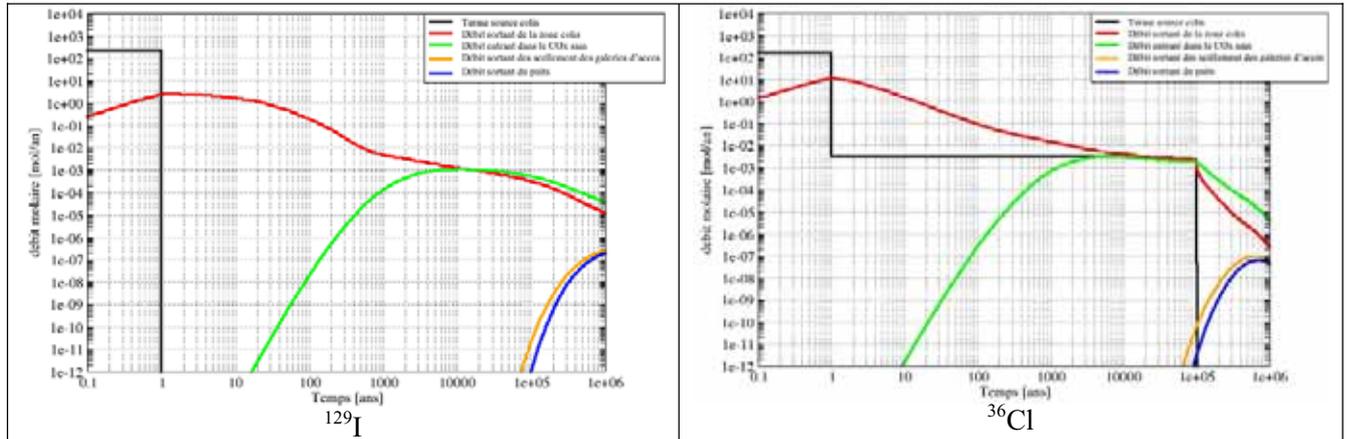


Figure 7.2-20

SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants : calcul de référence- Historique de débit molaire - colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène - ^{129}I et ^{36}Cl

7.2.4 Evaluation de l'impact

Par souci de simplification et pour assurer une bonne lisibilité des résultats, on ne présente ici que les impacts dans l'exutoire le plus pénalisant, c'est-à-dire l'exutoire « Saulx » du scénario d'évolution normale. On rappelle que l'impact résulte de deux chemins de migration des radionucléides :

- l'impact dû aux radionucléides qui ont transité à travers les ouvrages d'accès et les scellements défailants, et qui migrent ensuite dans les formations encaissantes ;
- l'impact dû aux radionucléides ayant transité par le Callovo-Oxfordien. Dans la mesure où la formation hôte reste comme on l'a vu, dans tous les cas de figure, le lieu de passage de la très grande majorité des radionucléides, cet impact est en fait le même qu'en scénario d'évolution normale (stricto sensu très légèrement inférieur, mais cette différence n'est pas identifiable dans le calcul).

Les deux impacts se révèlent dans les mêmes exutoires, mais les maxima sont susceptibles d'intervenir à des dates différentes. On verra que, en fait, l'impact dû à la fraction transitant par les ouvrages d'accès est dans tous les cas négligeable par rapport à la fraction passant par la formation hôte.

7.2.4.1 Combustibles usés CU1

La dose à l'exutoire Saulx associée à la fraction d'activité qui sort par le puits après avoir transité dans les ouvrages est dominée par l'iode 129 dans les quatre situations étudiées.

La situation la plus pénalisante correspond à celle où tous les scellements sont défailants avec un maximum de dose à 0,00001 mSv/an à 370 000 ans (associé à l'iode 129). L'impact du chlore 36 est nettement inférieur, avec une dose de l'ordre de 10^{-7} mSv/an. Tous les autres radionucléides ont un impact nul ou négligeable.

Pour les trois autres situations, le maximum de dose est extrêmement faible, compris entre 10^{-7} mSv/an et 10^{-6} mSv/an vers 600 000 ans.

Pour la situation la plus pénalisante de défaillance de l'ensemble des scellements, la dose due à la voie de transfert par les ouvrages reste nettement inférieure à celle due à la voie de transfert (0,00001 mSv/an contre 0,02mSv/an) pour l'iode 129 des combustibles usés CU1, avec des dates de maxima identiques. Les doses associées à la fraction d'activité qui migre par les ouvrages ainsi qu'à celle qui migre par la barrière géologique (identique pour toutes les situations et égales à celle du SEN) sont fournies ci après (voir Figure 7.2-21 à Figure 7.2-25)

● **Evaluation de l'impact pour la fraction d'activité qui sort par les puits : Scellements de puits défailants**

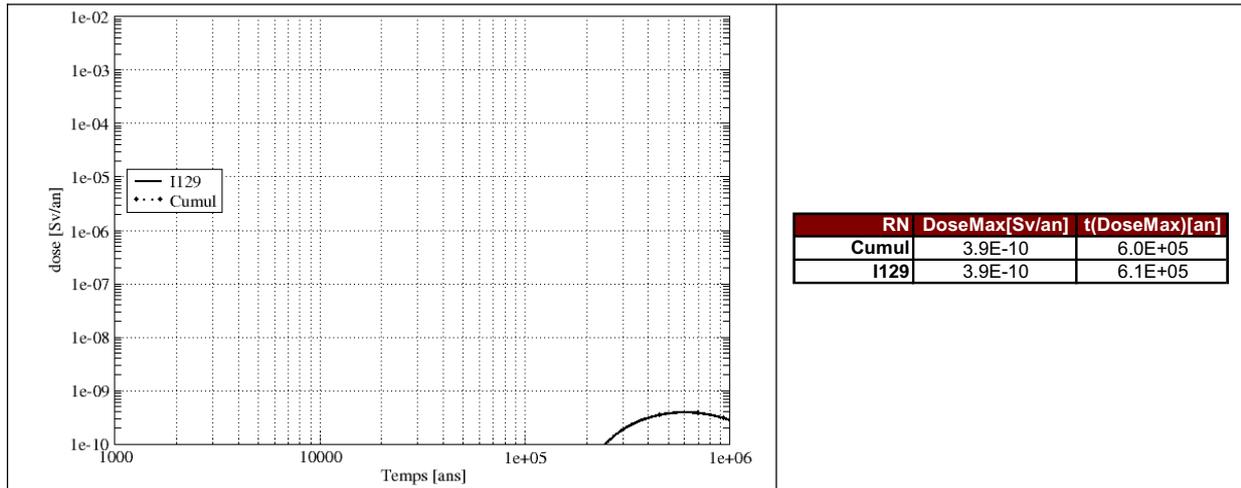


Figure 7.2-21 *SEA défaut de scellements - Scellements de puits défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU1*

● **Evaluation de l'impact pour la fraction d'activité qui sort par les puits : Scellements de galeries défailants**

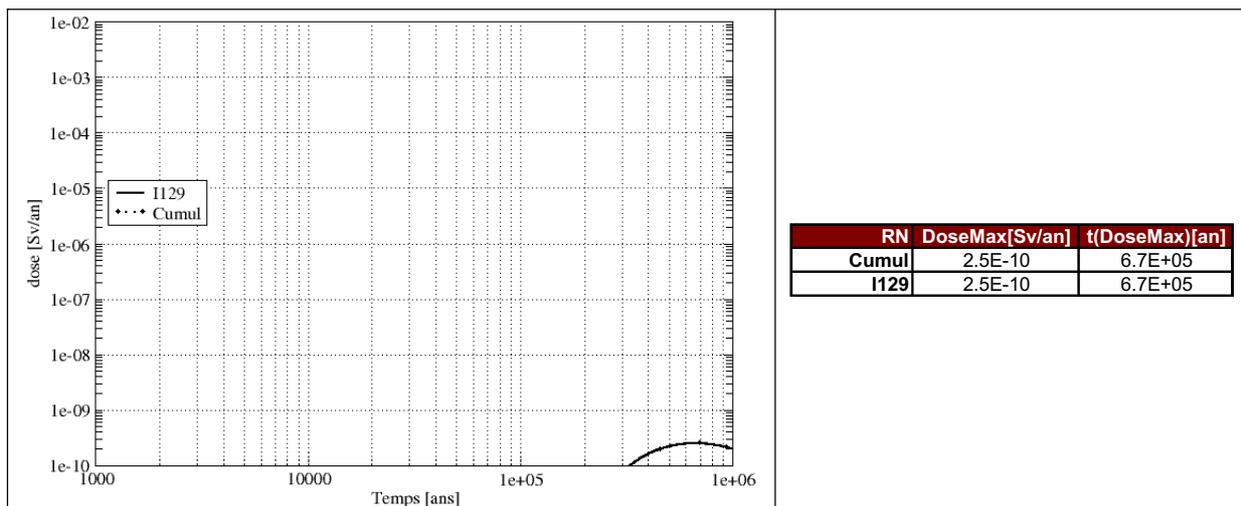


Figure 7.2-22 *SEA défaut de scellements - Scellements de Galeries défailant – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrage – colis type CU1*

● **Evaluation de l'impact pour la fraction d'activité qui sort par les puits : Tous scellements défaillants**

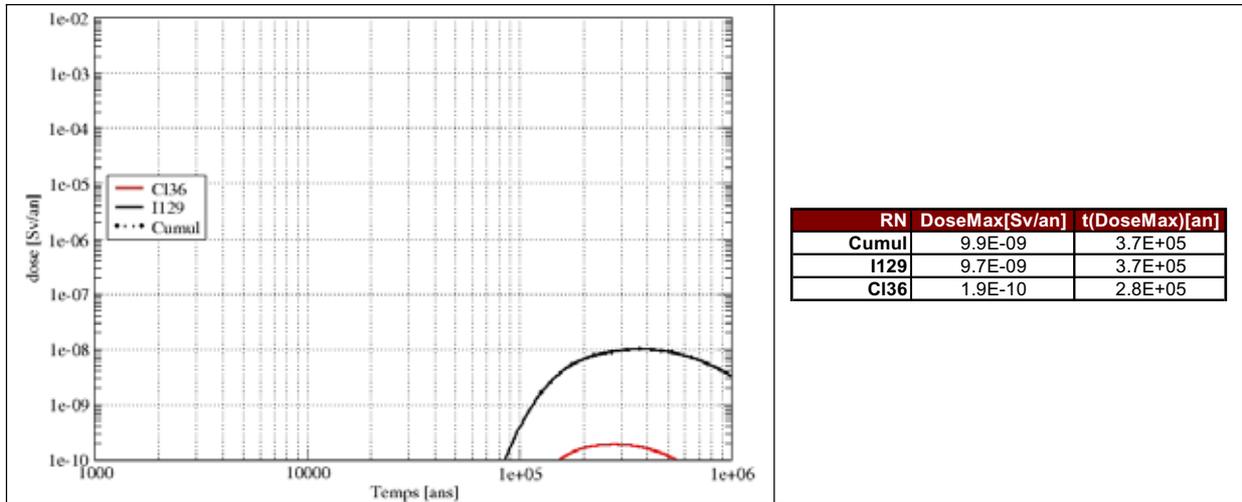


Figure 7.2-23 *SEA défaut de scellements - Tous scellements défaillants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CUI*

● **Evaluation de l'impact pour la fraction d'activité qui sort par les puits : Abandon du scellement de puits**

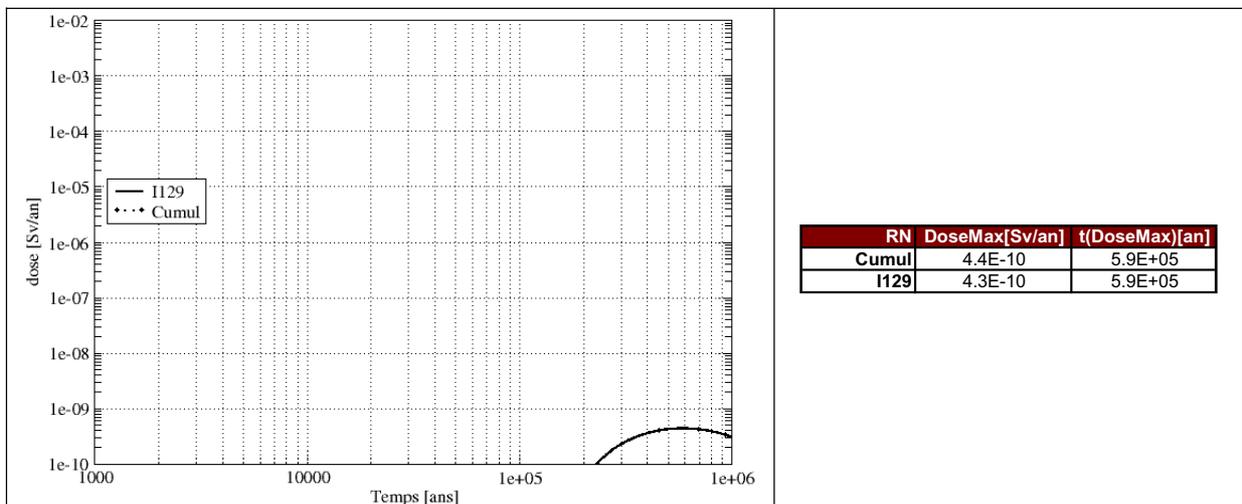


Figure 7.2-24 *SEA défaut de scellements – Abandon du scellement de puits – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CUI*

- **Evaluation de l'impact associé à la voie de transfert par la barrière géologique : tous cas de calcul**

La fraction de radionucléides transitant par les ouvrages étant minimale et ce, quelque soit le cas de calcul considéré, l'impact associé à la voie de transfert par la barrière géologique est le même qu'en SEN. On le rappelle ici pour mémoire. Dans la mesure où cet impact est supérieur à celui dû à la voie de transfert par les ouvrages, la dose maximale associée au SEA « défaut de scellements » est en fait la même que celle associée au SEN.

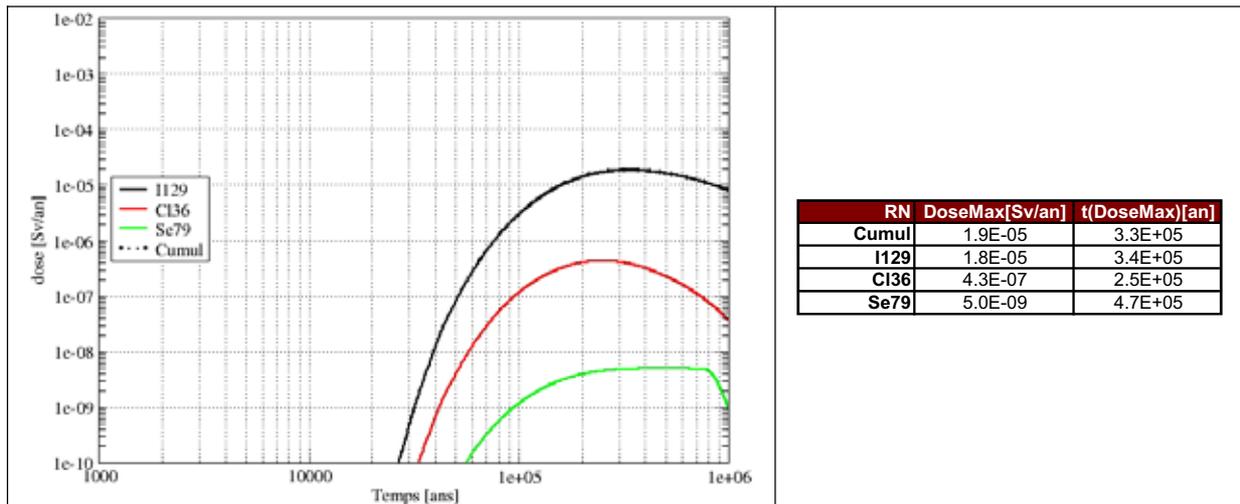


Figure 7.2-25 SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis type CU1

7.2.4.2 Combustibles usés CU2

- **Evaluation de l'impact pour la fraction d'activité qui sort par les puits**

Le principal contributeur à l'impact est également l'iode 129. Néanmoins l'impact associé aux combustibles usés CU2 est significativement plus faible que pour les CU1 du fait d'un inventaire en iode plus limité (un peu plus d'un ordre de grandeur).

Pour trois des quatre situations étudiées, la dose à l'exutoire Saulx associée à la fraction d'activité qui sort par les puits après avoir transité dans les ouvrages est inférieure ou égale à 10^{-7} mSv/an.

Pour la situation de défaillance de l'ensemble des scellements, la dose due à la voie de transfert par les ouvrages reste nettement inférieure à celle due à la voie de transfert par la barrière géologique saine ($1,7 \cdot 10^{-6}$ mSv/an contre 0,0017 mSv/an pour l'iode 129), avec des dates de maxima identiques vers 350 000 ans. Les doses associées à la fraction d'activité qui migre par les ouvrages ainsi qu'à celle qui migre par la barrière géologique (identique pour toutes les situations et égales à celle du SEN) sont fournies ci-après (voir Figure 7.2-26 et Figure 7.2-27), dès lors que l'impact est supérieur à 10^{-7} mSv/an (soit 10^{-10} Sv/an).

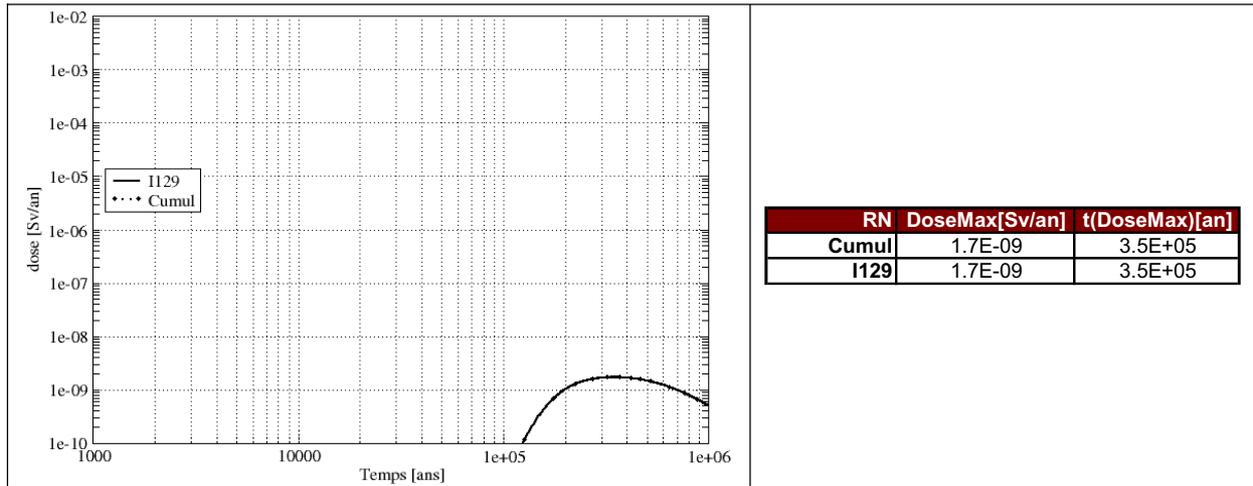


Figure 7.2-26

SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU2

● **Evaluation de l'impact associé à la voie de transfert par la barrière géologique : tous cas de calcul (pour mémoire, identique au SEN)**

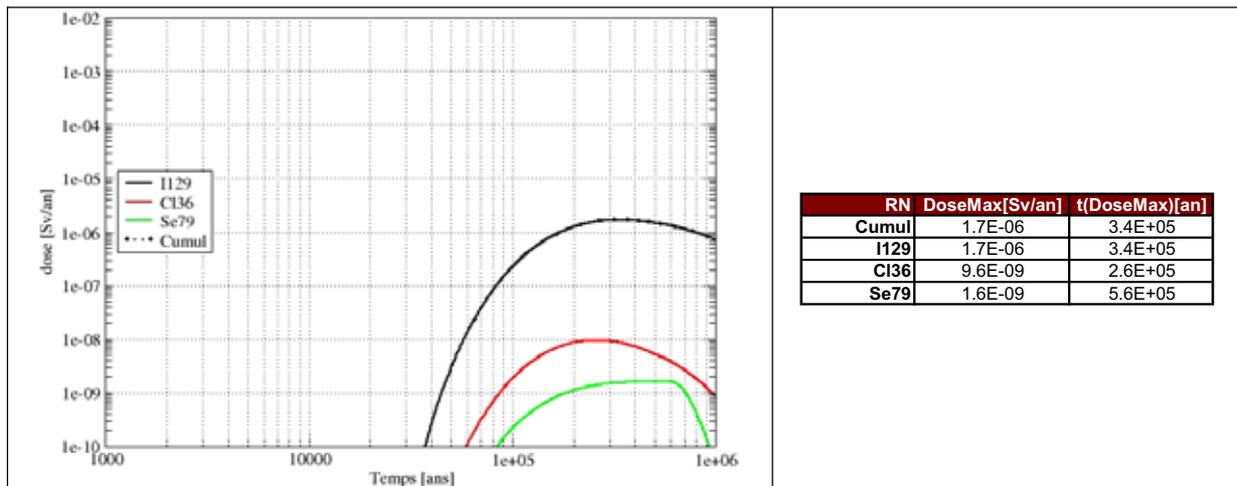


Figure 7.2-27

SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis type CU2

7.2.4.3 Colis types C1/C2

● **Evaluation de l'impact pour la fraction d'activité qui sort par les puits**

Pour les colis types C1/C2, seule la situation de défaillance de tous les scellements et celle de scellements de puits défailants ont été étudiées, cette seconde situation engendrant, pour la fraction d'activité qui migre par les ouvrages, des doses inférieures à 10^{-7} mSv/an.

Les deux principaux contributeurs à l'impact sont le chlore 36 et l'iode 129. Ces deux radionucléides contribuent pour les verres de façon quasi identique (le chlore présentant un impact très légèrement supérieur).

Comme pour les combustibles usés, la dose due à la voie de transfert par les ouvrages reste nettement inférieure à celle due à la voie de transfert par la barrière géologique saine : le maximum de dose est 2000 fois plus faible environ pour la voie de transfert par les ouvrages que pour celle par la barrière

géologique ($2,1 \cdot 10^{-7}$ mSv/an contre 0,00047 mSv/an). Les doses associées à la voie de transfert par les ouvrages pour la fraction d'activité qui migre par les ouvrages dans la situation de défaillance de tous les scellements sont fournies sur la Figure 7.2-28. Les doses associées au reste de l'activité sont fournies sur la Figure 7.2-29.

● **Tous scellements défailants**

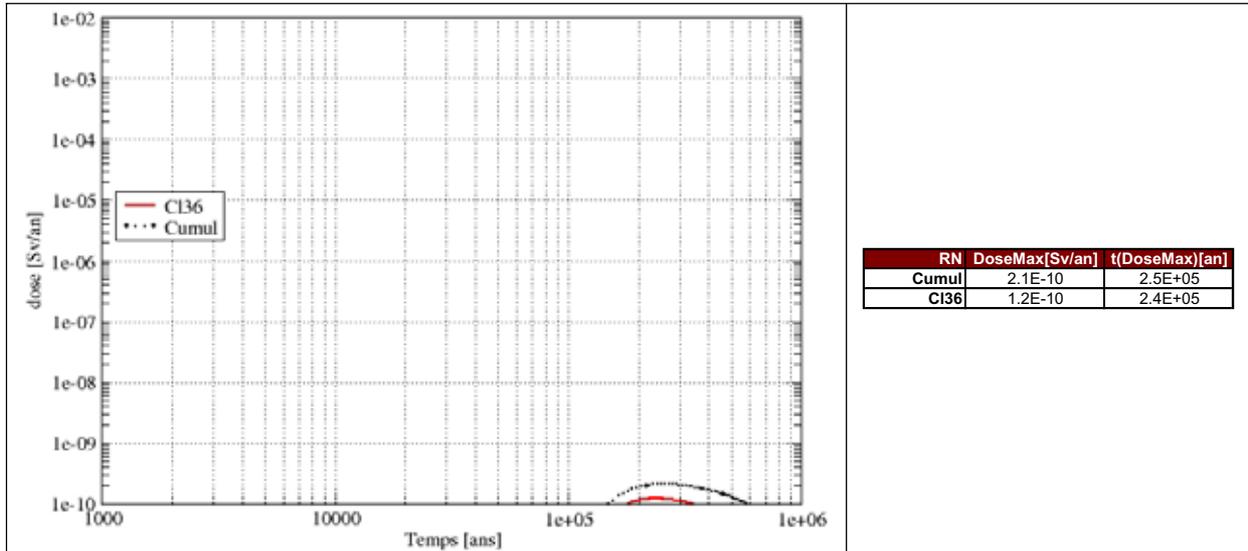


Figure 7.2-28 SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types C1/C2

● **Evaluation de l'impact associé à la voie de transfert par la barrière géologique : tous cas de calcul**

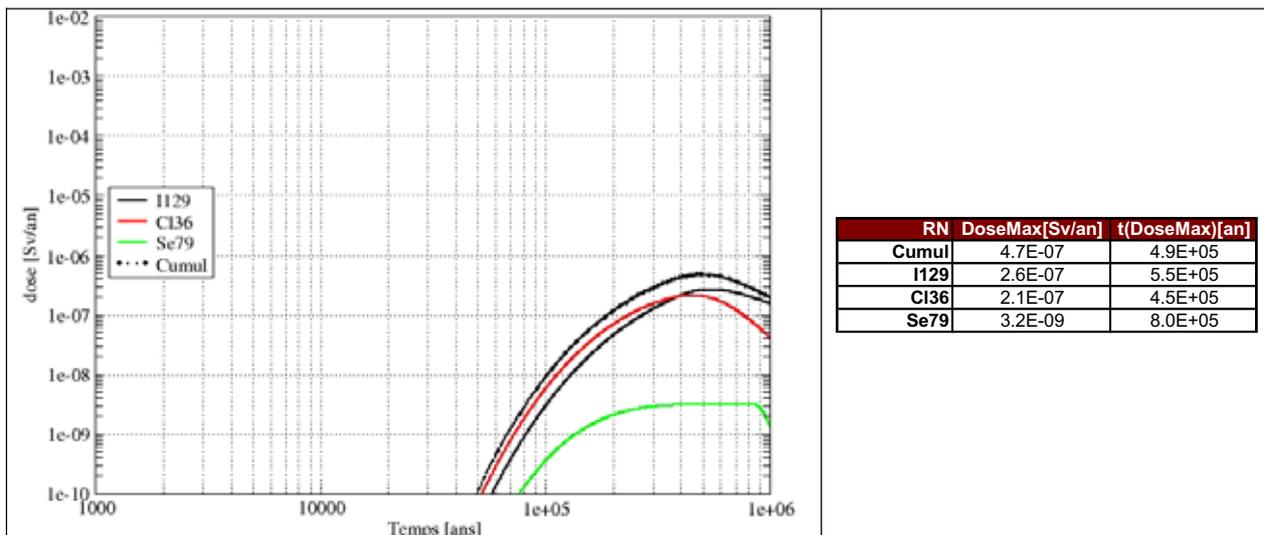


Figure 7.2-29 : SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types C1/C2

7.2.4.4 Colis types C3/4

Les conclusions sont similaires à celles des colis types C1/C2 tant qualitativement que quantitativement. Les doses associées à la voie de transfert par les ouvrages dans la situation de défaillance de tous les scellements sont fournies sur la Figure 7.2-30. Les doses associées au reste de l'activité sont fournies sur la Figure 7.2-31.

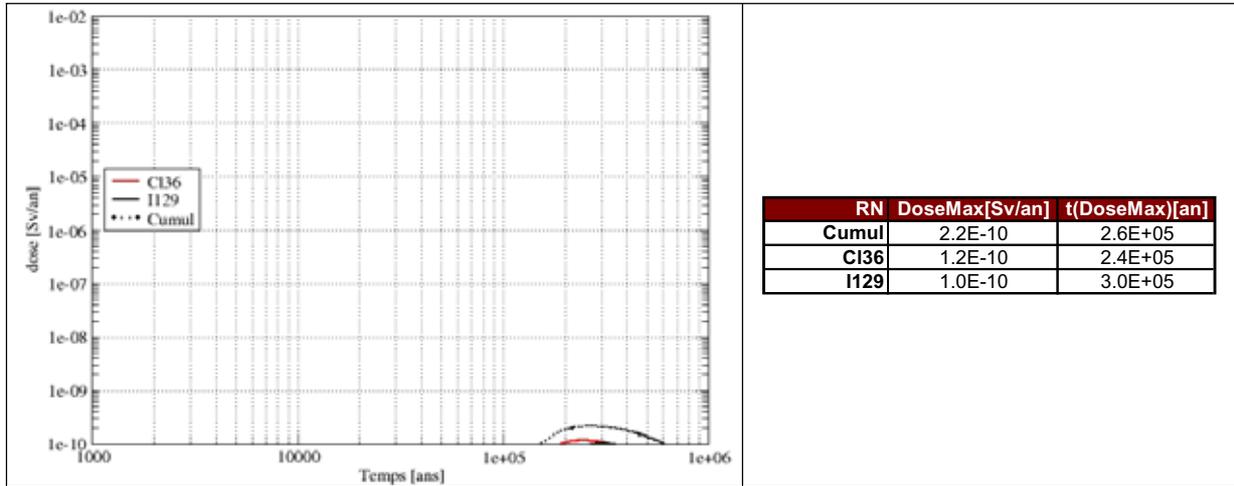


Figure 7.2-30 SEA défaut de scellements - Tous scellements défaillants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types C3/C4

- **Toutes situations – impact associé à la voie de transfert par la barrière géologique (évolution normale)**

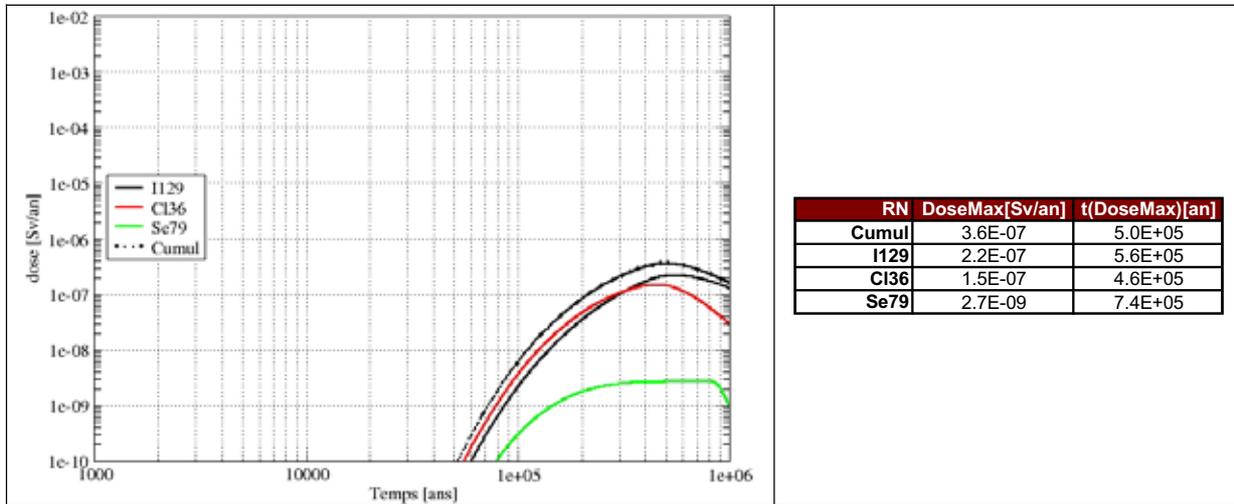


Figure 7.2-31 SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types C3/C4

7.2.4.5 Colis types B non organiques

Pour ces colis types ne dégageant pas d'hydrogène, seule la situation de défaillance de tous les scellements et celle de scellements de puits défectueux ont été étudiées. Ces deux situations engendrent des doses extrêmement faibles et tardives avec des maxima de dose de l'ordre de 10^{-7} mSv/an vers un million d'années, les deux principaux contributeurs étant l'iode 129 et le chlore 36.

Comme pour les autres colis types, la dose due à la voie de transfert par les ouvrages reste nettement inférieure à celle due à la voie de transfert par la barrière géologique saine. Elles sont fournies de la Figure 7.2-32 à la Figure 7.2-34.

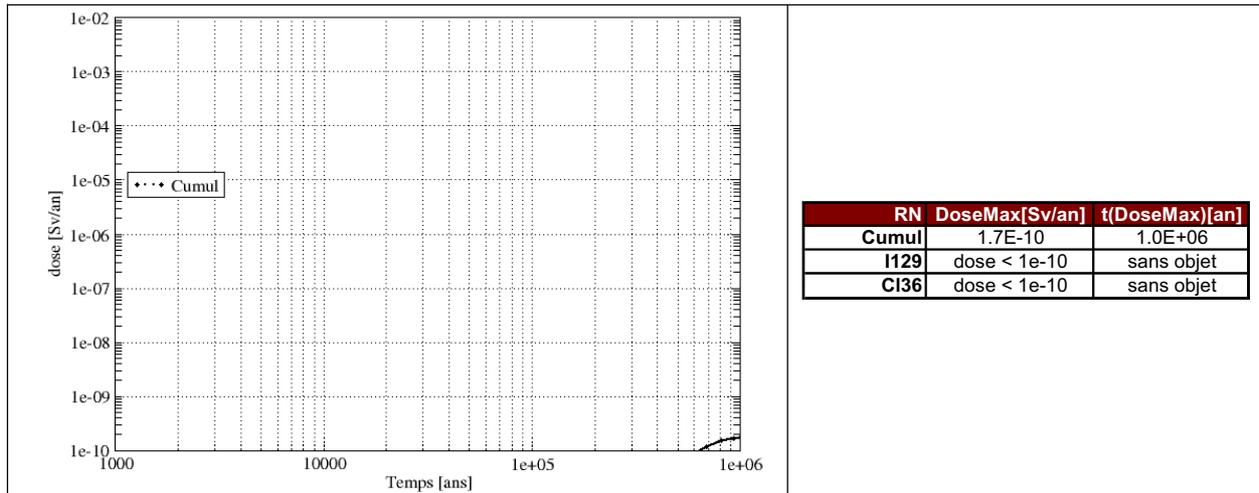


Figure 7.2-32

SEA défaut de scellements - Scellements de puits défectueux – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types B1x

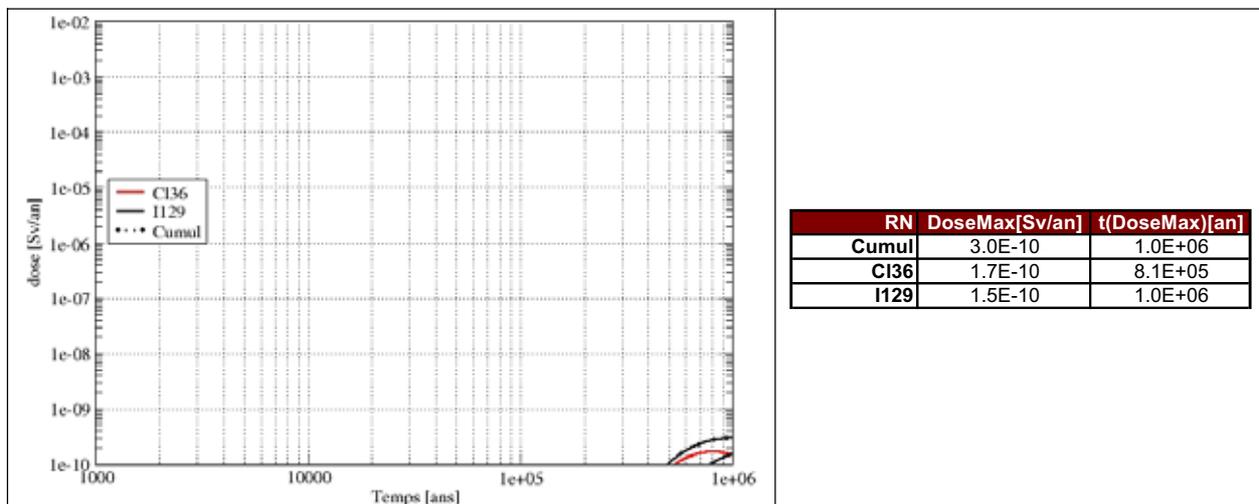


Figure 7.2-33

SEA défaut de scellements - Tous scellements défectueux – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types B1x

- **Toutes situations – impact associé à la voie de transfert par la barrière géologique (évolution normale)**

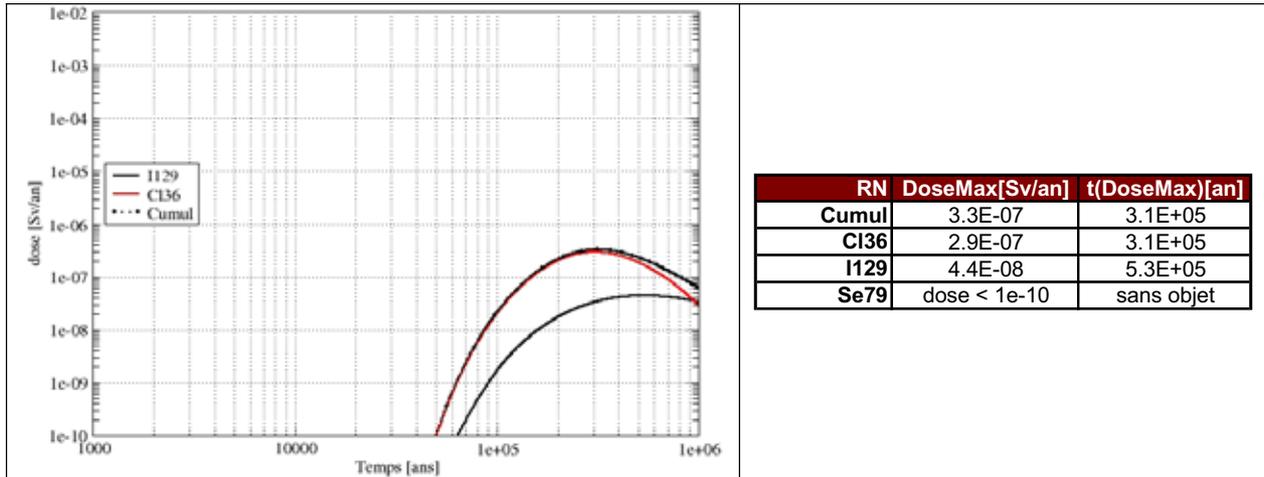


Figure 7.2-34 *SEA défaut de scellements - Toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types B1x*

7.2.4.6 Colis types de boues bitumées (B2)

Pour les colis types de boues bitumées, seuls les défaillances de tous les scellements et du scellement des puits ont été étudiées (voir Figure 7.2-35). Ces deux situations engendrent des doses inférieures à 10^{-7} mSv/an par la voie des ouvrages. Le seul impact est dans cette situation celui dû au transfert par le milieu géologique, équivalent à celui retenu en scénario d'évolution normale.

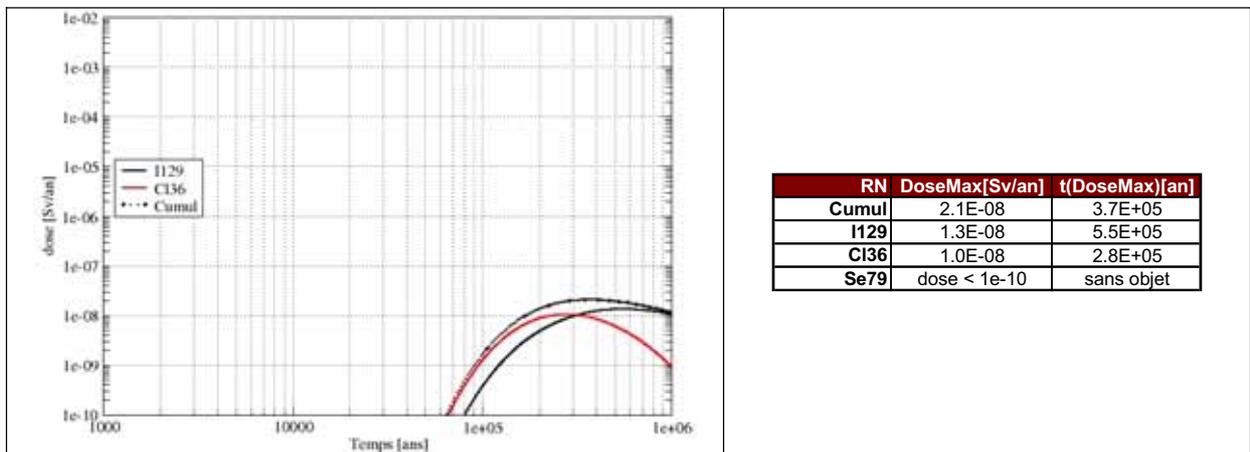


Figure 7.2-35 *SEA défaut de scellements - Toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types B2*

7.2.5 Analyses de sensibilité

Des analyses de sensibilité ont été menées de manière à prendre en compte d'éventuels effets aggravants pour la performance des fonctions de sûreté. Le Tableau 7.2-5 synthétise les études de sensibilité réalisées pour chacun des colis type traités et les différentes situations étudiées.

7.2.5.1 Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement

La finalité de cette étude est d'évaluer les conséquences, en terme de voies de transfert et d'impact, associées aux incertitudes éventuelles sur les paramètres hydrauliques, de transfert et de rétention de l'EDZ en situation de défaut de scellements ainsi qu'à la performance du noyau de scellement. Cette étude a consisté à considérer :

- une EDZ « dégradée » dont le détail des valeurs de paramètres est fourni dans le Tableau 7.2-3, avec :
 - ✓ une zone fracturée « pénalisante » présentant une forte perméabilité (10^{-6} m/s), un coefficient de diffusion équivalent à celui de particules d'eau dans de l'eau, et une absence de capacités de rétention géochimiques,
 - ✓ une zone microfissurée avec des paramètres hydrauliques de transfert et de rétention « conservatifs »,
- une perméabilité de noyau de bentonite de 10^{-9} m/s au lieu de 10^{-11} m/s (valeur « phénoménologique »). Cette affectation de perméabilité concerne tous les noyaux de scellements, y compris les bouchons d'alvéole.

● Situation « Tous scellements défailants » - combustibles usés CU1

La perte de charge induite par la défaillance de tous les scellements dans le stockage est de l'ordre de 12 mètres comme illustré sur la Figure 7.2-36 (soit une charge hydraulique en mètres NGF de 288 mètres NGF⁷¹ dans le stockage au lieu de 300 en SEN). Cette perte de charges importante résulte de la forte conductivité hydraulique de la zone fracturée (continue à 10^{-6} m/s depuis les puits jusqu'au stockage) qui transmet la charge depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusque dans le stockage.

Dans la zone de stockage, la convection est dominante avec des nombres de Péclet de l'ordre de 200 en sortie de galeries de liaison secondaires contre 10 environ en évolution normale. De ce fait, les temps de transfert convectifs sont beaucoup plus courts : le temps de transfert moyen entre la sortie des sous zones de stockage de combustibles usés CU1 et les puits est de l'ordre de 60 000 ans (soit environ 3 fois moins que pour la situation d'une EDZ « dégradée » en SEN). La forte perméabilité de la zone fracturée continue le long des ouvrages constitue un drain hydraulique et le débit d'eau sortant des puits est significativement plus élevé que pour la même situation étudiée en référence : $7,5 \text{ m}^3/\text{an}$ contre $2,5 \text{ m}^3/\text{an}$ avec une EDZ « phénoménologique ».

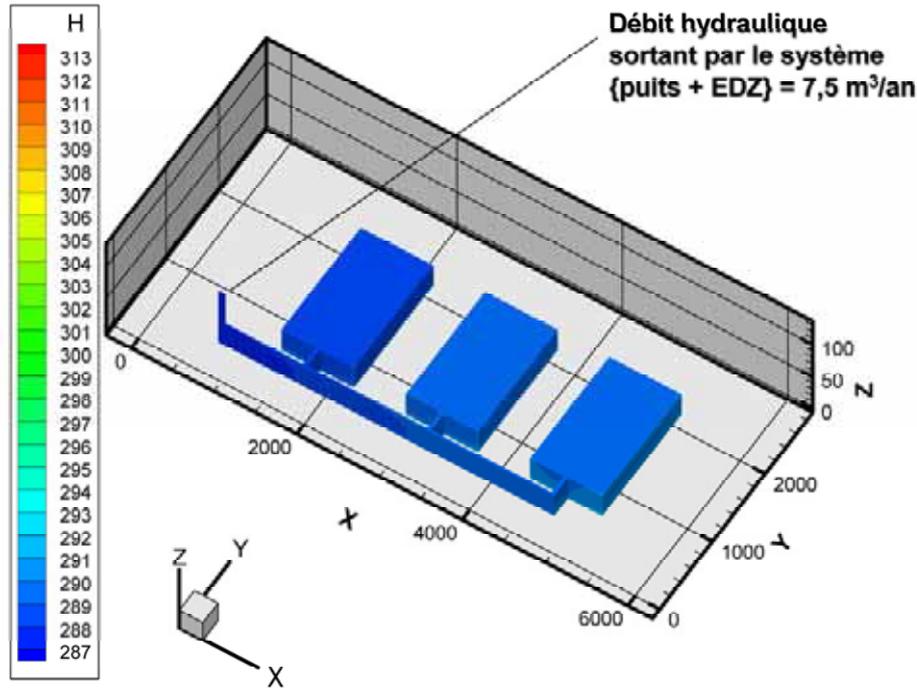


Figure 7.2-36

SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants - Sensibilité à l'EDZ et à la perméabilité du noyau de bentonite- colis type CUI - débit hydraulique sortant des ouvrages d'accès (H = charge hydraulique en mètres NGF⁷¹)

Dans le champ proche de l'alvéole, la prise en compte d'une EDZ dégradée a pour conséquence d'augmenter la quantité de radionucléides entrant dans la galerie d'environ 10 % pour le chlore 36 et l'iode 129 (voir Tableau 7.2-13). Cette augmentation, peu importante, est due essentiellement à la modification du coefficient de diffusion dans l'EDZ, le transfert restant en diffusion dominante (co-dominance en tête d'alvéole dans la zone fracturée) dans et autour de l'alvéole. La perturbation hydraulique au niveau de l'alvéole, même associée à une EDZ dégradée, n'est pas suffisante pour induire un régime convectif dominant.

	Alvéole		Zone de stockage Efficacité des scellements de zones		Ouvrages d'accès Efficacité des scellements de puits	
	entrant dans les galeries	entrant dans le Callovo-Oxfordien sain	sortie sous-zone de stockage soit « avant scellements de zone »	sortie scellements de zone	sortie scellements de galeries de liaison principales	sortie {puits + EDZ}
³⁶ Cl	55%	32%	0,246%	0,171%	0,119%	0,115%
¹²⁹ I	67%	33%	0,372%	0,281%	0,227%	0,223%
⁷⁹ Se	0,39%	0,38%	0,00096%	0,00057%	0,00026%	0,00024%

Tableau 7.2-14

SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – sensibilité : tous scellements défailants, EDZ dégradée et perméabilité du noyau égale à 10⁻⁹ m/s - colis type CUI

Dans la zone de stockage, le transfert est nettement convectif du fait de la contribution hydraulique des différentes alvéoles de stockage et des galeries. Les transferts sont ainsi plus rapides et les échanges depuis les galeries de stockage avec la barrière géologique saine moindres que dans le cas de calcul avec EDZ « phénoménologique ». La masse d'iode 129 sortant des zones de stockage par le puits sur un million d'années est 6 fois supérieure. Notons par ailleurs que cette masse ne représente que 0,4 % de l'inventaire initial, ce qui reste faible. Les maxima de débit molaire apparaissent aux alentours de 70 000 ans pour les radionucléides avec peu ou pas de décroissance (^{129}I , ^{36}Cl).

Dans les galeries de liaison principales, le transfert est conditionné par l'hydraulique amont intégrant les zones de stockage. Le maximum de débit molaire en sortie de puits est décalé d'environ 60 000 ans (soit un peu au-delà de 100 000 ans) par rapport à la sortie de zone de stockage, avec un transfert limité depuis les galeries de liaison principales vers la barrière géologique. Aussi, seulement 0,2 % de l'inventaire initial de l'iode 129 est sorti des puits défailants à un million d'années. Cette fraction est encore plus faible pour le chlore 36 (0,1 %) qui bénéficie de la décroissance radioactive. Cette situation est résumée par la Figure 7.2-37.

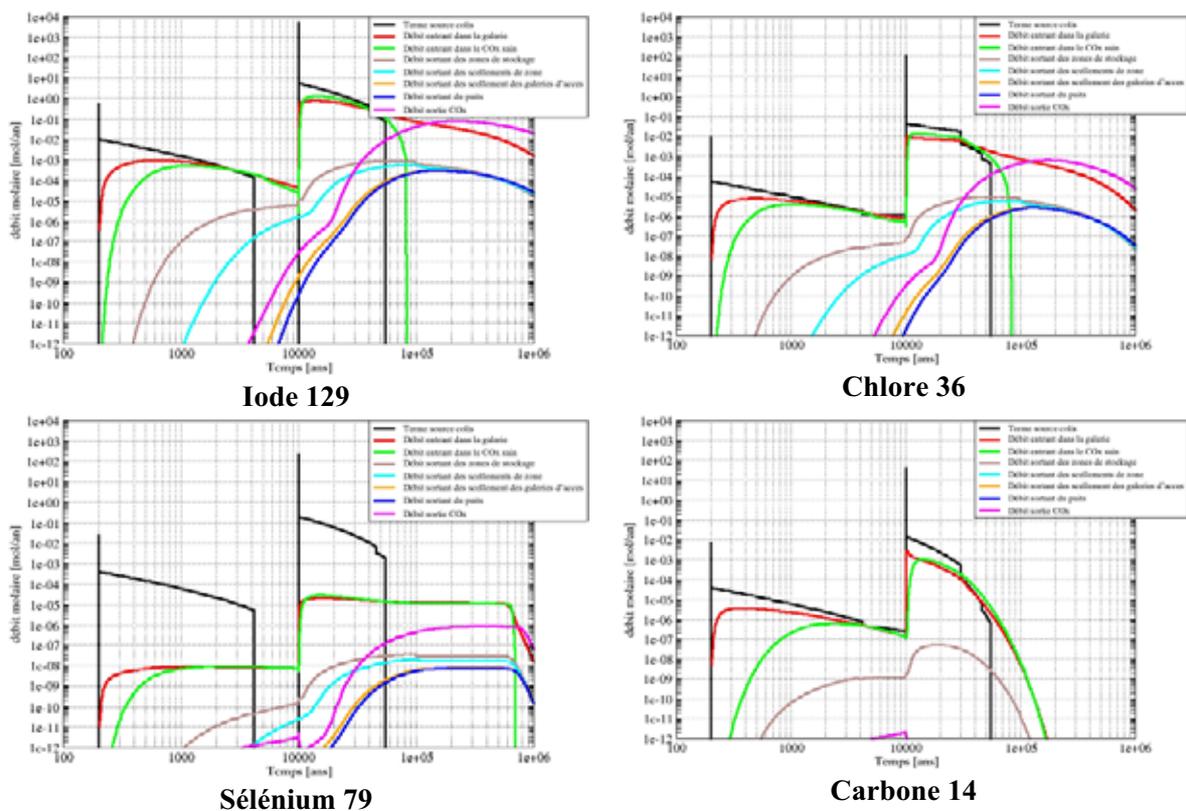


Figure 7.2-37

SEA défaut de scellments - historique de débit molaire – Tous scellments défailants : Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement : colis type CU1 - ^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{14}C

La forte section de l'EDZ dégradée autour des galeries et du noyau de bentonite suffit à court-circuiter les scellments ; leur défailance n'a dans ce cas que peu d'impact. Les résultats de cette étude sont très voisins de l'étude de sensibilité réalisée pour l'évolution normale avec une EDZ dégradée : le débit hydraulique sortant du puits dans l'étude « tous scellments défailants » vaut $7,5 \text{ m}^3/\text{an}$ contre $6 \text{ m}^3/\text{an}$ en « tous scellments efficaces mais EDZ dégradée ».

La dose associée à la masse transitant par les ouvrages et sortant par les puits est dominée par l'iode 129. Le maximum de dose par cette voie est de l'ordre de 0,0003 mSv/an à environ 200 000 ans (voir Figure 7.2-38).

La dose associée à la masse transitant par la barrière géologique est identique à celle du SEN (la fraction de la masse transitant par les ouvrages étant toujours négligeable). Le maximum de dose est de l'ordre de 0,02 mSv/an aux alentours de 300 000 ans soit un peu moins de 2 ordres de grandeur de plus que la fraction d'activité qui migre par les ouvrages.

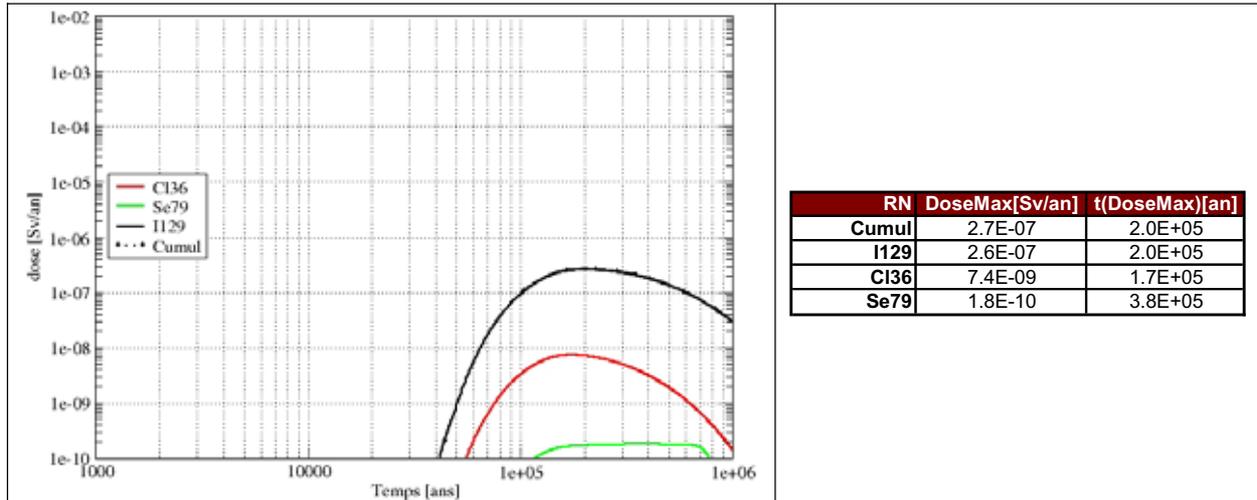


Figure 7.2-38

SEA défaut de scellements - Tous scellements défectueux – Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU1

● Situation de « scellements des puits défectueux » - combustibles usés CU1

En situation de défaillance des puits, les résultats sont très similaires à la configuration « tous scellements défectueux » dans la mesure où la perméabilité de la zone fracturée rend très peu efficaces les coupures hydrauliques et les noyaux de scellements. Le débit d'eau sortant du stockage est de 7,1 m³/an.

La fonction « s'opposer à la circulation d'eau » apparaît sensible aux paramètres retenus pour l'EDZ et en particulier la zone fracturée. En cas « d'EDZ dégradée », le noyau de scellements et les coupures telles qu'elles sont représentées (ancrées uniquement dans la zone fracturée) n'apportent pas de gain significatif. Ce court-circuit des scellements de galerie par la zone fracturée est en partie lié à des choix de modélisation, et plus particulièrement aux coupures hydrauliques courtes prises en compte. Avec des longueurs de coupures plus proches de ce que l'ingénierie permet d'envisager, ces conclusions seraient à tempérer.

Sous cette réserve, l'efficacité ou la non efficacité des noyaux de scellements et de la coupure influent peu dès lors que l'EDZ autour des galeries est très dégradée. Ainsi, les résultats de transport sont similaires à ceux de la situation « tous scellements défectueux » : environ 0,2 % de la masse d'iode 129 présente initialement dans le stockage de combustibles usés sort par les puits après avoir transité dans les ouvrages comme détaillé dans le Tableau 7.2-15.

	Alvéole		Zone de stockage Efficacité des scellements de zones		Ouvrages d'accès Efficacité des scellements de puits	
	entrant dans les galeries	entrant dans le Callovo-Oxfordien sain	sortie sous-zone de stockage soit « avant scellements de zone »	sortie scellements de zone	sortie scellements de galeries de liaison principales	sortie {puits + EDZ}
³⁶ Cl	55%	32%	0,228%	0,155%	0,106%	0,102%
¹²⁹ I	67%	41%	0,346%	0,256%	0,204%	0,200%
⁷⁹ Se	0,39%	0,38%	0,00087%	0,00049%	0,00021%	0,00020%

Tableau 7.2-15 SEA défaut de scellements - Répartition et quantification des différentes voies de transfert – sensibilité : scellements de puits défaillants, EDZ dégradée et perméabilité du noyau égale à 10^{-9} m/s - colis type CU1

La dose associée à la masse transitant par les ouvrages et sortant par les puits est dominée par l'iode 129. Le maximum de dose est de l'ordre de 0,00023 mSv/an à environ 210 000 ans (voir Figure 7.2-39), soit de l'ordre de celui obtenu en configuration « EDZ dégradée - tous scellements défaillants ».

La dose associée à la masse transitant par la barrière géologique est identique à celle du SEN.

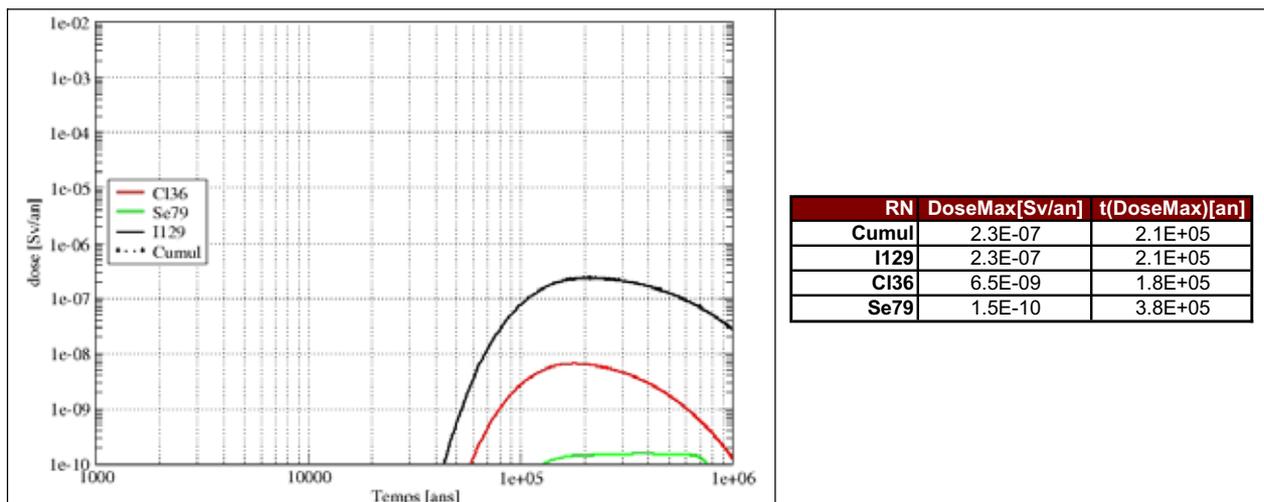


Figure 7.2-39 SEA défaut de scellements - Scellements de puits défaillants – Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU1

● **Situation « Tous scellements défaillants » et « scellements de puits défaillants » - combustibles usés CU2**

Ces situations sont strictement identiques à celles des combustibles usés CU1, considérés également pour le scénario de gestion des combustibles usés S2, en ce qui concerne l'hydraulique. Du point de vue du transport, les résultats sont similaires.

Ce paragraphe ne présente que les doses relatives au colis type CU2, pour les différentes situations étudiées.

Pour ces deux situations (voir Figure 7.2-40 et Figure 7.2-41) et comme les combustibles usés CU1, la dose est dominée par l'iode 129.

Pour la situation « tous scellements défailants », le maximum de dose issue des radionucléides transitant par les ouvrages vaut 0,00003 mSv/an à 200 000 ans.

Pour la situation « scellements de puits défailants », ce même maximum de dose vaut 0,00002 mSv/an à 210 000 ans. Comme pour les combustibles usés CU1, l'EDZ fortement dégradée masque l'efficacité des scellements de galeries et les doses sont similaires à la configuration « tous scellements défailants ».

La dose associée à la masse transitant par la barrière géologique est identique à celle du SEN (la fraction de la masse transitant par les ouvrages étant négligeable). Le maximum de dose est de l'ordre de 0,0017 mSv/an aux alentours de 300 000 années soit 100 fois plus que la fraction d'activité qui migre par les ouvrages

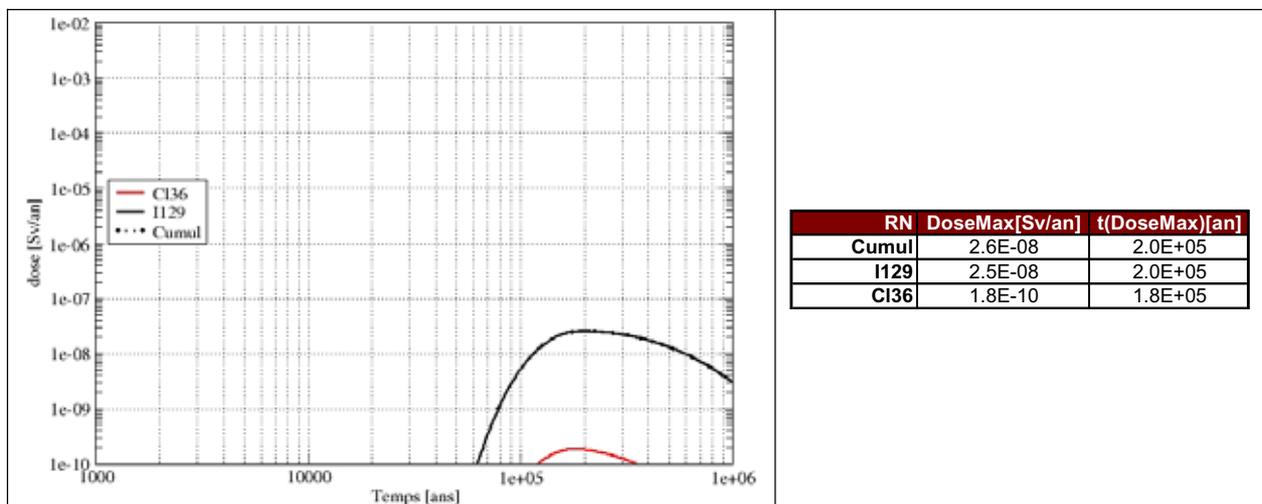


Figure 7.2-40

SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU2

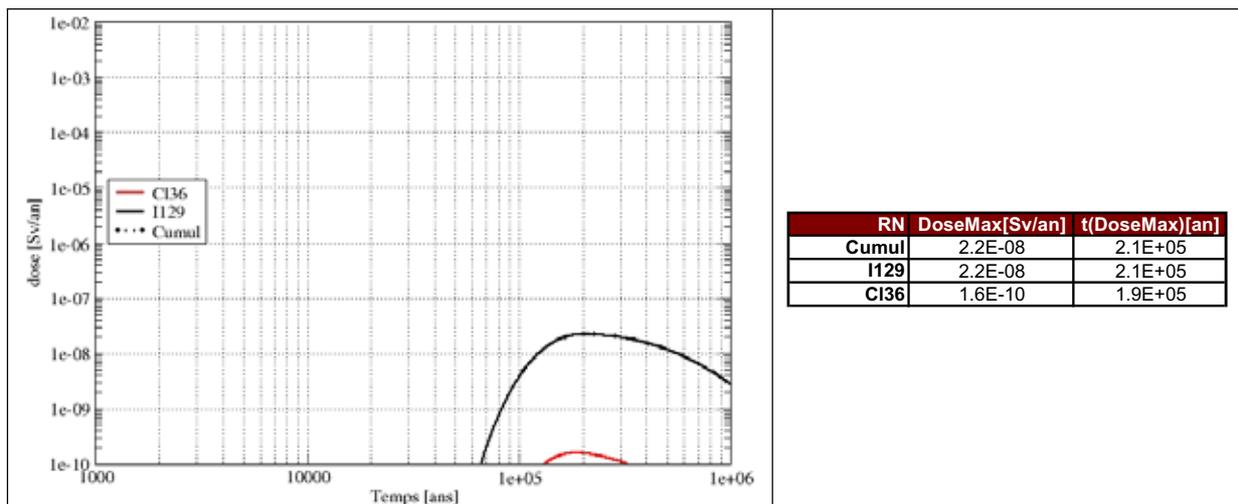


Figure 7.2-41

SEA défaut de scellements - Scellements de puits défailants – Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU2

7.2.5.2 Sensibilité à la géochimie du noyau de scellement

La finalité de cette étude est d'évaluer les conséquences, en terme de voies de transfert et d'impact, associées aux variations de la géochimie du noyau de scellement pouvant résulter de perturbations chimiques. Ces derniers sont considérés avec des performances de rétention chimique conservatives dont les valeurs de coefficient de retard et de solubilité sont synthétisées dans le Tableau 7.2-6.

Cette étude a été menée pour la situation « tous scellements défailants » avec les combustibles usés CU2. En terme d'hydraulique la situation est identique aux résultats observés dans le calcul de référence. Par ailleurs en ce qui concerne l'impact radiologique, on n'observe également aucune évolution. En effet :

- compte tenu de la lenteur des écoulements dans les ouvrages, l'essentiel des radionucléides sorbés diffuse dans la barrière géologique au cours du transfert dans les galeries. La formation hôte joue ainsi un rôle de barrière absorbante pour les radionucléides, ce qui masque toute variation de géochimie dans les ouvrages ;
- les niveaux de relâchements (dose supérieure à 10^{-10} Sv/an) restent pilotés par les radionucléides solubles et non sorbés à vie longue l'iode 129 et chlore 36 (et sont donc indépendants de la géochimie des ouvrages).

La seule véritable différence entre ce cas de calcul et les précédents concerne le sélénium 79 (non sorbé dans la barrière géologique). Le niveau de relâchement de ce radionucléide en sortie de puits est augmenté de trois ordres de grandeur. Dans le calcul de référence sa faible solubilité dans le scellement participait à la limitation de sa migration par les galeries. Pour autant ce radionucléide ne contribue pas à l'impact de manière significative.

7.2.5.3 Sensibilité à l'EDZ, à la perméabilité du noyau de scellements et au terme source

Cette étude consister à prendre en compte en plus des performances dégradées d'EDZ et des noyaux de scellements des paramètres dégradés pour le modèle de relâchement des déchets vitrifiés de manière à intégrer les éventuelles perturbations chimiques auxquelles pourraient être soumis les déchets.

Cette étude consiste en fait à supposer que les déchets vitrifiés sont quasi-labiles. L'impact est le même que lorsque l'on applique un modèle de type $V_0.S$ avec des paramètres phénoménologiques. En effet, ce dernier modèle attribue déjà aux déchets vitrifiés une durée de vie courte au regard des temps de transfert. Modéliser un verre quasi-labile ou labile ne modifie pas les conclusions du calcul.

7.2.5.4 Sensibilité au gradient de charge dans le Callovo-Oxfordien

Cette étude consiste à évaluer l'influence d'un gradient de charge plus important dans la formation hôte. Ont été retenus :

- un gradient de charge vertical ascendant de 0,4 m/m appliqué de manière pérenne,
- un gradient de charge vertical ascendant de 1 m/m correspondant à une valeur pénalisante, pour évaluer plus complètement le rôle de ce paramètre particulier.

Le calcul a été réalisé pour l'iode 129 des combustibles usés CU1 dans la situation de défaillance de tous les scellements.

Les principaux enseignements de cette étude sont les suivants (voir Figure 7.2-42) :

- la prise en compte d'un gradient de charge ascendant 5 fois plus important dans le Callovo-Oxfordien n'a pas d'impact sur la voie de transfert par la barrière géologique, le transport y restant diffusif de manière dominante ;
- le débit molaire en sortie de puits est sensible à la variation du gradient de charge ascendant dans le Callovo-Oxfordien : un gradient de charge deux fois plus élevé induit un niveau maximal de relâchement en sortie de puits quarante fois plus fort. Un gradient de charge cinq fois plus élevé engendre quant à lui un niveau maximal de relâchement en sortie de puits trois cents fois plus élevé. On note qu'il n'y a pas proportionnalité entre le gradient et la masse qui parvient à sortir du

puits : en effet, les échanges entre la galerie et le Callovo-Oxfordien sont d'autant plus forts que le transport y est lent. Pour des gradients forts, le rôle de « barrière absorbante » du Callovo-Oxfordien n'a plus la même efficacité ;

- dans le cas où le gradient de charge ascendant dans le Callovo-Oxfordien est égal à 0,4 m/m, la contribution radiologique due au puits seul se trouve augmentée, mais la dose totale reste dominée par la voie de transfert par les argilites saines, d'au moins deux ordres de grandeur. L'impact reste donc identique à celui du calcul de référence ;
- en revanche, dans le cas où le gradient de charge ascendant dans le Callovo-Oxfordien est égal à 1 m/m, le débit molaire en sortie de puits est du même ordre de grandeur que celui qui passe par les argilites saines jusqu'à 40 000 ans, et devient inférieur ensuite d'un ordre de grandeur.

On peut donc estimer que c'est à des valeurs supérieures à 1 m/m que la contribution des ouvrages d'accès devient équivalente à celle de la formation hôte, bien entendu en cas de défaut de scellements. Rappelons que de tels gradients sont très significativement supérieurs à ceux qui sont mesurés à partir des différences de charges entre encaissants supérieurs et inférieurs, sur la zone de transposition (voir Figure 6.2-4, au chapitre 6).

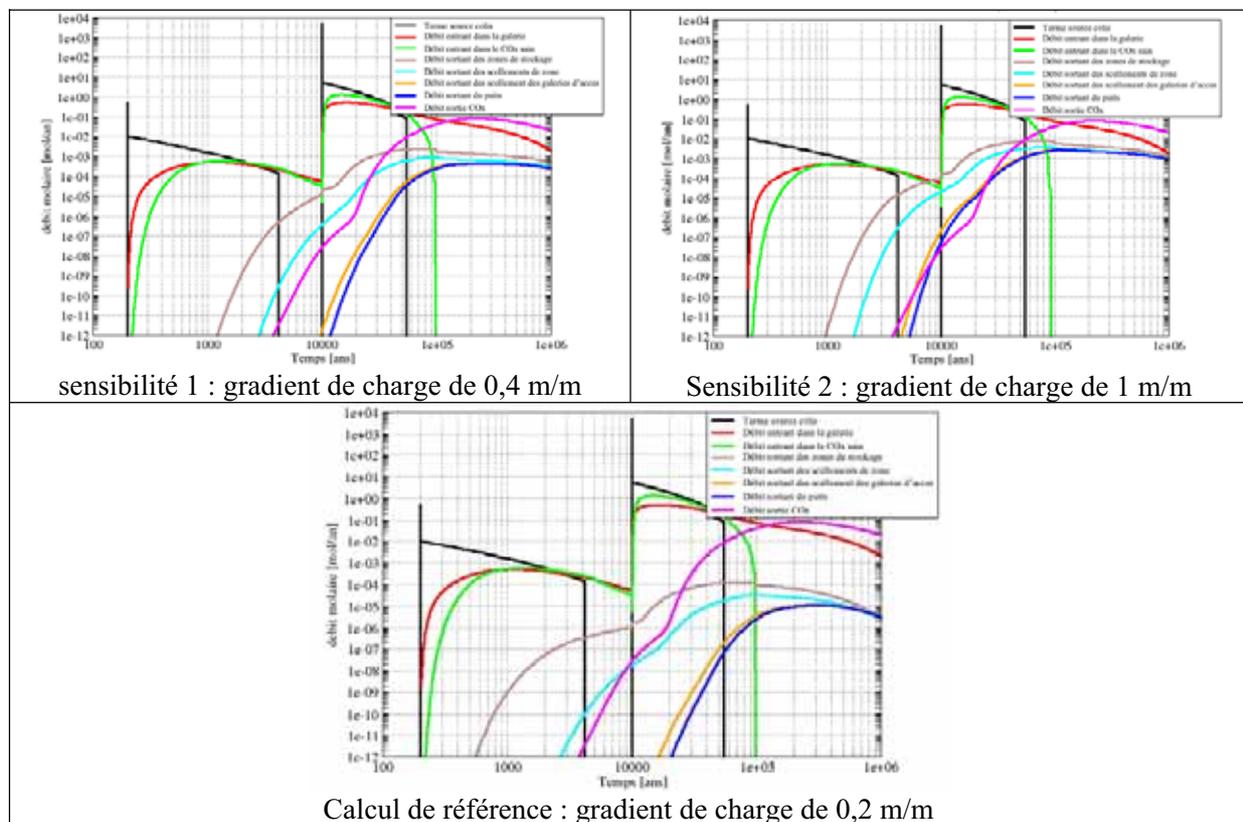


Figure 7.2-42

SEA défaut de scellements – étude de sensibilité au gradient de charge – historiques de débits molaires – situation tous scellements défectueux – combustibles usés CUI – ¹²⁹I

En conclusion, la prise en compte d'un gradient de charge plus important augmente significativement les relâchements de la voie de transfert par les ouvrages mais n'a pas d'impact sur le transport par la barrière géologique, le système restant diffusif de manière dominante. Ce n'est qu'à partir d'un gradient de charge vertical ascendant de 1 m/m, appliqué de manière pérenne dans le Callovo-Oxfordien et en considérant tous les scellements défectueux, que les niveaux des relâchements deviennent proches de ceux de la barrière géologique. Néanmoins, même avec de telles valeurs, le niveau de la dose maximale reste encore équivalent à celui évalué en SEN.

7.2.6 Enseignements du SEA « défaut de scellements »

L'étude du scénario défaut de scellements a permis de mettre en évidence que le système de stockage est robuste face à une défaillance de l'ensemble des scellements, et à des perturbations chimiques portant soit sur les scellements, soit sur les alvéoles de déchets vitrifiés.

En effet, dans toutes les situations de défaillance de scellements étudiées, même en considérant des paramètres dégradés pour l'EDZ, le noyau de scellement et le relâchement des déchets C, l'impact associé à la fraction d'activité qui migre par les ouvrages est négligeable devant celle qui diffuse au travers du milieu géologique (comme dans le SEN). Les maxima de dose associés à la voie de transfert par les ouvrages restent dans toutes les situations très inférieurs à la fraction d'activité qui migre par la barrière géologique (facteur 100 au minimum).

Plus particulièrement, plusieurs points ont été mis en évidence du point de vue de l'hydraulique :

- dans les cas où l'on considère une défaillance non simultanée des scellements de puits et de galeries, la perturbation hydraulique du stockage reste limitée du fait du ou des scellements efficaces qui agissent en redondance des scellements défaillants. La perte de charge dans le stockage est au maximum de 4 mètres et les débits sortant du puits n'excèdent pas 1,4 m³/an, soit trois fois les débits d'eau sortant du puits en SEN. Ces débits restent limités.
- En cas de défaillance simultanée des scellements de puits et de galeries, la perturbation hydraulique est plus forte, mais reste limitée du fait notamment de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien (dont l'architecture en « cul-de-sac » tire parti) et de l'EDZ qui limitent l'apport d'eau.
- En cas de performances dégradées d'EDZ, cette zone constitue un drain significatif des zones de plus fortes charges vers les zones de puits. Les écoulements augmentent et les débits d'eau en sortie de barrière géologique sont significativement plus élevés qu'en situation de référence (de l'ordre de 7 m³/an). Dès lors que l'EDZ présente des caractéristiques très dégradées, les propriétés du noyau de scellements et des coupures hydrauliques telles qu'elles sont représentées de manière pénalisante (ancrées uniquement dans la zone fracturée) n'apportent plus de gain significatif. Cette conclusion serait à nuancer avec des scellements ancrés plus profondément.

Le Tableau 7.2-16 compare les débits d'eau sortant du puits des différentes situations étudiées en SEA « défaut de scellements » et en SEN (calcul de référence et sensibilité à l'EDZ dégradée). Les résultats confirment les points exposés précédemment : les propriétés de l'EDZ influent de manière significative sur l'hydraulique du stockage et en particulier sur les débits sortant du puits. Toutefois, même dans la configuration la plus pénalisante, les débits demeurent très modestes.

Situations	Débit hydraulique sortant des puits (m ³ /an) Stockage de combustibles usés – scénario S2
<i>Tous scellements efficaces (SEN)</i>	0,5
<i>Scellements des ouvrages d'accès défaillants</i>	1,0
<i>Abandon du puits</i>	1,4
<i>Scellements de galeries défaillants</i>	0,75
<i>Tous scellements défaillants</i>	2,4
<i>Tous scellements efficaces + EDZ dégradée</i>	6,3
<i>Tous scellements défaillants + EDZ dégradée</i>	7,5
<i>Scellements des ouvrages d'accès défaillants + EDZ dégradée</i>	7,1

Tableau 7.2-16 SEA défaut de scellements – comparatif des débits d'eau sortant du puits pour les différentes situations étudiées

Du point de vue de l'impact, on montre pour toutes les situations étudiées que :

- la voie de transfert principale reste la barrière géologique. La dose associée à cette voie de transfert est identique au résultat du SEN, compte tenu de la part non significative qui migre par les ouvrages ;
- la dose associée à la fraction d'activité qui migre par les ouvrages est très faible par comparaison, d'au moins 3 ordres de grandeur. L'impact le plus important est celui associé aux combustibles usés CU1 pour la situation de défaillance de tous les scellements avec un maximum de dose de 0,00001 mSv/an à 350 000 ans environ. La majorité des situations engendre des doses inférieures à 10^{-7} mSv/an.

L'impact apparaît sensible aux propriétés de l'EDZ. La prise en compte de propriétés dégradées augmente la dose due aux voies de transfert par les ouvrages d'un ordre de grandeur et la rapproche dans le temps (vers 200 000 ans), sans conséquence toutefois sur l'impact global.

La prise en compte de paramètres conservatifs pour le modèle de relâchement des déchets vitrifiés, simulant par exemple une perturbation alcaline dans les alvéoles, n'a aucune influence sur l'impact.

La prise en compte de paramètres géochimiques conservatifs pour les noyaux de scellements n'a pas d'influence :

- compte tenu de la lenteur des écoulements dans les ouvrages, le milieu géologique « piège » les radionucléides qui pourraient être sensible à la géochimie de la bentonite ;
- les radionucléides qui contribuent à l'impact ne sont pas sensibles aux propriétés géochimiques des corps de scellements.

On notera cependant que les scellements permettent d'immobiliser le sélénium qui transiterait par les galeries.

En conclusion, les résultats valident l'intérêt porté par l'Andra à la détermination des propriétés de la zone endommagée (fracturée, microfissurée) et aux propriétés hydrauliques en grand des scellements. L'analyse de l'influence de la zone endommagée souligne toutefois que, si celle-ci est importante au regard de l'efficacité des scellements, elle demeure modeste quant au fonctionnement général du système de stockage.

On note que les scellements sont des contributeurs importants de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau », mais que le milieu géologique (mobilisé par l'architecture arborescente en « cul-de-sac ») assure une redondance en limitant les apports d'eau, même en cas de défaillance de tous les scellements. Ces composants contribuent aussi à immobiliser certains radionucléides qui pourraient être solubles au sein des galeries (tels que le sélénium). En revanche, leur contribution à la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » apparaît, comme on pouvait s'y attendre, mineure.

Du fait de l'efficacité de ces dispositifs, l'impact du SEA « défaut de scellements » n'apparaît pas supérieur à celui du SEN.

7.3 Le scénario « défaut de colis »

La RFS III.2.f indique « Pour une première évaluation, le cas d'un défaut de conditionnement de colis pourra être pris en compte au niveau de l'évaluation d'incertitude associée à la situation de référence ». Le défaut de conditionnement est donc recommandé, en première approximation, comme calcul de sensibilité associé au scénario d'évolution normale (SEN).

Le SEN (chapitre 5) prend déjà en compte, une défaillance initiale d'un conteneur de chaque type de combustibles usés (CU) et de trois surconteneurs de déchets C (un associé aux verres C0, un associé aux verres C1/C2, l'autre aux verres C3/C4), ces défauts résultant d'un problème ponctuel d'assurance qualité.

Parmi les choix de scénarios effectués par l'Andra pour le dossier 2005, un scénario spécifique, dit « défaut de colis » a pour objectif de traiter une défaillance plus importante des éléments de colisage ajoutés en vue du stockage. Le scénario « défaut de colis » est, dans son principe, équivalent du point de vue du calcul au SEN : seule une fraction de l'inventaire plus importante que celle considérée en SEN est libérée dès les premières centaines d'années, les autres variables étant les mêmes.

7.3.1 Définition du scénario

Le chapitre 6 a permis d'identifier un certain nombre de situations de défaillance qui peuvent être couvertes par le scénario « défaut de colis » ; le but n'est pas ici de décrire à nouveau le détail de toutes ses situations, mais d'exposer le mode de calcul en lui-même. On rappelle simplement que ce scénario est en grande partie conventionnel : il repose sur une défaillance majeure et répétée du système de contrôle qualité de la fabrication des colisages. Compte tenu du stade de définition des études sur les conteneurs et afin d'assurer le caractère majorant du scénario, on a choisi de représenter ce défaut comme une « disparition » totale du conteneur survenant à l'échelle du siècle qui suit la mise en alvéole⁹². Ce délai d'un siècle prend en compte de manière pénalisante le temps nécessaire pour que l'eau atteigne le colis, endommage l'enveloppe primaire et puisse commencer à dissoudre le verre ou le combustible usé.

Pour les déchets de type B, les compléments de colisage des colis primaires n'ont, à ce stade, pas de performance attendue vis-à-vis du confinement (voir chapitre 3). Le complément de colisage à base de matériaux cimentaires permet d'assurer un environnement chimique favorable aux déchets. Pour les déchets de boues bitumées, il contribue à assurer la stabilité dimensionnelle du bitume de manière à pouvoir garantir le modèle de relâchement proposé. Les défaillances de ces fonctions sont couvertes par les paramètres de référence et les études de sensibilité du SEN : étude de sensibilité vers des modèles de relâchements très pénalisants pour l'ensemble des déchets B (labiles pour la plupart, et pilotés uniquement par les flux d'eau entrant dans l'alvéole pour les bitumes), étude de sensibilité sur des relâchements pendant le transitoire hydraulique. On rappelle que les calculs ont montré (chapitre 5) que ces différentes situations n'avaient pas de conséquences significatives sur l'impact. En effet, au stade actuel, les durées de relâchement des radionucléides par les colis, et le temps de transfert estimé dans le complément de colisage en béton, restent courts devant les temps de transfert dans la formation hôte. Les déchets B ne sont donc plus abordés dans la suite de ce scénario.

Pour les déchets de type C, l'enveloppe primaire n'a pas de performance particulière. En revanche le surconteneur présente une performance attendue d'étanchéité à l'eau en phase de post fermeture (voir chapitre 3) de manière à éviter l'arrivée d'eau au contact du verre tant que celui est à plus de 50 à 60°C, de manière à profiter de vitesses de dissolution plus faibles. Cette fonction permet par ailleurs d'éviter tout relâchement de solutés dans le milieu tant que la température est significative, la diffusion plus rapide et que certains éléments sont susceptibles d'être moins sorbés. Supposer la défaillance du conteneur revient donc en premier lieu à envisager des relâchements et un transfert des radionucléides en ambiance thermique.

⁹² On rappelle que, les calculs nécessitant qu'une date bien précise soit définie et qu'elle soit calée sur la décroissance de l'inventaire radiologique, on a retenu 200 ans de décroissance des radionucléides constituant les déchets, depuis leur formation en réacteur.

Pour les combustibles usés (CU), la problématique est la même que pour les déchets C. L'événement initiateur du scénario « défaut de colis » considéré correspond à une défaillance prématurée des conteneurs de combustibles usés. On rappelle que ce scénario couvre également, en première approche, le cas d'un accident de criticité survenant dans le stockage à la suite d'un rapprochement des assemblages, dans une configuration très improbable.

Dans un cas comme dans l'autre, le nombre de colis à considérer demeure arbitraire. On a retenu de traiter deux cas.

Le premier, qui correspond par exemple à une situation de défaillance du système de contrôle qualité, revient à envisager un mois de fabrication de conteneurs défectueux. Avec les hypothèses de flux de déchets actuellement retenues, cela correspond à :

- 35 surconteneurs défaillants pour les colis types C0,
- 50 surconteneurs défaillants de colis types C2 pour les colis types C1/C2 traités ensemble,
- 50 surconteneurs défaillants de colis types C4 pour les colis types C3/C4 traités ensemble,
- 30 conteneurs défaillants de combustibles usés CU1 (combustibles UOx2, UOx3, URE),
- 12 conteneurs défaillants de combustibles usés CU2 (combustibles MOx).

Le deuxième cas, traité en sensibilité, prend en compte une défaillance complète de l'ensemble de l'inventaire des conteneurs de déchets vitrifiés et des combustibles usés. Il correspond, par exemple, à une mauvaise appréciation de la durée de vie des conteneurs sur l'ensemble du stockage. En ce sens, supposer un défaut au bout de 200 ans est une hypothèse maximaliste.

Enfin, dans une logique identique à celle qui a présidé à la définition du scénario d'évolution normale et ses études de sensibilité, on prend également en considération la possibilité que la migration des radionucléides se produise en présence de quantités importantes de gaz de corrosion. On rappelle que cette situation est en principe incompatible avec le relâchement par les colis de déchets vitrifiés et les combustibles usés. On traite cependant une étude de sensibilité dans laquelle un transitoire hydraulique « forcé » par les gaz se superpose au transitoire thermique, pendant les 10 000 premières années. Ce transitoire est supposé correspondre à l'accumulation maximale de gaz pression.

Le transitoire hydraulique est modélisé selon les mêmes modalités qu'en scénario d'évolution normale (voir paragraphe 5.4.6.3) dans le calcul de sûreté, par rapport à celles issues des modélisations conceptuelles. Comme on verra que le défaut de colis de combustible usés CU1 est celui qui engendre le plus d'impact et que cet impact est dû à l'iode 129, ce calcul n'est conduit que sur ce cas, enveloppe des autres. On rappelle que la modélisation adoptée n'est pas réaliste, dans la mesure où elle revient à considérer que de l'eau se « crée » dans les zones en pression de manière à maintenir en permanence la saturation.

La perméabilité des scellements peut être un paramètre important ; on rappelle qu'elle est faible dans le calcul de référence (le corps de scellement a une perméabilité de 10^{-11} m/s et l'ouvrage n'est ancré que dans la zone fracturée, ce qui conduit à une perméabilité en grand du scellement de 10^{-9} m/s). Aussi, pour évaluer le degré de conservatisme de cette hypothèse, on a effectué deux études complémentaires prenant en compte :

- une perméabilité dépendant du taux de saturation dans les ouvrages,
- une perméabilité des ancrages équivalents des scellements de l'ordre de 10^{-10} m/s au lieu de 10^{-9} m/s.

A l'instar de ce qui est modélisé en SEN, les alvéoles contenant les colis défaillants sont situées près de la sortie de la zone de stockage la plus proche des puits ; cette configuration permet d'une part de minimiser la distance entre la zone de colis défaillants et les puits, d'autre part de maximiser de l'influence hydraulique des galeries de stockage situées en amont.

Pour mesurer l'effet combiné du transitoire hydraulique et d'un nombre plus important de colis défaillants, on a également envisagé le cas très peu réaliste où tous les colis de combustibles usés seraient défaillants.

7.3.2 Traitement du scénario

Le scénario « défaut de colis » ne se distingue du SEN que par un nombre de colis défaillant plus important et par conséquent une quantité d'activité relâchée prématurément plus élevée [106].

La défaillance prématurée des enveloppes de déchets C et de combustibles usés affecte deux des trois fonctions de sûreté :

- d'une part, la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » dans la mesure où l'arrivée d'eau sur les déchets pendant le transitoire thermique peut être préjudiciable vis-à-vis de la cinétique de relâchement. C'est notamment le cas des déchets C où la cinétique de relâchement croît significativement avec la température ;
- d'autre part, sur la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ». En effet, dans la mesure où les paramètres de transport ou de rétention des radionucléides dans un environnement à forte charge thermique et fort gradient de température sont moins favorables et/ou moins bien appréhendés, les paramètres retenus durant le transitoire thermique sont plus défavorables que ceux retenus à long terme pour la diffusion ainsi que la sorption de certains éléments.

Dans un premier temps sont analysées les performances des fonctions de sûreté qui ont été affectées par la défaillance prématurée des conteneurs et surconteneurs. Les résultats de l'impact sont présentés dans un second temps.

7.3.2.1 Représentation des colis défaillants et de leur environnement

Hormis le nombre de colis défaillants, la représentation des colis, les modèles de relâchement, de transport et de rétention chimique des radionucléides sont identiques à ceux retenus en SEN. L'effet des différentes perturbations, en particulier la perturbation thermique est également traité de manière similaire. Les colis défaillants sont supposés « disparaître » au bout de 200 ans de décroissance des radionucléides.

La défaillance prématurée des surconteneurs de déchets C engendre une dégradation des performances associées au relâchement du verre. A priori, au moment où commence la dissolution, un régime diffusif est instauré au sein de l'alvéole, et le modèle fondé sur la vitesse résiduelle de dissolution ($V_0.S \rightarrow V_r$) est applicable, au moins pour les verres pour lesquels il a pu être observé expérimentalement. Cependant, afin d'augmenter le relâchement de manière conservatrice, dans le cadre du SEA, on retient systématiquement les termes sources les plus forts (correspondant à un modèle $V_0.S$ pour l'ensemble des déchets vitrifiés). Une vitesse initiale plus forte tient compte de l'effet de la température.

Du fait de ces choix, le relâchement de l'activité contenue dans les colis défaillants s'effectue sur une période de 200 ans pour tous les types de colis, au lieu de 3 000 ans environ pour les colis types C0 non défaillants et de l'ordre de 100 000 ans pour les colis C1/C2 et C3/C4 non défaillants.

De même, pour prendre en compte l'effet d'un relâchement plus précoce, on retient une dégradation des performances associées à la matrice de combustible pour les conteneurs défaillants. Ainsi, à titre d'exemple, le relâchement de l'activité de l'iode 129 contenue dans les colis défaillants s'effectue sur une période de 4 000 ans environ au lieu de 40 000 ans pour les colis types non défaillants. Les fractions labiles sont les mêmes que pour les colis non défaillants.

L'effet de la température est pris en compte pour la diffusion dans les cas où un transfert est envisagé dans un milieu à forte charge thermique. Ce dernier est représenté comme en scénario d'évolution normale, en moyennant le coefficient de diffusion dans trois sous unités thermiques du Callovo-Oxfordien et dans une zone constituée par les ouvrages et l'EDZ. Dans chacune de ces zones, il est défini un facteur correctif du coefficient de diffusion effectif évalué à 20°C, en fonction du temps. La Figure 5.3-12 (page 251) illustre l'évolution dans le temps du facteur correctif des combustibles usés CU1 appliqué au coefficient de diffusion effectif à 20°C pour la prise en compte de la température. Les facteurs correctifs sont ensuite présentés pour les autres colis-types sur la Figure 5.3-13 (page 251).

L'élévation de température engendre une augmentation plus importante du coefficient de diffusion que de la perméabilité. Ainsi, quand la température augmente, on tend à accroître la diffusion par rapport à la convection. Le transport s'effectuant déjà par diffusion dominante dans la barrière géologique, une augmentation de la perméabilité du Callovo-Oxfordien durant le transitoire thermique n'a alors a priori pas d'influence sur le débit molaire sortant de la formation hôte, le système restant en régime diffusif dominant. Pas souci de simplification des calculs, l'effet de la température sur la perméabilité n'a donc pas été considéré pour l'évaluation du transport des radionucléides dans la barrière géologique.

Comme en scénario d'évolution normale, il n'est pas retenu de facteur correctif pour représenter l'effet de la température sur la solubilité des éléments dans la mesure où aucun effet significatif n'a été observé expérimentalement [21]. Pour la sorption, la démarche a consisté à retenir un facteur correctif réversible du coefficient de partage de 0,1 pour le césium et par analogie pour le béryllium ainsi que le calcium tant que l'élévation de température du milieu est supérieure à 20°C. Le découpage du Callovo-Oxfordien et des ouvrages en quatre ensembles tels que considérés pour le calcul du facteur correctif du coefficient de diffusion est conservé ; les durées de retour à un différentiel de température inférieur à 20°C par rapport à la température initiale sont cependant identiques pour chacune de ces zones. Elles sont présentées dans le Tableau 7.3-1.

Date où l'élévation de température redevient inférieure à 20°C				
C2	C4	CU1	CU2	C0
3 500 ans	5 000 ans	15 000 ans	15 000 ans	1 000 ans

Tableau 7.3-1 *Date à laquelle l'élévation de température devient inférieure à 20°C – Alvéole de déchets C, de combustibles usés CU1 et CU2 (dans le modèle thermique conservatif à deux dimensions)*

7.3.3 Effets sur les fonctions de sûreté

Les effets du défaut de colis sur la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » sont traduits par la diminution des durées de vie des colis, qui sont de fait quasi-labiles au regard des temps de transfert dans le reste du système de stockage. On ne s'intéresse donc ici qu'aux indicateurs de performances de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides ».

Les principaux enseignements de cette étude, en ce qui concerne la masse et le débit molaire sortant du Callovo-Oxfordien sont illustrés par le cas des défauts de conteneurs de CU1. Ils sont de nature similaire dans le cas des déchets vitrifiés.

- Par rapport au SEN, la défaillance prématurée d'un plus grand nombre de surconteneurs ou conteneurs engendre un relâchement d'une quantité d'activité plus importante dans un environnement thermique où les performances de confinement du Callovo-Oxfordien sont moins favorables. Néanmoins la durée du transitoire thermique est suffisamment courte et le nombre de colis défaillants relativement limité par rapport au nombre de colis non défaillants pour que la masse restant confinée dans le Callovo-Oxfordien soit identique en SEA défaut de colis et en SEN. Pour les principaux contributeurs à l'impact :
 - ✓ 20 % à 30 % de la masse d'iode 129 restent confinés dans le Callovo-Oxfordien,
 - ✓ 65 % à 75 % de la masse de chlore 36 restent confinés dans le Callovo-Oxfordien,
 - ✓ 90 % à 95 % de la masse de sélénium 79 restent confinés dans le Callovo-Oxfordien.
- Sur les 10 000 premières années, le débit molaire sortant du Callovo-Oxfordien pour les trois principaux contributeurs à l'impact est plus important en SEA « défaut de colis » qu'en SEN (voir Figure 7.3-1), puisque dans un cas comme dans l'autre il est dû aux colis défaillants. Il y a proportionnalité directe entre l'inventaire défaillant et le débit molaire, soit un facteur 30 dans le

cas des combustibles usés CUI⁹³. Plus tardivement, dès lors que la contribution associée à la fraction d'activité émise par les colis non défaillants apparaît, les courbes de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien sont confondues. Ces résultats s'expliquent par deux points :

- ✓ le nombre de colis défaillants reste très inférieur au nombre total de colis,
- ✓ la perturbation thermique (modification des paramètres de transfert et de rétention), de durée relativement limitée au regard des longs temps caractéristiques de diffusion dans les argilites du Callovo-Oxfordien, n'a pas d'influence significative sur les relâchements en sortie de formation hôte.

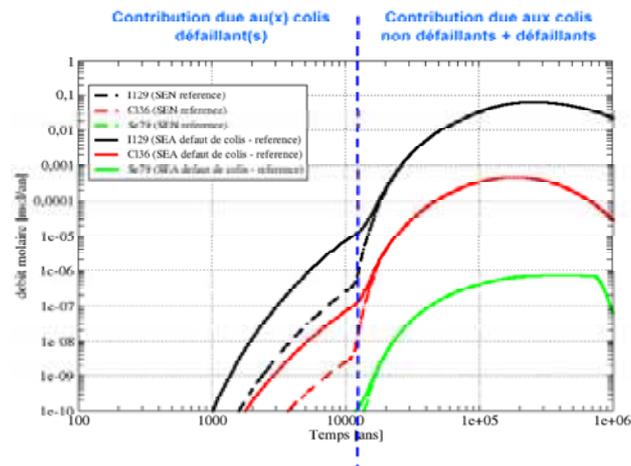


Figure 7.3-1

SEA défaut de colis - Courbes de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien – comparaison ¹²⁹I, ³⁶Cl et ⁷⁹Se entre la situation SEN (colis défaillant) et SEA défaut de colis (référence – 30 colis défaillants) – combustibles usés CUI

7.3.4 Calculs d'impact

Comme pour le SEN, le calcul de l'impact est évalué après transfert des radionucléides dans le Dogger et les encaissants sus-jacents jusqu'aux exutoires potentiels pour les modèles à l'actuel et à un million d'années (voir paragraphe 5.3.2.1).

La Figure 7.3-2 donne une coupe horizontale dans les horizons Hp1-Hp4 (Oxfordien) des concentrations de l'iode 129 des CUI. Elle met en évidence, en accord avec les courbes de débits molaires présentées sur la Figure 7.3-1, l'image de la zone de colis défaillant, visible à très faibles concentrations jusqu'à 30 000 ans, avant d'être masquée par la contribution des colis non défaillants.

⁹³ On notera que les courbes font apparaître des débits molaires en sortie de la formation hôte très tôt (dès 1000 ans). Il convient de ne pas se laisser induire en erreur par l'échelle logarithmique adoptée. L'équation de diffusion étant une exponentielle, elle permet de calculer un débit sortant de la formation hôte, extrêmement faible, dès l'instant qui suit le relâchement des radionucléides. Un tel calcul n'a pas de sens physique. Dès que les débits deviennent plus significatifs, le calcul est en revanche représentatif.

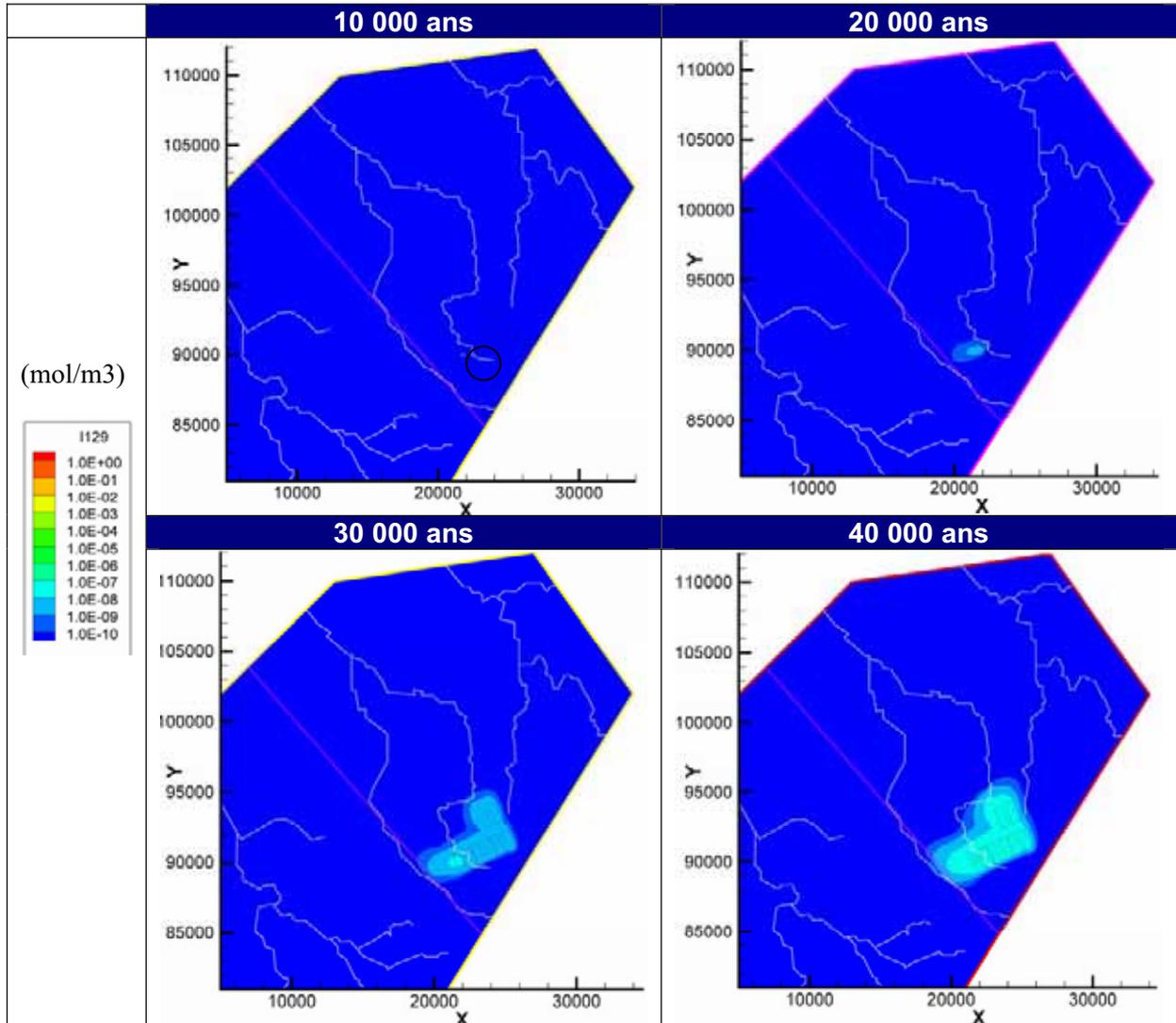


Figure 7.3-2 *SEA défaut de colis - Coupe horizontale dans Hp1-Hp4 (Oxfordien) des concentrations de l'iode 129 des CUI de 10 000 ans à 40 000 ans*

Compte tenu de sa proximité vis-à-vis du stockage et de la nature des lignes de courant, l'exutoire qui présente la dose la plus élevée est l'exutoire Saulx de l'Oxfordien. La fraction d'activité associée aux colis défaillants est masquée quelques milliers d'années après la perte d'étanchéité des conteneurs ou surconteneurs non défaillants. La dose associée aux colis défaillants est négligeable devant celle des colis performants et les résultats en terme d'impact global (voir Tableau 7.3-2) sont identiques à ceux du SEN présentés au chapitre 5.4. On les rappelle ici, pour le modèle à un million d'années (sachant que les doses sont très similaires dans le modèle à l'actuel).

Comme pour le SEN, soulignons également que l'addition des différents impacts ne rend pas compte d'une situation réelle puisqu'elle revient à compter deux fois le même inventaire (on ne peut pas avoir à la fois les verres C1/C2 et C3/C4 en quantité maximale). Quoiqu'il en soit, on verra que, même avec ce biais, les estimations globales demeurent faibles.

Colis-types	Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs
Exutoire « Saulx » (le plus pénalisant)			
Verres C1 et C2	0,00047	490 000	^{129}I ; ^{36}Cl
Verres C3 et C4	0,00036	500 000	^{129}I ; ^{36}Cl
Total verre	environ 0,00083	490 000	^{129}I ; ^{36}Cl
Combustibles usés CU1	0,019	330 000	^{129}I
Combustibles usés CU2	0,0017	340 000	^{129}I
Total des combustibles usés	environ 0,02	vers 330 000	^{129}I

Tableau 7.3-2 *SEA défaut de colis – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoires Saulx de l'Oxfordien (cas le plus pénalisant) – modèle à 1 million d'années – tous déchets*

7.3.5 Analyses de sensibilité

7.3.5.1 Sensibilité à la défaillance de l'ensemble des colis

Cette situation étudiée en sensibilité est très pénalisante et couvre toutes les situations de défaillance prématurée. Elle est également purement conventionnelle, dans la mesure où aucune cause identifiée au chapitre 6, ne peut provoquer une défaillance aussi prématurée (un siècle à peine après mise en stockage) de l'ensemble de l'inventaire. Il est en effet considéré une défaillance se traduisant par une perte d'étanchéité totale des surconteneurs de déchets C ou des conteneurs de combustibles usés à une date très pénalisante identique de ce qui est considéré dans le calcul de référence.

Les principaux enseignements de cette étude pour les combustibles usés sont les suivants :

- la masse d'iode 129 (combustibles usés CU1) sortant du Callovo-Oxfordien pendant 1 million d'années est supérieure d'environ 4 % par rapport au SEN comme illustrée sur la Figure 7.3-3. Ce faible écart résulte du fait que la durée du transitoire thermique est courte devant le temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien. Ainsi, durant cette première période, l'épaisseur moyenne parcourue dans le Callovo-Oxfordien est limitée par rapport à l'épaisseur totale de Callovo-Oxfordien ; au-delà, les radionucléides migrent à nouveau dans le Callovo-Oxfordien selon une évolution normale. Ainsi, la cinétique globale de relâchement par les argilites est très peu modifiée, l'essentiel de la masse sortant du Callovo-Oxfordien au-delà de 100 000 ans ;

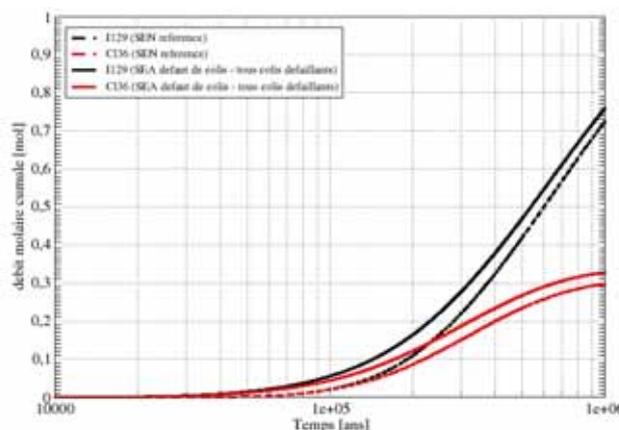


Figure 7.3-3 *SEA défaut de colis - Evolution du débit molaire cumulé en sortie de Callovo-Oxfordien – comparaison « tous colis défaillants » et SEN – combustibles usés CU1*

- on observe une augmentation, modérée cependant, du débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien. A titre d'exemple, à 100 000 ans, le débit molaire d'iode 129 sortant du Callovo-Oxfordien est deux fois plus élevé et la masse deux fois plus importante qu'en SEN ;
- le maximum de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien intervient 40 000 ans plus tôt que pour le SEN (voir Figure 7.3-4).

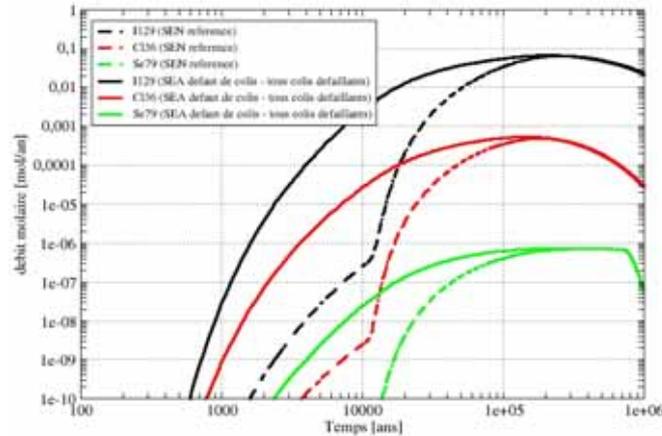


Figure 7.3-4

SEA défaut de colis - Evolution du débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien – comparaison « tous colis défaillants » et SEN – combustibles usés CUI

Pour les déchets C vitrifiés, le comportement est différent car les cinétiques de relâchement des colis défaillants deviennent courtes devant les temps de transfert diffusif. Ainsi, la quantité d'iode 129 (pour les déchets C1 et C2) relâchée par le Callovo-Oxfordien sur un million d'années est supérieure d'environ 10 % par rapport au SEN. Cet écart, plus significatif que pour les combustibles usés CUI, résulte :

- de la prise en compte d'un modèle $V_0.S$, engendrant un relâchement sur quelques centaines d'années plutôt que sur 100 000 ans ou plus en SEN. La cinétique du relâchement par les colis est masquée par le temps de transfert diffusif dans la formation hôte ;
- du relâchement prématuré des radionucléides dans un environnement chaud qui modifie légèrement la cinétique globale de transfert dans les argilites. Ce phénomène engendre une augmentation de la masse sortant du Callovo-Oxfordien sur un million d'années de 5 % pour l'iode 129 et de 6 % pour le chlore 36.

Le maximum de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien est avancé d'environ 230 000 ans pour la situation « tous colis défaillants ». L'effet prédominant est dû au passage à un modèle $V_0.S$ pour l'ensemble des déchets, les transferts en ambiance thermique n'expliquent que 30 000 ans sur ces 230 000 ans.

Les doses sont données dans le Tableau 7.3-3. Les doses maximales restent globalement inchangées par rapport à la situation de référence : néanmoins les temps d'apparition des maxima de dose sont avancés de quelques dizaines de milliers d'années pour les CUI et d'environ 200 000 ans pour les déchets C vitrifiés. On présente les doses dans le modèle hydrogéologique à 1 million d'années et pour l'exutoire le plus pénalisant, la Saulx. Les doses seraient très proches pour le modèle hydrogéologique à l'actuel (voir Figure 7.3-5 à Figure 7.3-8).

Colis-types	Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs
Exutoire « Saulx » (le plus pénalisant)			
Verres C1 et C2 (scénario S1b)	0,00066	270 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I
Verres C3 et C4 (scénario S1a)	0,00049	270 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I
Total verres	0,0012	270 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I
Combustibles usés CU1	0,019	290 000	¹²⁹ I
Combustibles usés CU2	0,0017	290 000	¹²⁹ I
Total des combustibles usés (scénario S2)	environ 0,021	vers 290 000	¹²⁹ I

Tableau 7.3-3 SEA « défaut de colis » - sensibilité tous colis défectueux - Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoires Saulx de l'Oxfordien (cas le plus pénalisant) – modèle à 1 million d'années – déchets C et combustibles usés

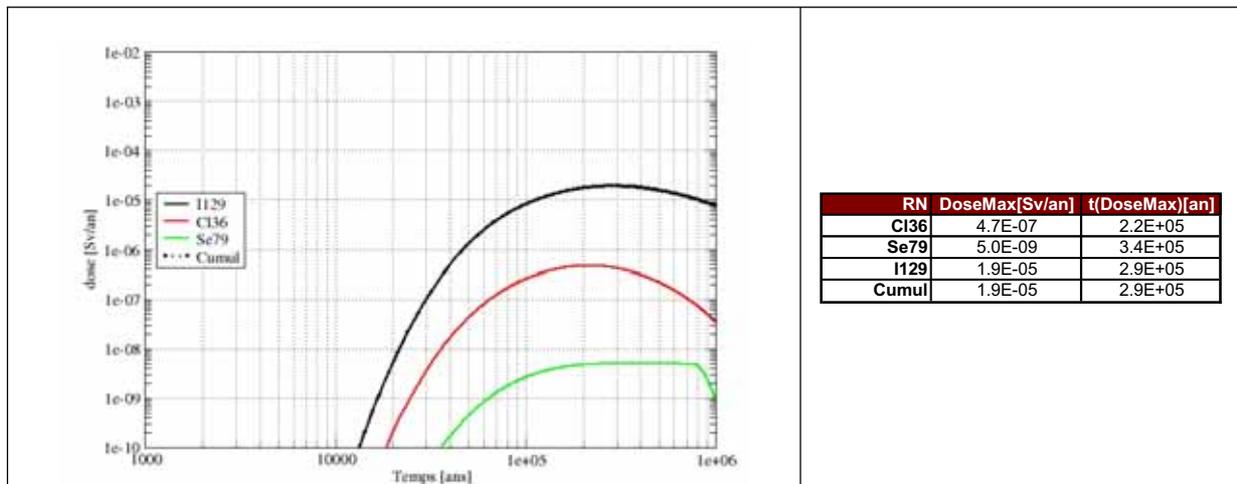


Figure 7.3-5 SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défectueux – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis type CU1

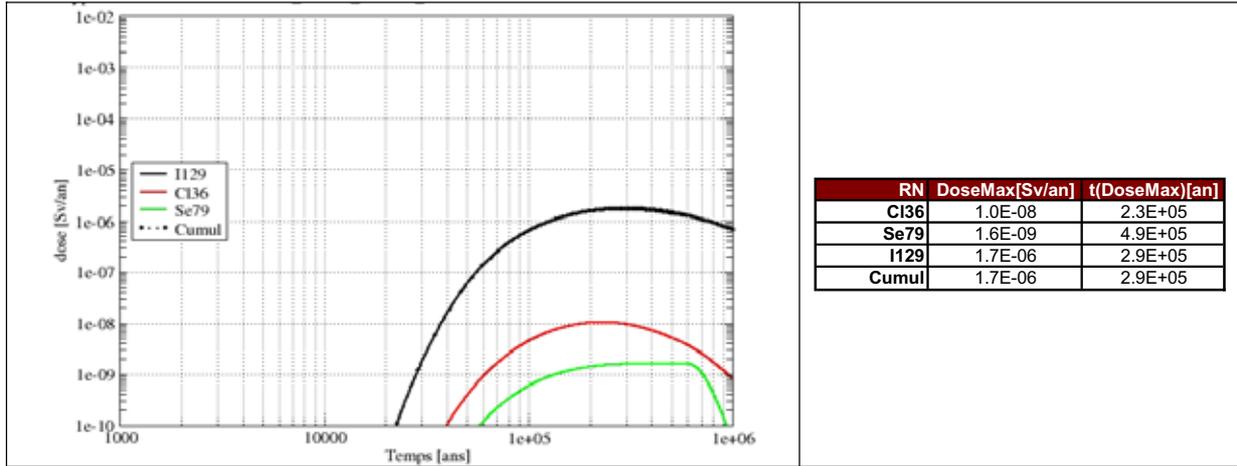


Figure 7.3-6 SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défailants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis type CU2

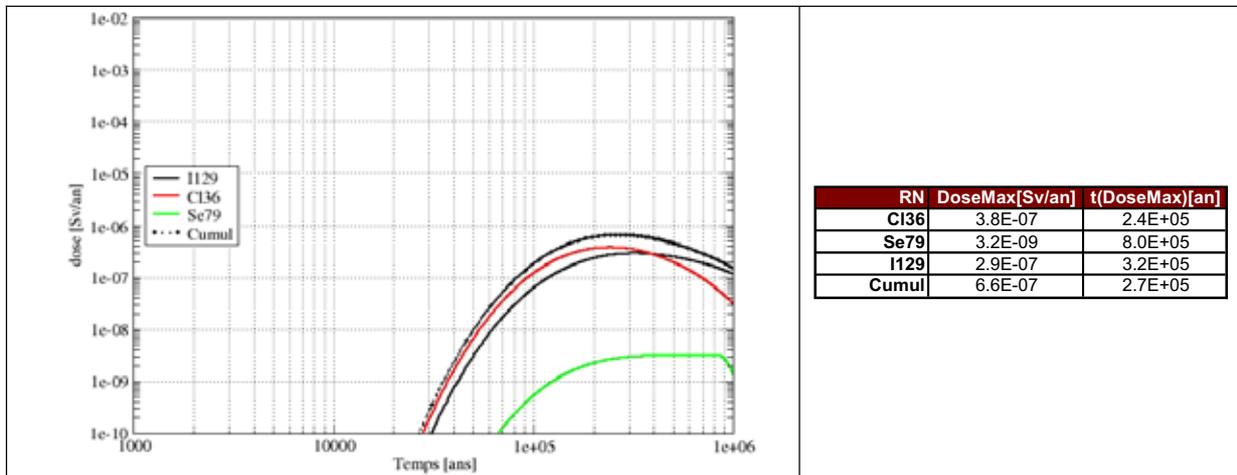


Figure 7.3-7 SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défailants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis type C1/C2

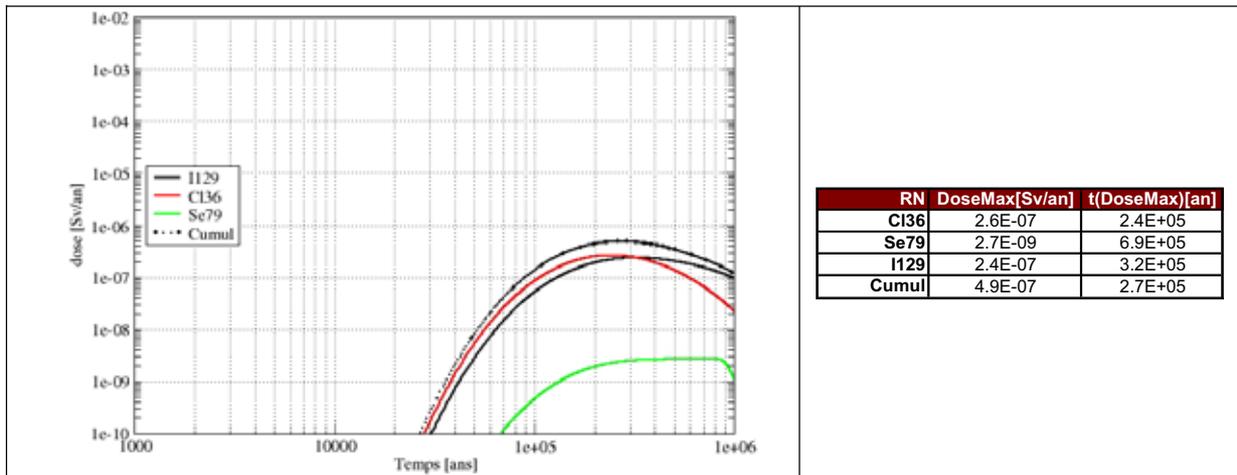


Figure 7.3-8 SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défailants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis type C3/C4

7.3.5.2 Prise en compte du transitoire hydraulique

On rappelle que ce calcul consiste à prendre en compte la possibilité d'une migration des radionucléides sous l'effet d'une pression de gaz, pendant les dix mille premières années, dans un modèle ne traduisant pas une réalité physique mais surestimant les effets. Les calculs ont été réalisés pour l'iode 129 des combustibles usés CU1 qui présente l'impact le plus important. Plusieurs cas ont été évalués et sont rappelés ci-après.

Cas traités	N° de page
30 conteneurs de combustibles usés CU1 défaillants Milieu totalement resaturé Coupure hydraulique équivalente des scellements de galeries de 10^{-9} m/s Calcul mené pour la voie de transfert « barrière géologique » et « ouvrages »	Page 524
Sensibilité au nombre de colis défaillants : tous colis défaillants Calcul mené pour la voie de transfert « ouvrages »	Page 526
Sensibilité au taux de saturation des ouvrages (influence du taux de saturation sur la perméabilité des ouvrages) Calcul mené pour la voie de transfert « ouvrages »	Page 527
Sensibilité à la perméabilité des ancrages équivalents des scellements (10^{-10} m/s au lieu de 10^{-9} m/s) Calcul mené pour la voie de transfert « ouvrages »	Page 528

Tableau 7.3-4 *SEA défaut de colis – Etude de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – synthèse des cas traités*

- **Cas de base**

Transferts par la formation hôte

Comme dans le SEN, les résultats mettent en évidence que les surpressions dues à la production de gaz durant le transitoire hydraulique n'ont pas d'influence sur le débit molaire de l'iode en sortie de Callovo-Oxfordien. La durée du transitoire est suffisamment courte devant le temps de transfert dans la barrière géologique pour qu'elle n'augmente pas significativement le débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien (voir Figure 7.3-9). A fortiori, l'influence du transitoire hydraulique est négligeable sur l'impact.

Ceci valide le choix de ne plus traiter que la voie de transfert par les ouvrages, dans la suite des calculs.

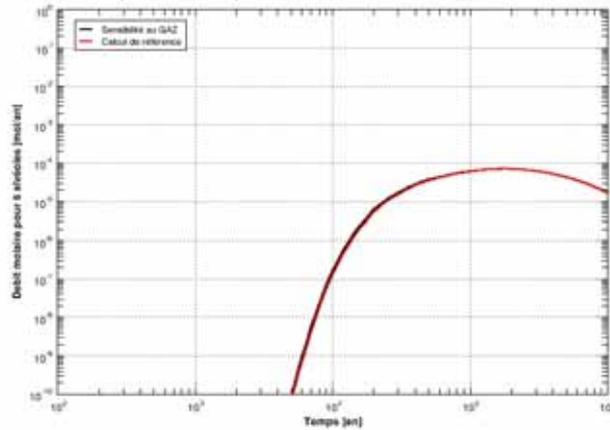


Figure 7.3-9

SEA défaut de colis - calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historiques de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien pour un motif de 6 alvéoles de CUI - comparaison des cas avec et sans surpressions hydrauliques (¹²⁹I)

Transferts par les galeries

Le modèle étant le même, les résultats relatifs aux écoulements sont identiques à ceux présentés en SEN pour la sensibilité au transitoire hydraulique (voir paragraphe 5.4.6.3)

Rappelons que les colis défaillants ont été positionnés près de la sortie de la zone la plus proche des puits ; cette configuration permet d'une part de minimiser les temps de transfert convectifs dans les galeries de liaison jusqu'au scellement de zone puis jusqu'au puits, d'autre part de favoriser la voie de transfert par les ouvrages pendant les 10 000 premières années durant lesquelles les pressions de gaz provenant de tout le stockage en amont sont influentes. Les résultats mettent en évidence que la majeure partie de la masse contenue dans les colis défaillants emprunte la voie de transfert par les ouvrages (environ 80 % de la masse initiale atteint les galeries d'accès).

Les courbes d'historique de débit molaire présentées sur la Figure 7.3-10 mettent en évidence l'influence des pressions de gaz sur la voie de transfert par les ouvrages ; en effet, on note que :

- l'influence du gaz, dans les conditions de modélisation retenues, a pour conséquence d'augmenter d'un facteur 70 le maximum de débit molaire en sortie de puits et d'avancer d'environ 500 000 ans la date du maximum par rapport à une situation négligeant ce transitoire. L'essentiel de la quantité d'iode 129 provient de la fraction de colis défaillants, même au-delà du transitoire de surpression hydraulique. Notons néanmoins que la quantité d'iode 129 relâchée par les puits pendant un million d'années n'est multipliée que par un facteur six par rapport à ce qu'elle est en SEN (alors qu'il y a trente fois plus de colis défaillants dans le SEA) ;
- pendant les 10 000 premières années où les surpressions hydrauliques sont effectives, le débit molaire en sortie de puits est supérieur à celui issu du transfert par les argilites saines, (ce que l'on n'observait pas en SEN) ; au-delà, il devient inférieur. En tout état de cause, le débit molaire sortant des puits reste faible sur toutes les phases de temps et le maximum de débit molaire sortant des puits, atteint aux alentours de 300 000 ans, est environ cinq ordres de grandeurs plus faible que celui sortant du Callovo-Oxfordien.

Ces résultats montrent que l'importance de la voie de transfert par les ouvrages reste inférieure à celle de la voie de transfert par la barrière géologique. La masse sortant des puits sur la durée totale de l'analyse demeure faible par rapport à la masse totale sortant par la barrière géologique.

On note néanmoins que le débit molaire sortant des puits peut être légèrement plus important que celui sortant par la barrière géologique pendant les 10 000 premières années. Les niveaux des doses maximales ne sont pas dépendants de cette fraction d'activité et sont pilotés par la masse sortant par les argilites saines, dont le débit molaire n'est pas influencé par les surpressions.

Ainsi, dans le cas d'un défaut de colisage prématuré d'une fraction de colis de combustibles usés CUI, associé à un jeu d'hypothèses pénalisantes, la prise en compte d'une surpression hydraulique transitoire, due à la génération de gaz, n'a donc pas d'influence significative sur les impacts radiologiques. Les niveaux de doses maximales restent identiques à ceux du calcul de référence.

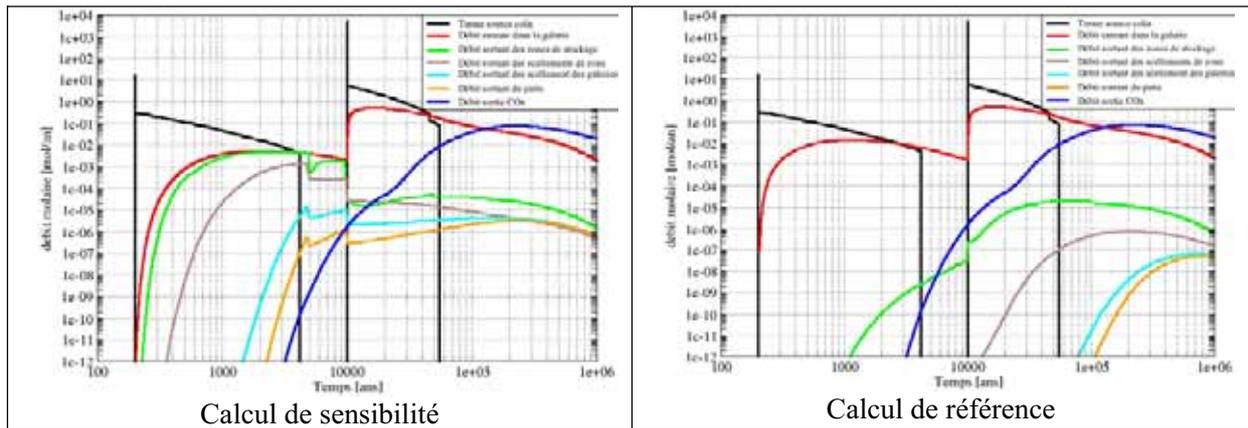


Figure 7.3-10 SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – ^{129}I – combustibles usés CUI.

● Sensibilité au nombre de colis défaillants – Voie de transfert par les ouvrages

Cette situation conventionnelle consiste à considérer une défaillance prématurée de tous les conteneurs de combustibles usés à 200 ans. Les pressions de gaz sont donc susceptibles d'engendrer un cheminement préférentiel par les ouvrages des radionucléides présents dans tous les colis.

Les résultats de calcul hydraulique sont identiques à ceux du calcul de référence.

En ce qui concerne le transport au travers des ouvrages de stockage, les courbes d'historique de débit molaire présentées sur la Figure 7.3-11 mettent en évidence que :

- le débit molaire maximal en sortie de puits, via le transfert dans les ouvrages, n'est augmenté que d'un ordre de grandeur entre la situation « fraction défaillante seule » et « tous colis défaillants » alors que la masse potentiellement mobilisable est 450 fois plus importante. Cette faible différence est due au fait que la masse sortant du puits provient essentiellement des alvéoles du premier module de chaque zone de stockage. Les autres modules plus éloignés des puits, soumis à une pression hydraulique amont plus faible et isolés des puits par un ou plusieurs scellements de modules supplémentaires, ont une contribution extrêmement limitée ;
- durant la phase où les surpressions sont importantes (environ 5000 ans), les deux voies de transfert restent co-dominantes ; néanmoins, les débits molaires en sortie de puits et de Callovo-Oxfordien sont faibles (facteur 10 000 environ) par rapport au maximum de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien survenant aux alentours de 200 000 ans. Notons que le débit molaire maximal sortant des puits reste dans tous les cas nettement inférieur à celui en sortie de Callovo-Oxfordien.

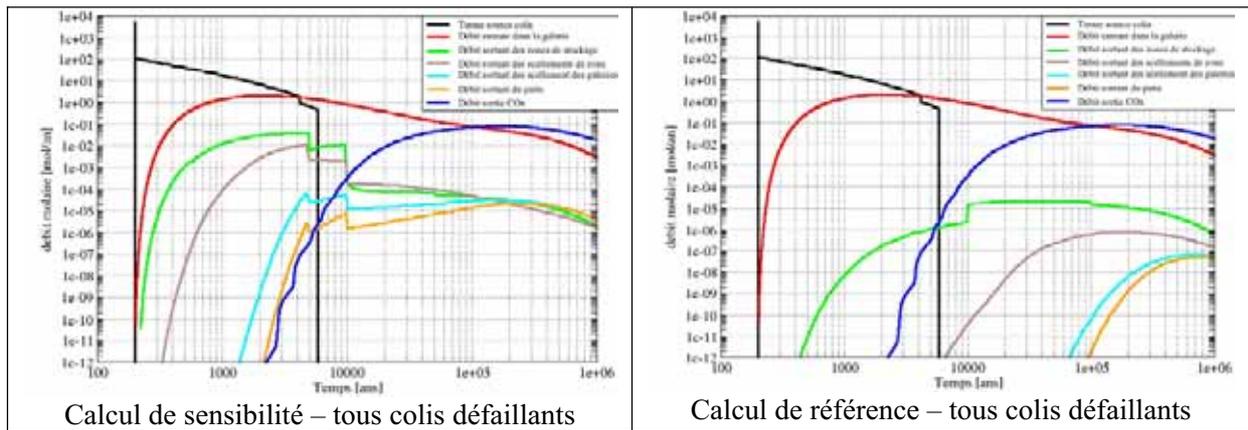


Figure 7.3-11 SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – cas tous colis défaillants- ¹²⁹I – combustibles usés CUI.

Ainsi, dans le cas où tous les conteneurs de CUI seraient défaillants prématurément, la prise en compte d'une surpression hydraulique transitoire, due à la génération de gaz, n'a pas d'influence forte sur les impacts radiologiques. Les niveaux des doses maximales restent identiques à ceux du calcul de référence.

● Sensibilité au taux de saturation des ouvrages – Voie de transfert par les ouvrages

Cette étude consiste à évaluer l'influence du taux de saturation sur le transport convectif (en particulier sur la perméabilité) dans les ouvrages de stockage. Rappelons que, dans le cas de base, les ouvrages sont supposés saturés en eau dès l'instant initial, ce qui confère au calcul un caractère pénalisant, notamment vis-à-vis du transfert convectif dans les galeries et leur EDZ.

La saturation effective (S_r) (appelée taux de saturation par la suite) a été évaluée, en fonction en particulier du taux de production d'hydrogène, dans les remblais, la bentonite des scelllements de galerie, les zones fracturée et microfissurée de l'EDZ. On se fonde sur les évaluations issues des modèles conceptuels, qui mettent en évidence les taux de saturation suivants : de l'ordre de 70 % dans le remblai, de 95 % dans l'EDZ fracturée et de 97 % dans l'EDZ microfissurée et la bentonite pendant les 5000 premières années où la production d'hydrogène est relativement importante. Au-delà et jusqu'à 100 000 ans où la production d'hydrogène est moindre, les degrés de saturation sont les suivants : 90 % dans le remblai, 97 % dans l'EDZ fracturée et 100% dans l'EDZ micro fissurée et la bentonite. Ces valeurs sont également valables pour les galeries de liaison principales. Après 100 000 ans, tous les matériaux sont saturés à 100 %.

La perméabilité $K(S_r)$ a alors été évaluée en fonction du taux de saturation, dans les quatre types de matériaux cités précédemment, à partir de la loi de Van Genuchten [61]. Le Tableau 7.3-5 donne le coefficient correctif appliqué à la perméabilité de chacun des composants en suivant le découpage temporel cité précédemment.

	Remblai	EDZ fracturée	EDZ micro fissurée	Bentonite
De 0 à 5 000 ans	3.10^{-2}	0.3	0.4	0.4
De 5 000 à 100 000 ans	0.2	0.4	1	1
Au delà de 100 000 ans	1	1	1	1

Tableau 7.3-5 Coefficient de correction appliqué à la perméabilité pour les galeries de liaison principales et les galeries des zones de stockage de combustibles usés

Les historiques de débit molaire fournis sur la Figure 7.3-12 permettent de comparer les résultats avec et sans prise en compte de l'influence du taux de saturation des ouvrages sur la valeur de la perméabilité. Ils mettent en évidence que :

- sur les 10 000 premières années correspondant au transitoire hydraulique et à un faible degré de saturation des ouvrages, le débit molaire sortant des puits est significativement plus faible que dans le cas de base (cinq ordres de grandeur environ). La lenteur des transferts dans les galeries non saturées favorise les échanges avec la barrière géologique ;
- au-delà de 10 000 ans et jusqu'à 100 000 ans, la saturation n'étant pas totale, le débit molaire en sortie de puits reste inférieur au cas de calcul « resaturé dès l'origine » ;
- le débit molaire maximal survient aux alentours de 250 000 ans. A cette date, la saturation est totale mais la fraction d'activité présente dans les ouvrages durant les phases antérieures étant moindre que dans le case de calcul « resaturé dès l'origine », le maximum de débit molaire en sortie de puits est plus faible d'un ordre de grandeur.

Ce point permet de quantifier le caractère extrêmement pénalisant des calculs considérant un milieu totalement saturé durant le transitoire hydraulique.

Comme pour le cas de base, la voie de transfert par la barrière géologique reste largement dominante pendant la phase de surpression hydraulique avec un débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien supérieur d'environ cinq ordres de grandeur par rapport au débit en sortie de puits. Le maximum de dose n'est donc pas modifié.

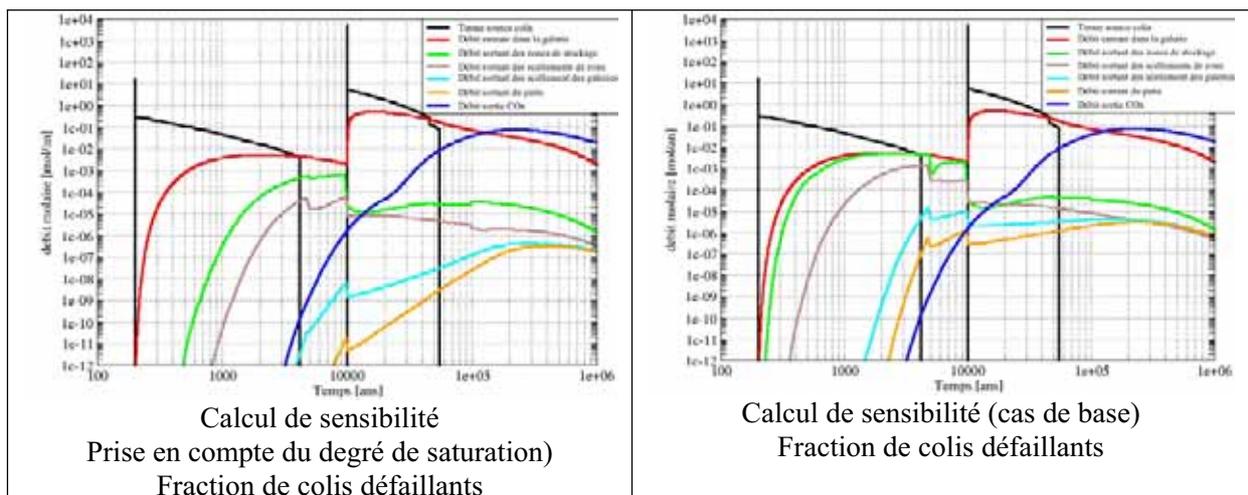


Figure 7.3-12

SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – prise en compte du degré de saturation des ouvrages sur la valeur de la perméabilité - ^{129}I – combustibles usés CUI.

● Sensibilité à la perméabilité des ancrages équivalents des scellements – Voie de transfert par les ouvrages

Cette étude consiste à considérer une perméabilité équivalente de l'ancrage des galeries de 10^{-10} m/s au lieu de 10^{-9} m/s (voir chapitre 5 paragraphe 5.3.2.2). On suppose que tous les milieux sont saturés.

Les historiques de débit molaire fournis sur la Figure 7.3-13 permettent de comparer l'influence de la prise en compte d'une perméabilité des ancrages équivalents des scellements de galerie plus faibles. Ils mettent en évidence que :

- pendant les phases de surpression dues au gaz, la prise en compte d'une perméabilité plus faible des ancrages équivalents permet de réduire d'environ trois ordres de grandeurs les débits molaires en sortie de scellement de galerie (à la base des puits) ;

- au-delà, le débit molaire en sortie de puits reste plus faible. Le débit molaire maximale survient aux alentours de 250 000 ans et est diminué d'environ un ordre de grandeur par rapport au cas de base (considérant une perméabilité équivalente des ancrage de scellement de 10^{-9} m/s) ;
- de même que pour les autres cas, la voie de transfert par la barrière géologique reste largement dominante pendant la phase de surpression hydraulique avec un débit molaire maximal en sortie de Callovo-Oxfordien supérieur d'environ 4 à 5 ordres de grandeur par rapport au débit maximal en sortie de puits.

Ce calcul complète les constats précédents, qui montrent le rôle des scellements pour limiter l'influence d'un défaut de colis couplé à un transitoire hydraulique défavorable.

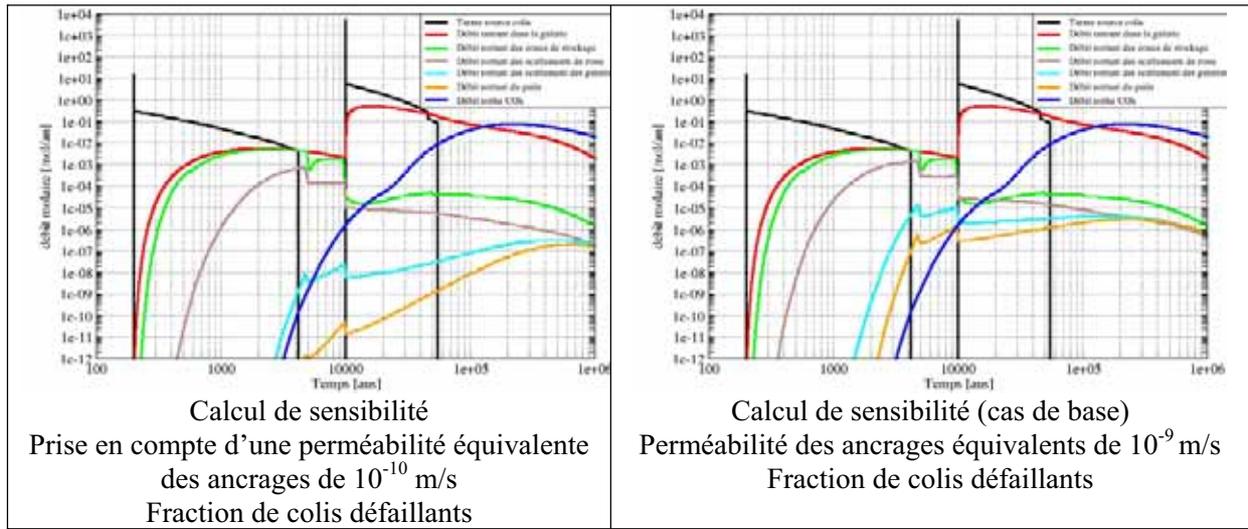


Figure 7.3-13

SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – prise en compte de la perméabilité de l'ancrage équivalent des scellements de 10^{-10} m/s - ^{129}I – combustibles usés CUI.

7.3.6 Enseignements du SEA « défaut de colis »

Le traitement du scénario défaut de colis met en évidence que la défaillance prématurée de quelques conteneurs ou surconteneurs n'induit pas de modification de l'impact global du stockage. L'effet d'un relâchement prématuré de radionucléides sur la fonction de retard et d'atténuation est faible car la durée du transitoire thermique est courte devant le temps de transfert global dans la barrière géologique. Par ailleurs, l'effet de la température sur les paramètres de transport et de rétention dans les ouvrages semble également limité au stade actuel des connaissances. Les éléments dont le coefficient de partage diminue avec l'élévation de température restent malgré tout suffisamment sorbés dans les ouvrages et la barrière géologique pour ne pas contribuer à l'impact global.

La situation extrêmement pénalisante de défaillance de l'ensemble des conteneurs et surconteneurs montre une influence sur la masse et les débits molaires en sortie de Callovo-Oxfordien ; cet effet est plus particulièrement visible pour les déchets C où l'influence du modèle de relâchement dégradé induit une apparition plus précoce des maxima de débit molaire. Même en cas de défaillance de tous les conteneurs, la barrière géologique joue encore un rôle important. En effet, malgré des dates d'apparition des maxima de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien plus précoces de quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années, l'occurrence de ces derniers reste lointaine (au-delà de la centaine de milliers d'années). L'augmentation de la dose par rapport au SEN est négligeable.

L'effet du transitoire hydraulique a été étudié en sensibilité, bien qu'on ne s'attende pas, en référence, à ce que des relâchements soient possibles pendant que les alvéoles sont soumises à la pression de gaz.

Les résultats mettent en évidence que, même modélisés de façon pénalisante, les gaz n'ont pas d'influence significative sur la voie de transfert par la barrière géologique. Les surpressions augmentent en revanche de manière significative la contribution de la voie de transfert par les ouvrages, sous les hypothèses conservatives considérées. Cette voie de transfert reste malgré tout négligeable au total. Les résultats des études complémentaires ont montré qu'un nombre de colis défaillants plus importants ne crée pas une augmentation de l'impact par la voie de transfert « ouvrages » dans le même rapport, les colis les plus proches de la sortie de zone étant ceux qui contribuent le plus. Des calculs prenant en compte la dépendance de la perméabilité à la saturation du milieu montrent également que l'hypothèse d'un stockage initialement resaturé est bien une hypothèse pénalisante.

On notera que l'influence de la thermique sur le transport dans la roche a été prise en compte dans ces calculs en s'appuyant sur les meilleures connaissances disponibles. Ce domaine est cependant encore incomplètement maîtrisé, et des incertitudes importantes pèsent sur les coefficients de diffusion et les coefficients de partage à des températures élevées. Les résultats du scénario montrent que l'on n'attend pas d'effet majeur du transport en ambiance thermique, dans la mesure où les radionucléides non sorbés demeurent les contributeurs majoritaires à l'impact, et où le coefficient de diffusion ne connaît qu'une augmentation relativement limitée. Cependant, la présence de conteneurs et de surconteneurs pour gérer les incertitudes sur le transport en ambiance thermique est une disposition de conception adaptée dans l'état actuel des connaissances.

7.4 Le scénario « forage »

Ce paragraphe définit les situations découlant de la réalisation d'un forage dans le stockage. En cohérence avec la RFS.III.2.f, deux types de situations sont considérés :

- les situations qui découlent de la remontée au cours d'un forage de carottes, débris ou cuttings de déchets. Pour ces situations l'impact radiologique est immédiat. Il résulte de l'irradiation externe du ou des travailleurs à l'origine de l'intrusion. L'étude de l'impact de ces situations permet notamment de répondre à la Règle Fondamentale de Sécurité RFS.III.2.f qui précise que « *le forage exploratoire traversant le stockage avec extraction de carottes donne lieu à une exposition externe qui doit être évaluée* » ;
- les situations résultant de l'abandon d'un ou plusieurs forages. Ce(s) dernier(s) crée(nt), en fonction de sa (leur) localisation par rapport aux ouvrages, un court-circuit partiel ou total de la formation hôte. Ces situations, où l'impact radiologique potentiel est différé, mettent en jeu une partie des radionucléides initialement contenus dans les déchets et qui ont migré depuis le colis jusqu'à la biosphère via le forage. Les personnes potentiellement exposées à moyen ou long terme sont assimilées à des individus appartenant à un groupe critique hypothétique. La dose calculée est la dose individuelle.

L'architecture de stockage est similaire à celle définie dans le SEN (voir chapitre 5) mais l'analyse se focalise sur les éléments remontés par le forage pour les situations à impact immédiat ou la zone de stockage située dans le rayon d'influence hydraulique du forage pour les situations à impact différé ; le reste du stockage suit une évolution normale, il ne fait pas l'objet d'évaluation car son impact est couvert par les résultats du SEN. On se contentera de le rappeler par comparaison.

Les caractéristiques du forage sont établies à partir de la recommandation de la RFS.III.2.f. selon laquelle « *le niveau de technologie qui est employé est le même qu'aujourd'hui* » ; le diamètre de forage considéré correspond à l'ordre de grandeur des diamètres de forages exploratoires plausibles à des profondeurs avoisinant celles du stockage, soit de l'ordre décimétrique.

7.4.1 Situations à impact immédiat

Ce paragraphe traite de la définition et des résultats de calcul associés aux situations à impact immédiat.

7.4.1.1 Définition des situations à impact immédiat

Pour couvrir l'ensemble de ces situations, on définit un scénario selon lequel un foreur est exposé au rayonnement émis par une carotte prélevée directement au sein d'un colis de déchets.

Il est important de préciser que le stockage n'a pas vocation à protéger un éventuel intrus qui court-circuiterait, par inadvertance ou volontairement, la totalité des barrières mises en place, si tant est que l'intrusion ait effectivement lieu. Un tel risque est la conséquence inéluctable du choix de concentrer de grandes quantités de déchets au sein d'un espace relativement restreint, et le choix inverse de les disséminer largement conduirait à exposer potentiellement beaucoup plus d'individus, pour des doses individuelles qui ne seraient pas nécessairement plus faibles. Du reste, de nombreuses réglementations étrangères, écartent d'emblée la protection d'un éventuel intrus des exigences s'appliquant à un stockage de déchets de haute activité (voir par exemple [107]).

Le débit de dose de la carotte dépend de la date de l'intrusion, mais aussi de la nature des déchets interceptés. La recherche du cas majorant a nécessité de procéder à plusieurs évaluations, en prenant en compte différents colis-types.

Pour les combustibles usés, le colis retenu est le colis-type CU1, d'activité massique plus élevée que celle des colis CU2 et CU3 vis-à-vis des radionucléides responsables du débit de dose à long terme (^{94}Nb , ^{126}Sn , ^{137}Cs ...). De plus, la configuration à 4 assemblages par colis rend possible l'interception

de 2 assemblages par la même carotte, tandis que celle du colis CU2 ne permet pas d'envisager l'interception de plus d'un seul.

Pour les déchets de type C, le colis retenu est le colis-type C2, dont l'inventaire radiologique est plus pénalisant que celui du colis C1, et équivalent à celui du colis C3 vis-à-vis des radionucléides à l'origine du débit de dose à long terme. Une étude préliminaire a montré que le colis type C4 n'induirait pas de différence sensible dans les résultats.

Pour les déchets de type B, le colis retenu est le colis-type B5, susceptible du plus fort débit de dose à très long terme de par sa haute teneur en ^{94}Nb , émetteur gamma de 20 000 ans de période. Toutefois, parce qu'il contient les barres de commandes en argent-indium-cadmium des réacteurs de puissance, le colis-type B1 est très riche en $^{108\text{m}}\text{Ag}$, radionucléide également émetteur gamma dont la période vaut 418 ans. Aux échéances intermédiaires (500 à 1 000 ans), ce colis présente un débit de dose plus élevé que le colis B5, raison pour laquelle il a également été retenu.

Enfin, le cas de l'interception d'un colis contenant des sources a également été traité. Le colis B8.3 a été retenu, il s'agit un colis unique contenant l'ensemble des objets anciens au radium à usage médical utilisés jusque dans les années 1950 et collectés par l'OPRI et l'Andra. On note que ce choix est très pénalisant, la probabilité que ce colis précis soit atteint par le forage étant à peu près nulle.

7.4.1.2 Hypothèses considérées pour le calcul du débit de dose horaire des carottes

Le point de calcul du débit de dose est situé à 40 cm de la paroi de la carotte.

Les carottes sont supposées avoir un diamètre de 10 cm, valeur réaliste s'agissant d'un forage à cette profondeur, et une longueur d'un mètre. La longueur de la partie active dépend du volume de déchets au sein du colis considéré, et de la façon dont le colis est stocké. L'activité massique des parties actives est celle des déchets, déduite des inventaires de référence des colis types.

Le Tableau 7.4-1 résume les différentes configurations traitées. Les portions de déchets interceptées sont représentées en rouge.

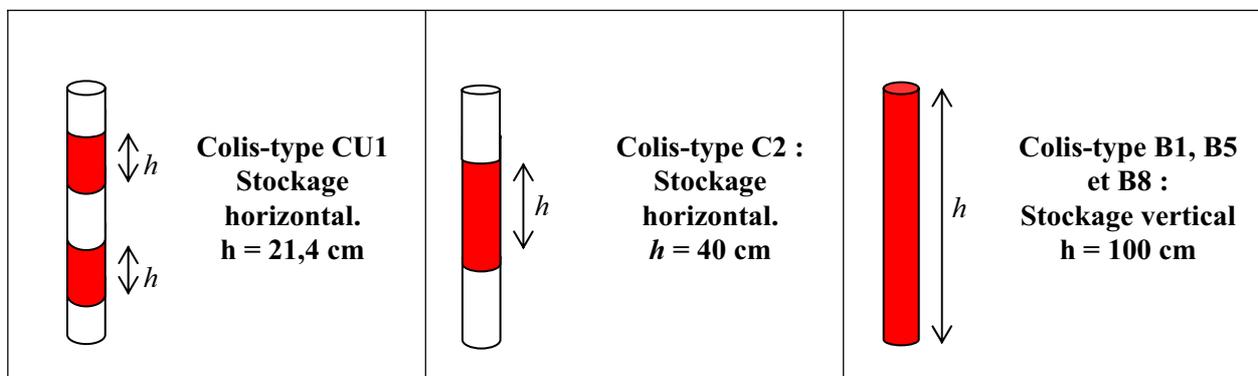


Tableau 7.4-1

SEA forage dans le stockage avec remontée de carottes de déchets - Configuration de calcul retenue pour les différents colis types traités

Encadré 9**Code d'atténuation et de transport du rayonnement utilisé pour l'évaluation de dose du foreur**

Le code d'atténuation et de transport utilisé est le code Mercure 6, développé par le Commissariat à l'Énergie Atomique. Mercure est un code d'atténuation en ligne droite, permettant de calculer un débit de dose en un ou plusieurs points et pour une ou plusieurs sources d'émission gamma. Ce code bénéficie d'un grand retour d'expérience qui a largement confirmé sa robustesse.

7.4.1.3 Résultats des calculs de débit de dose

Le graphique de la Figure 7.4-1 illustre les résultats obtenus pour les différentes échéances et les différents colis types considérés successivement. Bien que les échéances inférieures à 500 ans ne soient pas envisagées car se situant pendant la phase de surveillance institutionnelle [2], elles ont néanmoins été traitées pour mettre en évidence l'effet marqué de la décroissance radioactive sur le débit de dose des déchets. Ce sont les radionucléides à vie courte qui sont les plus irradiants, et on observe que le débit de dose des déchets diminue de plusieurs ordres de grandeurs dès les premières centaines d'années.

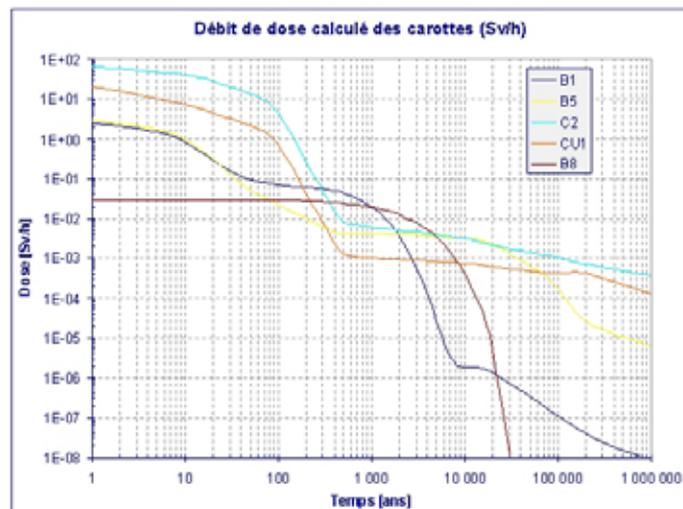


Figure 7.4-1

SEA forage dans le stockage avec remontée de carottes de déchets - Débit de dose des carottes de déchets – colis types B1, B5, C2, CU1, B8

- **Calcul de la dose délivrée au foreur**

Pour conférer à l'évaluation d'impact un caractère majorant, on suppose que l'intrusion se produit à 500 ans, c'est-à-dire dès la fin de la période de surveillance institutionnelle.

La durée d'exposition retenue est de 10 minutes, car le foreur ne manipule pas les carottes plus longtemps que le temps nécessaire à leur extraction du carottier et à leur conditionnement. Eventuellement, un géologue examinant une carotte après coup pourrait être exposé plus longtemps, mais dans l'esprit de la RFS.III.2.f qui suppose que « le niveau de technologie qui est employé [par les générations futures] est le même qu'aujourd'hui » on peut admettre qu'un scientifique prendra rapidement conscience du danger représenté par des matériaux inhabituels remontés par un forage de grande profondeur. Même si tel n'était pas le cas, les résultats montreront que considérer une durée d'exposition plus longue ne changerait pas radicalement les conclusions de l'évaluation d'impact.

Dans les conditions ainsi définies, la dose délivrée au foreur en fonction de la nature du colis intercepté est donnée par le Tableau 7.4-2 ci-dessous.

Colis intercepté	Débit de dose horaire de la carotte	Dose délivrée au foreur pour 10 min d'exposition
Colis B1	40 mSv.h ⁻¹	7 mSv
Colis B8.3	25 mSv. h ⁻¹	5 mSv
Colis C2	8 mSv.h ⁻¹	1,3 mSv
Colis B5	4 mSv.h ⁻¹	0,7 mSv
Colis CU1	1 mSv.h ⁻¹	0,2 mSv

Tableau 7.4-2 *SEA forage dans le stockage avec remontée de carottes de déchets - débit de dose délivré au foreur*

7.4.1.4 Conclusion

On observe que les impacts calculés restent limités à des valeurs inférieures à la dizaine de millisieverts. La situation la plus pénalisante est celle de l'extraction d'une carotte de colis B1, du fait de la présence en quantités importantes d'argent 108m. Celui-ci a une période relativement courte et si l'intrusion se produisait à échéance du millier d'années, les doses observées pour ce colis type ne différeraient pas de celles dues aux colis C2 ou aux combustibles usés. Une autre situation pénalisante est l'interception du colis B8.3, celui-ci contenant des objets au radium spécifiquement conçus pour délivrer des doses importantes. Pour les autres déchets, même en cas d'exposition supérieure à 10 minutes, et tant que le contact direct ne dure pas plus d'une ou deux heures, les doses reçues restent modérées.

On rappelle par ailleurs (voir chapitre 6, paragraphe 6.2.10.1) que l'exposition du foreur aux gaz contenus dans le stockage ne le soumettrait qu'à une dose de 0,03 mSv au plus, due au méthane marqué par le carbone 14. La présence éventuelle d'une surpression de gaz est par ailleurs suffisamment inattendue dans ce contexte géologique pour attirer l'attention des responsables du forage.

7.4.2 Définitions des situations à impact différé

Les situations résultant de l'abandon d'un forage dans le stockage diffèrent selon la localisation géographique et hydraulique de ce dernier (dans le Callovo-Oxfordien, dans les galeries, dans les alvéoles de stockage, ou dans les colis ; à un endroit où les gradients de charges sont ascendants ou descendants dans le Callovo-Oxfordien), sa profondeur, sa date d'occurrence et son devenir.

L'analyse préliminaire menée sur les différents cas possibles a conduit à retenir un nombre limité de situations pertinentes, enveloppes des situations de forage envisageables.

L'événement initiateur est un forage exploratoire réalisé après la perte de mémoire du stockage, soit au plus tôt 500 ans après sa fermeture. Afin de mobiliser l'inventaire radiologique maximal, on considère qu'il a lieu exactement à 500 ans.

Le forage est considéré pérenne (cas peu vraisemblable, mais enveloppe de l'impact pouvant résulter de la réalisation successive de plusieurs forages dans des zones proches). On définit pour chaque zone de stockage (B, C, CU) un emplacement « de référence » pour le forage. On choisit de le placer à proximité des colis, dans un ouvrage de diamètre suffisant pour que son interception ne soit pas trop peu probable.

Dans le cas des alvéoles de déchets C et de combustibles usés, les forages retenus en référence touchent une galerie d'accès à proximité des alvéoles pour les déchets C et les combustibles usés (sachant qu'on traitera dans les études de sensibilité le cas d'un forage interceptant une alvéole elle-même dans le cas des combustibles usés CU1). La situation de référence est représentée à la Figure 7.4-2 pour les déchets C vitrifiés. La situation relative aux combustibles usés est identique à celle des déchets C, hormis le concept de référence qui comporte un corps de barrière ouvragée.

Cette situation est quantifiée pour l'ensemble des colis de déchet C et de combustibles usés c'est-à-dire le module contenant les colis types C0, les modules contenant les colis types C1/C2 (traités ensemble le forage se situant à proximité des colis types C2), les modules accueillant les colis types C3/C4 (traités ensemble le forage se situant à proximité des colis types C4), les modules de combustibles usés CU1 et CU2.

Pour les déchets B, le forage rencontre en référence une alvéole de stockage, l'interception de celle-ci étant moins improbable car les alvéoles ont une extension plus grande. Le cas de calcul traité est représenté à la Figure 7.4-3. On traite en études de sensibilité le cas de figure d'un forage atteignant la galerie d'accès. On traite ainsi les alvéoles accueillant des colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (alvéoles de type B1x) ou les colis de boues bitumées (colis types B2), qui sont les alvéoles susceptibles d'engendrer l'impact le plus pénalisant.

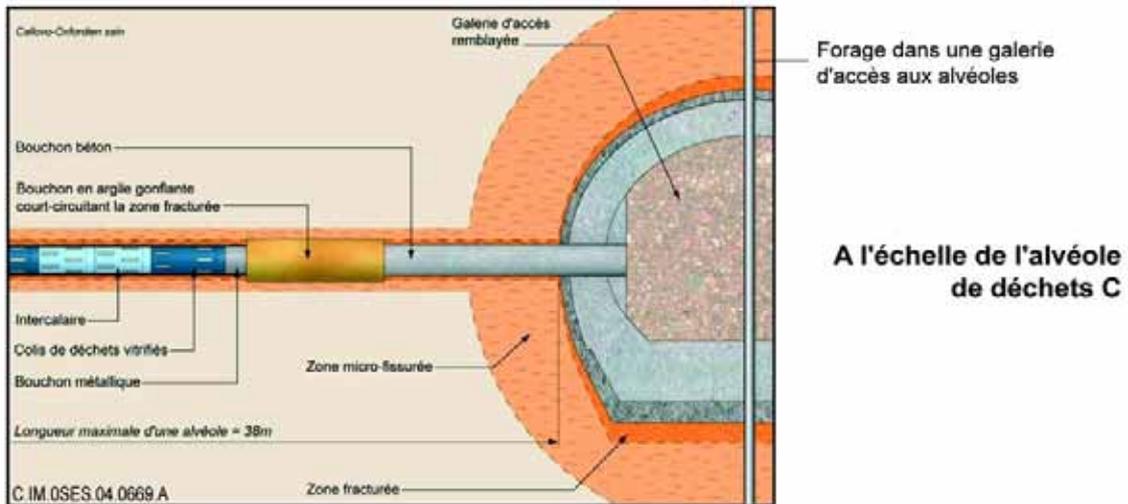
On considère que le forage atteint le Dogger. En effet, compte tenu de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, qui ne présente de plus aucune ressource naturelle exploitable, celui-ci constitue une cible encore moins probable que les formations sous-jacentes. Cependant, pour maximiser l'influence hydraulique du forage, celui-ci est supposé s'arrêter dans les horizons très peu perméables du Dogger supérieur. Par conservatisme, on ne prend de plus pas en compte les débits d'eau provenant éventuellement de cette formation et pouvant circuler dans le forage, et venir diluer les radionucléides.

Le forage exploratoire est abandonné et mal scellé. Ce forage peut :

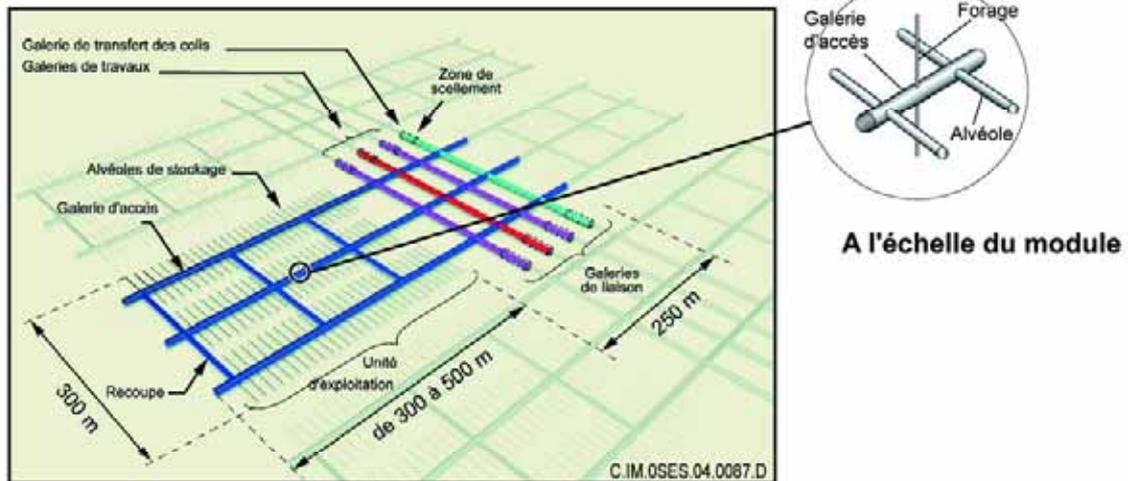
- être situé à proximité d'un pompage d'approvisionnement en eau potable (AEP) dans le Barrois ; le rabattement du pompage se transmet dans le forage. Cette disposition entraîne la création d'une voie potentielle de transfert des éléments depuis les colis jusqu'à la biosphère et l'homme en court-circuitant partiellement ou totalement les formations géologiques intermédiaires entre le stockage et la biosphère. Cette hypothèse est très pénalisante, et s'apparente à un sur-accident, dans la mesure où la coïncidence en un même lieu du forage et du pompage est un fait rare ;
- entraîner simplement la création d'une voie potentielle de transfert des éléments depuis les colis jusqu'aux encaissants sus-jacents. Une fois dans les encaissants sus-jacents, les radionucléides suivent dans ce cas une évolution cohérente avec celle considérée en SEN.

Ces deux cas de figure sont présentés en alternative l'un de l'autre.

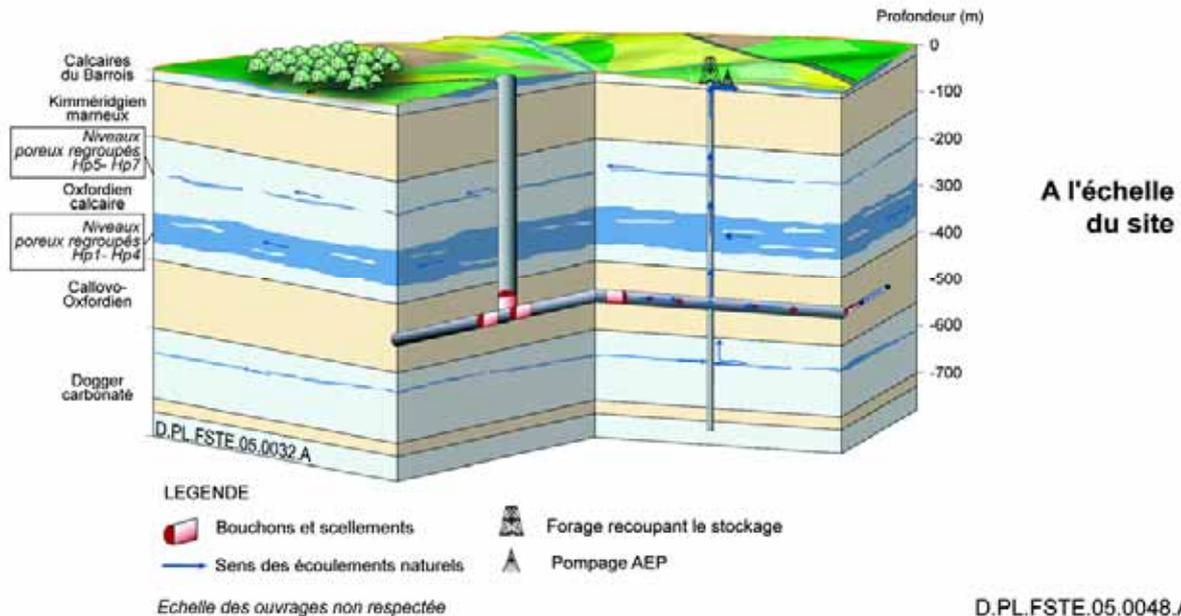
Il est entendu que seuls les composants situés dans le rayon d'influence hydraulique du forage suivent une évolution altérée. Les autres composants suivent une évolution qui ne se différencie pas de l'évolution normale, et l'impact associé à ces éléments n'est pas évalué à nouveau.



A l'échelle de l'alvéole de déchets C



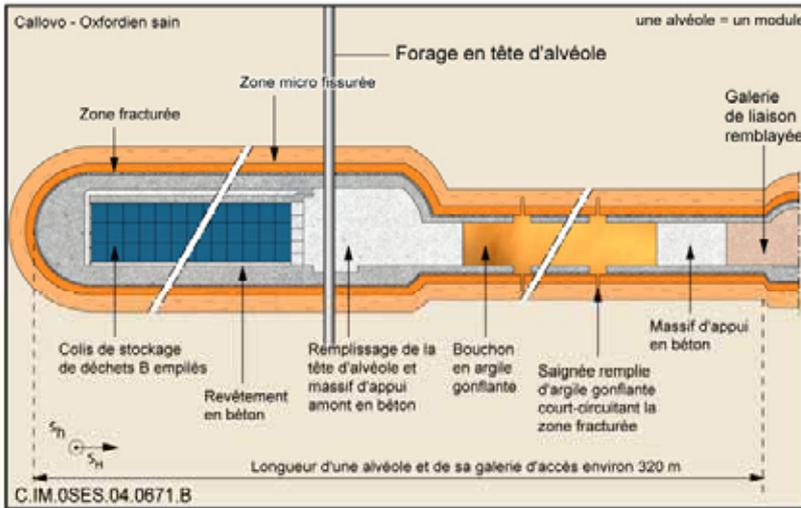
A l'échelle du module



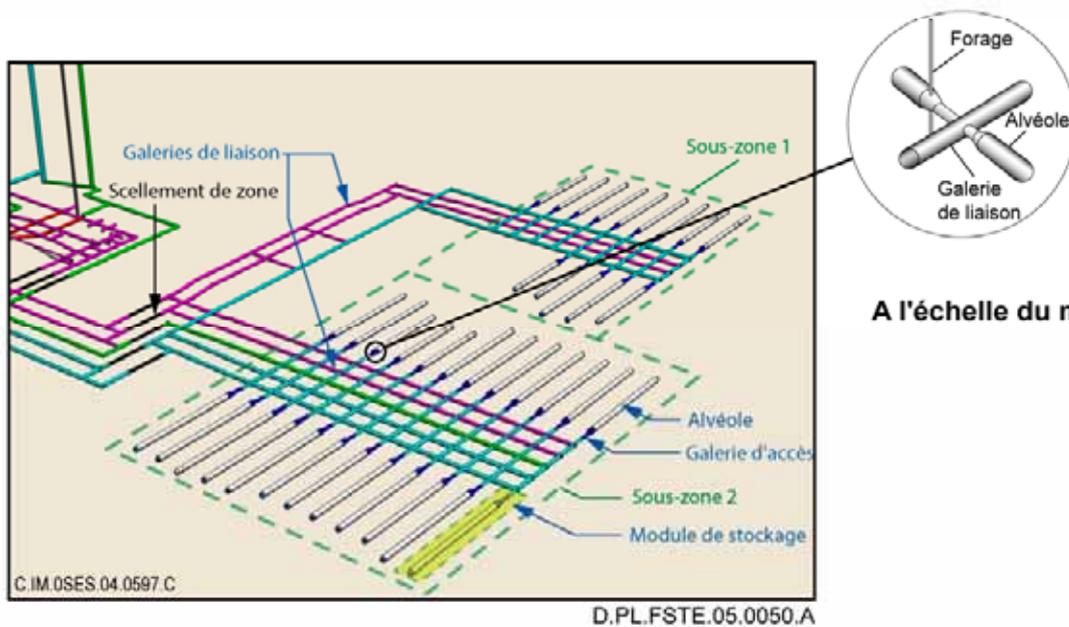
A l'échelle du site

Figure 7.4-2

SEA forage abandonné dans le stockage – situation de référence pour les coils de déchets C vitrifiés – forage dans une galerie d'accès



A l'échelle de l'alvéole de déchets B



A l'échelle du module

Figure 7.4-3

SEA forage abandonné dans le stockage – situation de référence pour les colis de déchets B - Forage dans une alvéole de déchets

7.4.2.1 Situations non retenues

Il est à noter que certaines situations, considérées couvertes par celles retenues en référence ou les situations alternatives, ont été éliminées. En particulier :

- les situations de forage dans le Callovo-Oxfordien n'interceptant pas le stockage ne sont pas quantifiées dans la mesure ou elles sont couvertes par les situations de forage dans les ouvrages de stockage. En effet, par rapport aux situations de forage dans les ouvrages, une telle situation n'aurait comme conséquence que de préserver une garde d'argile supplémentaire entre les colis et le forage, limitant et retardant le flux de radionucléides à la biosphère ;
- les situations de forage réalisé à des endroits où les gradients de charges sont descendants dans le Callovo-Oxfordien (jusqu'au Dogger) ne sont pas traitées. En effet, en SEN (voir chapitre 5), il est

montré que le modèle de transfert retenu dans les encaissants sus-jacents conduit toute chose étant égales par ailleurs, à des impacts très supérieurs au modèle de transfert dans les encaissants sous-jacents. Par conséquent, un gradient descendant au sein du stockage conduirait à une entrée des radionucléides dans le Dogger et à un impact beaucoup plus faible.

7.4.3 Traitement du scénario

7.4.3.1 Définition détaillée du cas de référence

On décrit ici plus finement la manière dont est modélisé le forage, et son effet sur le stockage [31], [108].

Le forage est représenté par une zone cylindrique d'une dizaine de centimètres de diamètre présentant une perméabilité de 10^{-6} m/s dans le Callovo-Oxfordien ; il se prolonge jusqu'au Dogger.

Les radionucléides qui atteignent le forage transitent dans ce dernier jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien. A ce niveau, on distingue deux cas :

- le cas où l'exutoire correspond à un pompage AEP à proximité du forage (voir Figure 7.4-4). On « injecte » dans le Barrois la totalité du débit molaire sortant du forage exploratoire au toit du Callovo-Oxfordien, sans prendre en compte le transfert dans les formations encaissantes. Un pompage superficiel dans le Barrois à proximité du stockage ne peut avoir qu'un débit très faible. Dans la mesure où on se place dans un cas de scénario d'évolution altérée, maximaliste et pouvant correspondre à des expositions très ponctuelles, on choisit volontairement un débit de pompage qui ne pourrait, dans la réalité, alimenter un groupe critique de manière pérenne. Ce débit est fixé à 10 litres par minute ;

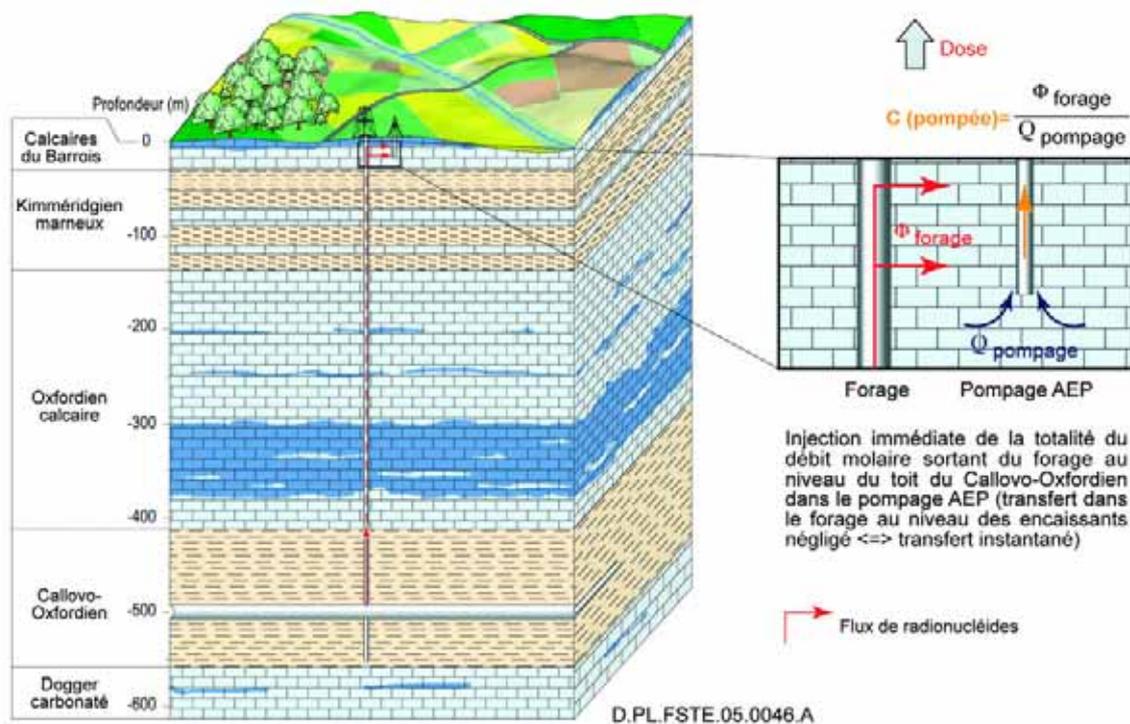


Figure 7.4-4 SEA forage abandonné dans le stockage – calcul de l'impact radiologique à l'exutoire pompage AEP dans le Barrois (exutoire de référence)

- le cas dans lequel le forage est supposé abandonné (sans pompage AEP à proximité) et localisé à un endroit où l'Oxfordien calcaire impose sa charge (voir Figure 7.4-5). Les exutoires sont alors cohérents avec ceux retenus en SEN. Pour simplifier, on ne traitera que l'exutoire le plus pénalisant, c'est-à-dire l'exutoire à la Saulx, en le retenant dans le modèle à l'actuel. En effet, les radionucléides issus du forage vont migrer rapidement et donc atteindre les encaissants plus tôt ; le

modèle à l'actuel est donc a priori plus représentatif. Dans ce cas, la configuration retenue est pénalisante car elle fait abstraction de la géométrie du stockage en plaçant l'impact du forage au plus près de l'exutoire « Saulx ». En effet, le débit molaire qui sort du forage exploratoire au toit du Callovo-Oxfordien est intégralement et immédiatement injecté à la base des niveaux poreux inférieurs de l'Oxfordien calcaire au droit du centre du module le plus à l'ouest (module le plus proche de l'exutoire Saulx).

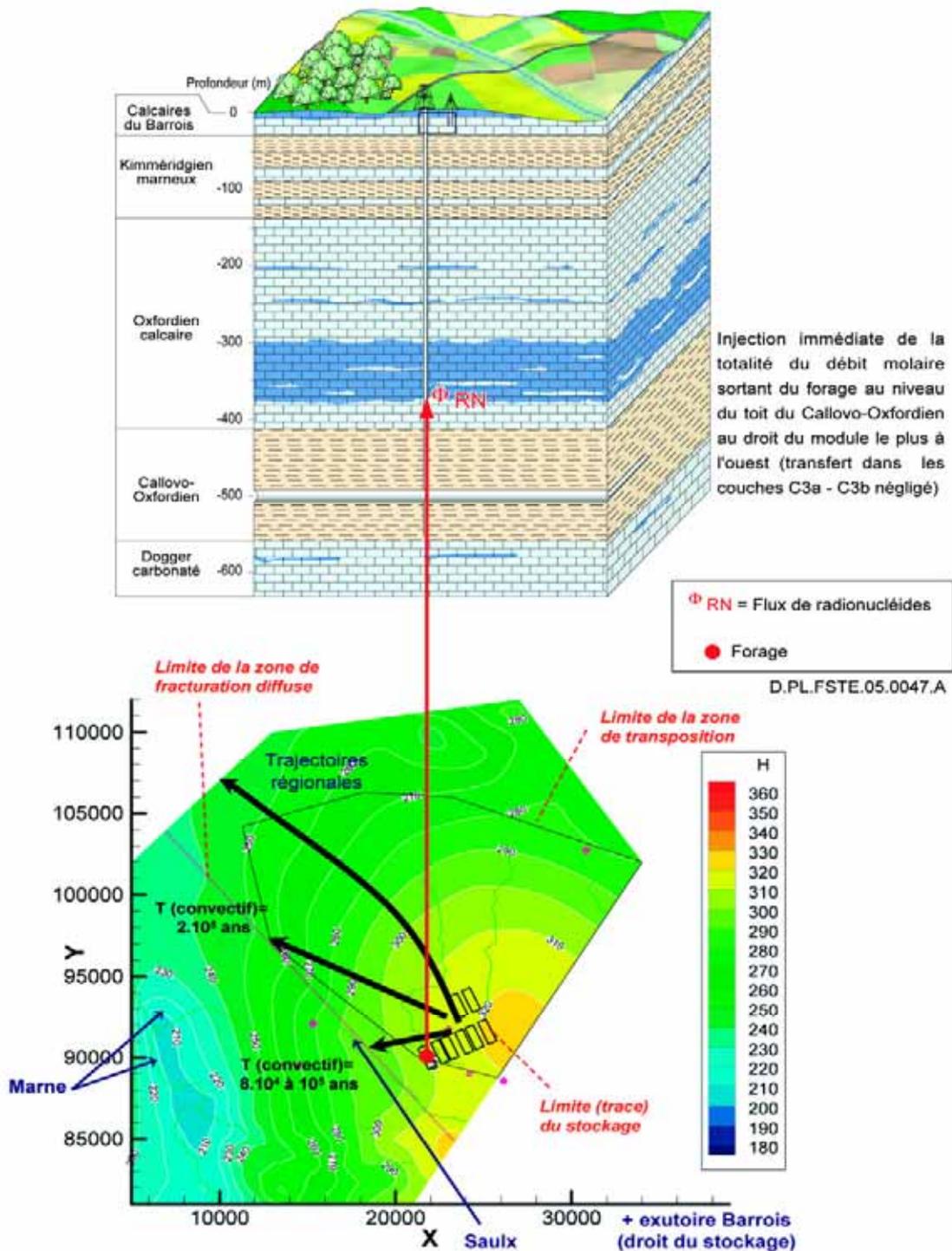


Figure 7.4-5

SEA forage abandonné dans le stockage - calcul de l'impact radiologique à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien calcaire - modèle hydrogéologique à l'actuel

Avant l'occurrence du forage, le stockage suit une évolution normale. Les gradients de charges verticaux dans le Callovo-Oxfordien sont ascendants ; ils sont de 0,2 m/m. La charge dans le stockage est en équilibre avec celle du Callovo-Oxfordien à sa profondeur.

Le forage exploratoire va perturber localement le stockage et le faire dévier de son évolution normale. En effet, en conditions naturelles de gradients de charges hydrauliques et pour un transport à travers l'épaisseur de garde de barrière géologique, le phénomène de transport dominant est la diffusion. Dans le cas d'un forage exploratoire interceptant une galerie de stockage, ce schéma va être modifié : le forage exploratoire peut créer localement deux types de perturbations :

- une perturbation sur les gradients de charges hydrauliques. Le forage impose au sein du stockage un écoulement des charges les plus hautes vers les charges les plus faibles ;
- une perturbation des gradients de concentrations chimiques. Le forage impose une concentration quasi nulle en radionucléides sur une ligne verticale pouvant induire une migration (horizontale suivant une trajectoire radiale convergeant vers le forage) plus importante que celle considérée en SEN.

Le forage engendre une resaturation rapide du module impacté s'il n'est pas déjà resaturé. Par ailleurs, avant la resaturation, les écoulements sont dirigés du forage vers le stockage, les radionucléides ne peuvent donc que difficilement remonter vers la surface par le forage. On se place donc dans la situation pénalisante où le stockage est totalement resaturé dès l'occurrence du forage.

D'un point de vue chimique, on peut envisager une légère modification des conditions d'environnement autour du point d'impact, si l'eau qui arrive via le forage a des caractéristiques nettement différenciées par rapport à l'eau issue du Callovo-Oxfordien. Dans l'ensemble des cas pour lesquels le forage est creusé durant la période de resaturation, l'eau apportée a une composition chimique caractéristique des encaissants (soit Oxfordien, soit Dogger suivant les cas), ce qui pourrait avoir une influence sur l'évolution des matériaux cimentaires. Néanmoins, pour les alvéoles de déchets B, la quantité très importante de béton permettrait la préservation de la chimie alcaline au sein de l'alvéole. Par ailleurs, les alvéoles de déchets C et de combustibles sont en grande partie resaturées à l'occurrence du forage ; la convergence des flux d'eau depuis l'alvéole vers le forage devrait limiter la progression d'espèces chimiques éventuellement agressives. Dans le cas des combustibles usés, la bentonite de la barrière ouvragée assurerait en plus un rôle de tampon. On assimile par conséquent les conditions chimiques au sein de l'alvéole, pour le calcul de référence, à celles retenues pour le SEN.

D'un point de vue mécanique, le diamètre d'un forage exploratoire est suffisamment faible pour que l'on puisse négliger l'influence du forage sur les processus géomécaniques. De même, les vitesses d'eau induites par la présence du forage, quelques mètres par an au maximum, ne sont pas de nature à créer des phénomènes d'érosion. Ainsi on peut considérer que le forage n'a pas d'effet significatif sur la tenue mécanique des ouvrages de stockage. Dans ces conditions, on suppose que les performances hydrauliques et de transport des ouvrages sont similaires à celles retenues pour le SEN.

Enfin, le terme source des déchets vitrifiés considéré en SEN n'est valide qu'en régime diffusif (voir chapitre 6). Pour prendre en compte les incertitudes relatives aux effets locaux du forage autour du verre qui pourraient perturber l'équilibre avec le silicium, le modèle de relâchement des déchets C vitrifiés retenu pour le scénario forage est un modèle pénalisant fondé sur la vitesse de dissolution initiale du verre (modèle V₀.S).

Par ailleurs, le forage intervient dans les alvéoles de déchets thermiques à une date où l'effet de la température peut encore être non négligeable. Aussi l'effet de la température sur la perméabilité est pris en compte. Son mode de traitement est identique ce qui est fait pour le SEA « défaut de scellements ». L'effet de la température sur les autres paramètres de transport (diffusion, sorption) est similaire à celui du SEN.

7.4.3.2 Analyses de sensibilité

Un ensemble large d'études de sensibilités a été prévu pour couvrir plus complètement l'influence d'un hypothétique forage. Ces études se classent en quelques catégories distinctes.

- **Etudes de sensibilité sur la position du forage**

Pour les déchets vitrifiés et les combustibles usés, on traite le cas d'un forage interceptant non plus la galerie attenante, mais l'alvéole elle-même (voir Figure 7.4-6). Cette situation est étudiée à titre illustratif pour les combustibles usés CU1. Tous les autres paramètres décrits précédemment sont les mêmes que dans le cas de référence.

Il est supposé que les conteneurs sont efficaces pendant 10 000 ans ; en revanche, le forage est situé très près d'un colis ce qui permet de maximiser l'impact en le plaçant à portée des radionucléides peu mobiles.

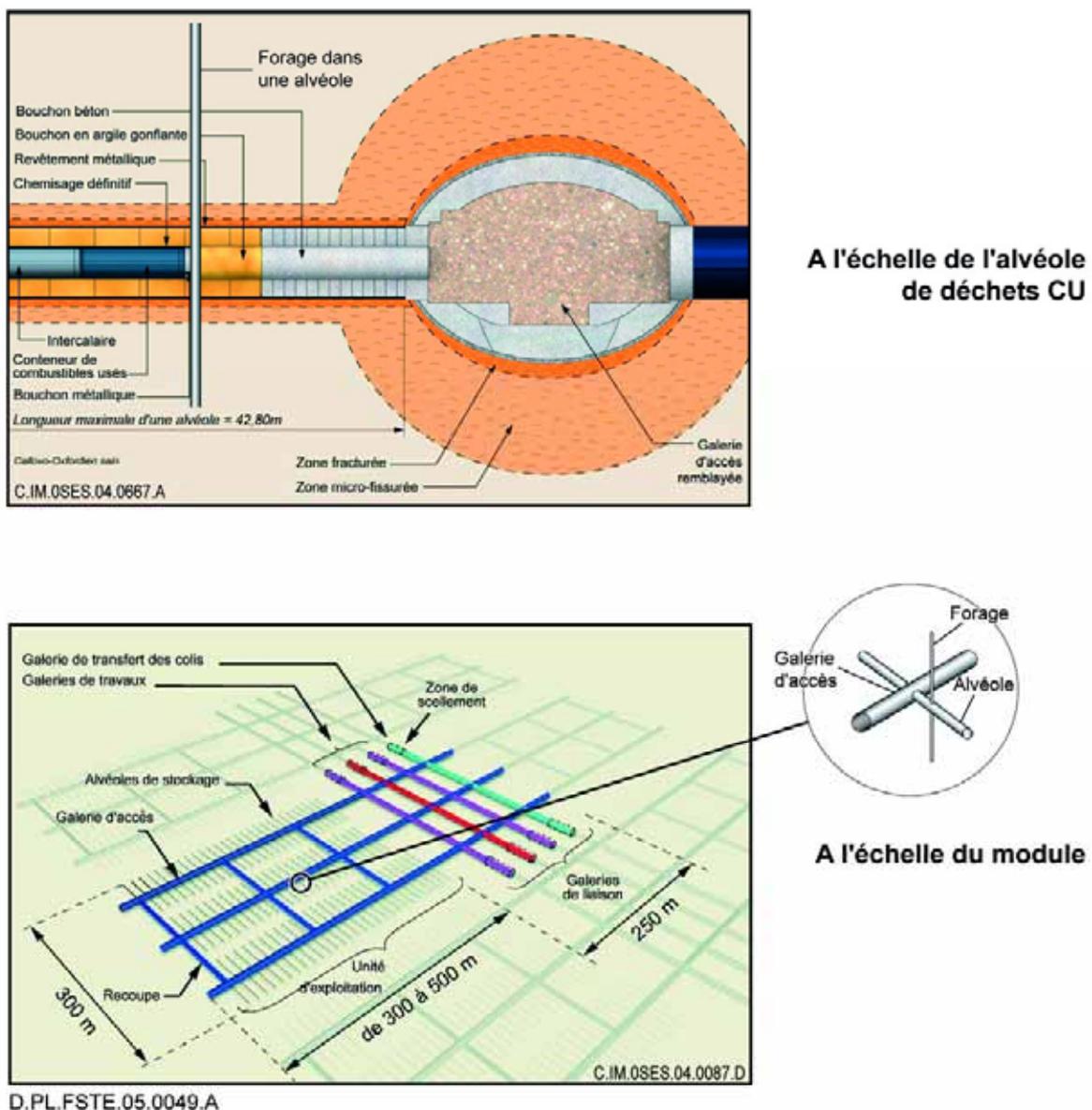


Figure 7.4-6

SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage (forage dans une alvéoles de combustibles usés)

La deuxième étude de sensibilité correspond à un forage atteignant le Dogger et traversant une galerie de liaison secondaire près d'une alvéole de déchets B. On a traité le cas de la zone de stockage B1x (celle contenant la plus pénalisante en terme d'inventaire). La situation est représentée à la Figure 7.4-7.

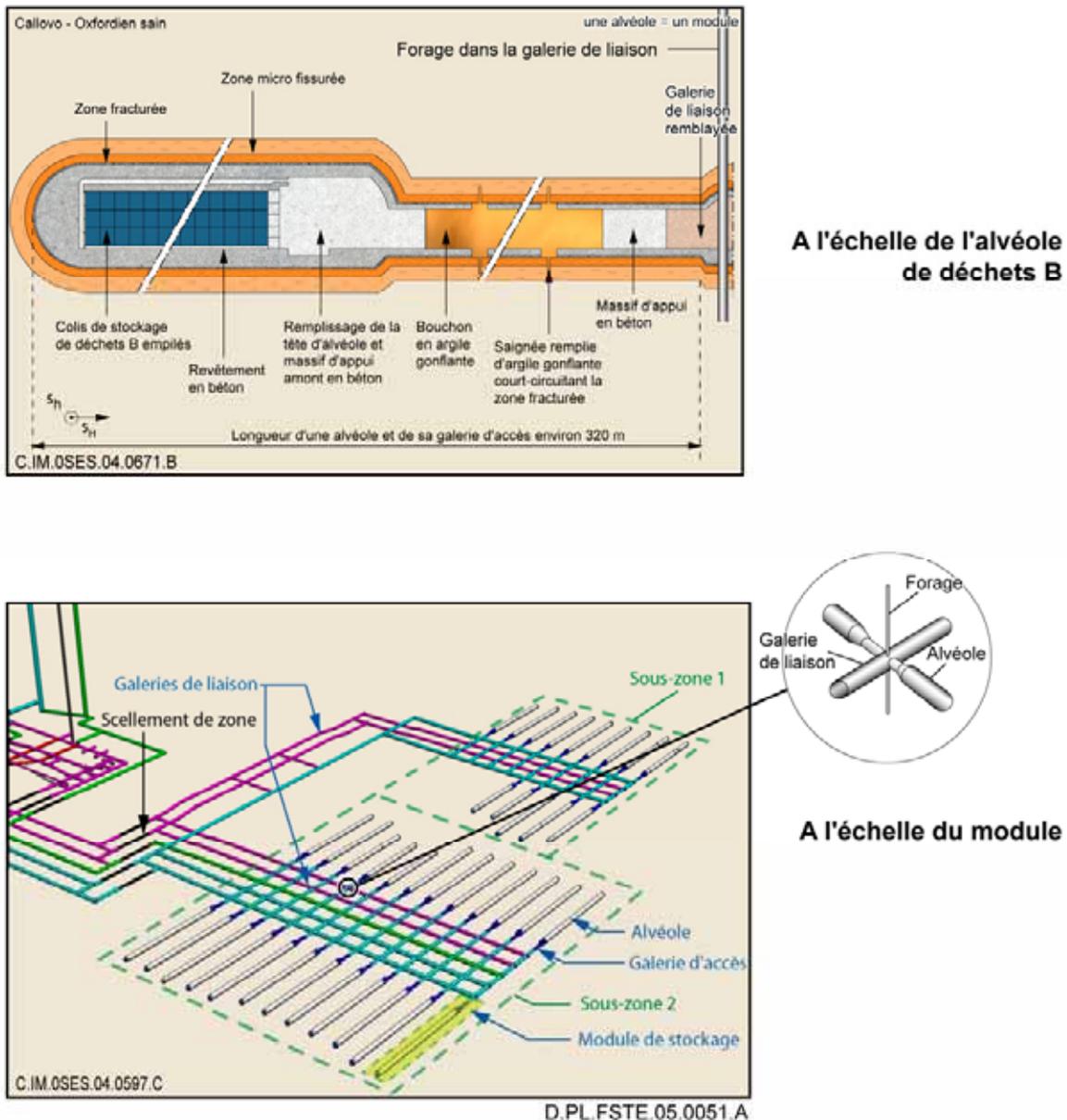


Figure 7.4-7 SEA forage abandonné dans le stockage – sensibilité à la position du forage (forage dans une galerie de liaison secondaire)

On étudie un cas de doublet de forage, c'est-à-dire une situation où deux forages sont placés à proximité l'un de l'autre, de part et d'autre d'une galerie. L'objectif est d'étudier si une telle disposition peut conduire à une circulation convective d'eau « en U » d'un forage à l'autre. Ce cas de figure est traité pour la zone de stockage des CU1. Deux forages interceptent une galerie d'accès d'une sous-zone de stockage. Leurs dimensions sont identiques à celles du forage modélisé dans le calcul de référence.

Le moteur hydraulique entre les deux forages est imposé par les conditions naturelles des encaissants sus-jacents (gradient de charges horizontal), telles qu'elles sont simulées dans le SEN. Les conditions aux limites de la situation de doublet de forage sont représentées sur la Figure 7.4-8 (où H désigne la charge hydraulique en mètres NGF⁷¹, C la concentration en radionucléides et ∇ le gradient)

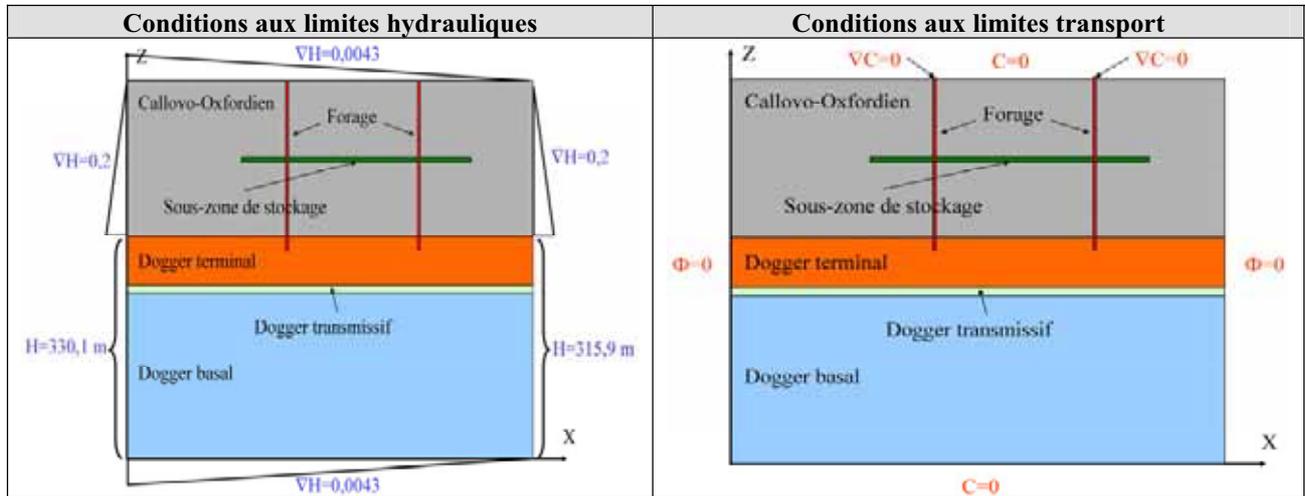


Figure 7.4-8 SEA forage abandonné dans le stockage – sensibilité doublet de forage - conditions aux limites du modèle stockage (doublet de forage)

Deux situations sont étudiées (voir Figure 7.4-9) :

- la première localise les deux forages aux extrémités d'une galerie de stockage afin de maximiser la différence de charge hydraulique entre les deux forages (situation 1) ;
- la seconde maximise l'influence radiologique des deux forages en les plaçant au milieu de deux demi-modules de stockage (situation 2).

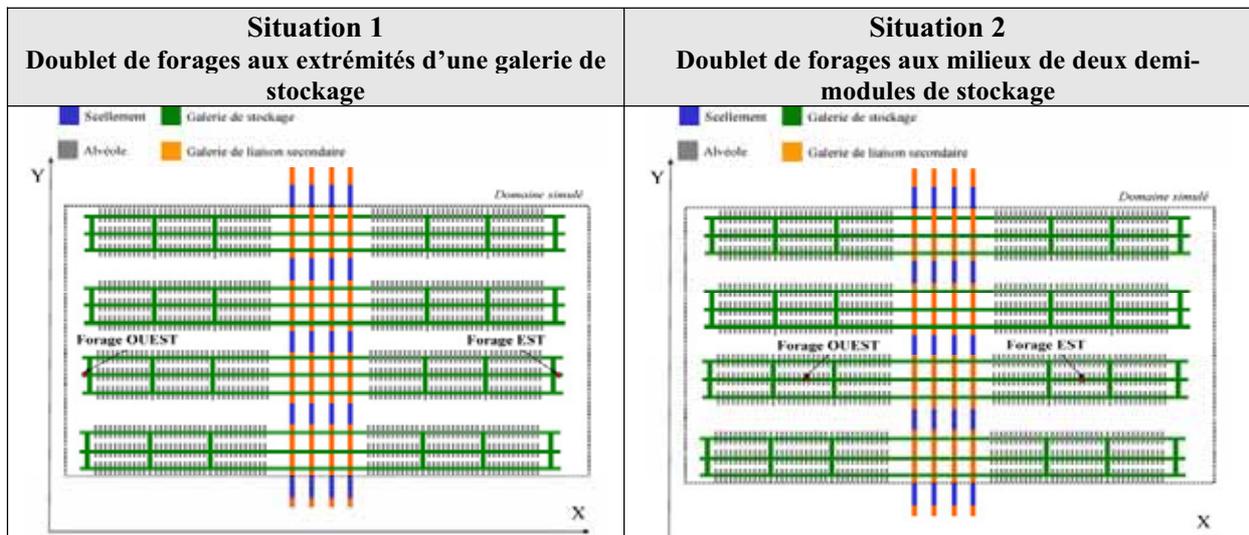


Figure 7.4-9 SEA forage abandonné dans le stockage – sensibilité doublet de forage - positionnement du doublet de forages.

● **Etudes de sensibilité sur le rôle de « barrière » des ouvrages autour de l'alvéole**

Une situation étudiée en sensibilité examine le gain éventuel apporté par l'introduction d'une barrière ouvragée en argile gonflante pour les déchets C. En effet, il est intéressant d'étudier si ce composant constitue ou non une barrière de confinement redondante en cas de court-circuit du milieu géologique. L'étude est conduite pour les déchets C2.

● **Etudes de sensibilité sur les paramètres hydrauliques du modèle**

Dans la mesure où on peut anticiper que la zone endommagée est une voie de transfert significative depuis les alvéoles jusqu'au forage, il est apparu également intéressant d'en dégrader les propriétés, pour voir si cela pouvait avoir une influence sur le transfert des radionucléides.

Une étude de sensibilité est réalisée dans laquelle les paramètres d'EDZ sont dégradés comme détaillé dans le Tableau 7.4-3 et le Tableau 7.4-4. A titre illustratif, cette étude est réalisée pour les déchets C2.

	Calcul de référence EDZ phénoménologique	Calcul de sensibilité EDZ « dégradée »
Zone fracturée	$K = 5.10^{-9} \text{ m/s}$ <u>Anions</u> : $De_{\text{Anions}} = 1.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,15$ <u>Cations</u> : $De_{\text{Cations}} = 5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,20$ Rétention géochimique phénoménologique	$K = 10^{-6} \text{ m/s}$ Coefficient pénalisant ($Dp = De / \omega = 2.10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) Pas de rétention géochimique
Zone microfissurée	$K = 5.10^{-11} \text{ m/s}$ <u>Anions</u> : $De_{\text{Anions}} = 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,05$ <u>Cations</u> : $De_{\text{Cations}} = 2,5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,18$ Rétention géochimique phénoménologique	$K = 5.10^{-9} \text{ m/s}$ <u>Anions</u> : $De_{\text{Anions}} = 1.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,04$ <u>Cations</u> : $De_{\text{Cations}} = 5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,21$ Rétention géochimique conservative

Tableau 7.4-3

SEA forage – Sensibilité aux valeurs des paramètres hydrauliques, de transfert et de rétention chimique de l'EDZ – valeurs des paramètres hydrauliques et de transport

	Période [ans]	Paramètres de rétention chimique dans la zone micro-fissurée			
		Rétention géochimique phénoménologique		Rétention géochimique conservative	
		R [-]	Csat [mol/m ³]	R [-]	Csat [mol/m ³]
¹⁰ Be	1 600 000	31 900	10 ⁻²	1	10
¹⁰ Be (deltaT>20)	1 600 000	3 200	10 ⁻²	1	10
¹⁴ C	5 730	5,6	2,3	1	9
³⁶ Cl	302 000	1	soluble	1	soluble
⁴¹ Ca	103 000	16	2,3	1	9
⁴¹ Ca (deltaT>20)	103 000	2,5	2,3	1	9
⁵⁹ Ni	75 000	2 050	5.10 ⁻²	1 100	1
⁷⁹ Se	65 000	1	5.10 ⁻⁷	1	5.10 ⁻⁴
⁹³ Zr	1 530 000	12 800	2.10 ⁻⁵	1 100	3.10 ⁻³
⁹³ Mo	3 500	139	1.10 ⁻⁵	1	1.10 ⁻³
^{93m} Nb	16,4	53 400	2.10 ⁻⁴	43 100	2.10 ⁻³
⁹⁴ Nb	20 300	53 400	2.10 ⁻⁴	43 100	2.10 ⁻³
⁹⁹ Tc	213 000	128 000	4.10 ⁻⁶	21 900	1.10 ⁻⁴
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	8 950	4.10 ⁻⁴	1 750	1.10 ⁻²
¹²⁶ Sn	100 000	179 000	1.10 ⁻⁵	65 700	1.10 ⁻⁴
¹²⁹ I	15 700 000	1	soluble	1	soluble
^{166m} Ho	1 200	639 000	1.10 ⁻⁴	54 800	1.10 ⁻³
¹³⁵ Cs	2 300 000	Langmuir*	soluble	Langmuir*	soluble
		Langmuir : $K_d = (1,85.10^{-7}) / (4,76.10^{-7} + C_{eq})$ avec C_{eq} : concentration en solution (mol/l)			

Tableau 7.4-4 SEA forage abandonné dans le stockage - Sensibilité aux valeurs des paramètres hydrauliques, de transfert et de rétention chimique de l'EDZ – valeurs des paramètres de rétention chimiques dans la zone micro-fissurée

● Etudes de sensibilité sur les paramètres chimiques du modèle

Pour prendre en compte les incertitudes associées à l'influence du forage sur les conditions chimiques et géochimiques, deux études de sensibilité sur les paramètres des modèles sont réalisées à partir de la situation de référence.

- Une première étude de sensibilité considérant des paramètres géochimiques conservatifs pour la bentonite (barrière ouvragée et bouchon des alvéoles de combustibles usés, bouchon des alvéoles de déchets C, scellements de module) dans la zone pouvant être affectée par le forage.
- Une deuxième étude de sensibilité dans laquelle il est considéré, en plus du modèle de relâchement déjà pénalisant retenu pour les déchets C vitrifiés, des paramètres conservatifs (taux de fracturation plus important). A titre illustratif, cette étude est réalisée pour les déchets C2.

Enfin, pour étudier si le modèle de relâchement du verre a une influence significative sur l'impact du forage, on étudie a contrario une situation où les verres C2 obéissent à un modèle de relâchement de type ($V_0.S \rightarrow V_r$).

● **Synthèse**

Le Tableau 7.4-5 suivant synthétise l'ensemble des études de sensibilité réalisées pour le scénario de forage.

Etudes de sensibilité réalisées	Colis types faisant l'objet de l'étude de sensibilité	Page
Sensibilité à la position du forage		
Sensibilité à la position du forage – dans une alvéole de combustibles usés	CU1	574
Sensibilité à la position du forage – dans les galeries d'accès de déchets B	B1x	577
Doublet de forage	CU1	580
Sensibilité sur les barrières		
Sensibilité au concept de déchet C – variante avec barrière ouvragée	C2	584
Sensibilité sur les paramètres hydrauliques		
Sensibilité au paramètre de l'EDZ – « EDZ dégradée »	C2	585
Sensibilité sur les paramètres chimiques		
Sensibilité au paramètre de barrière ouvragée (géochimie conservative)	C2 C4 CU1 CU2	588
Sensibilité au modèle de relâchement des verre : modèle $V_0.S \rightarrow V_r$ au lieu du modèle $V_0.S$ retenu en référence.	C2	591
Sensibilité au paramètre du modèle de relâchement des déchets vitrifiés (paramètres conservatifs)	C2 C4	593

Tableau 7.4-5 *SEA forage abandonné dans le stockage - Liste des études réalisées en sensibilité du scénario « forage dans le stockage »*

7.4.4 Effets sur les fonctions de sûreté

Comme pour le scénario d'évolution normale, la démarche d'analyse des résultats poursuit deux objectifs :

- le premier consiste à comprendre le fonctionnement du système en cas de forage dans le stockage. L'utilisation d'indicateurs intermédiaires permet de vérifier l'efficacité des fonctions mises en jeu ;
- le second vise à évaluer l'impact radiologique associé aux différentes situations envisagées en référence et en sensibilité.

Le forage va induire une dégradation ou une modification des performances associées aux trois fonctions de sûreté définies au chapitre 3 qui sont « s'opposer à la circulation d'eau », « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » et « retarder et atténuer la migration des radionucléides ». En effet, le scénario tel qu'il est défini en situation de référence conduit à court-circuiter totalement ou partiellement le milieu géologique (Callovo-Oxfordien et éventuellement les formations encaissantes) situé entre les colis et l'homme. Il induit alors localement, une dégradation des performances associées à la troisième fonction de sûreté « retarder et atténuer la migration des radionucléides » une fois que ceux-ci ont été relâchés par les colis. Par ailleurs, il engendre dès son occurrence une modification du profil de charges et des écoulements dans la zone de stockage impactée ; il « perturbe » ainsi les performances associées à la fonction de sûreté « s'opposer à la circulation d'eau ».

Les effets du forage sur la fonction de sûreté « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » ne résultent que des perturbations qu'il peut causer sur les colis, en particulier sur les cinétiques de relâchement des radionucléides par les déchets. Aussi, pour intégrer les éventuels effets préjudiciables du forage sur les colis de déchets, un modèle de relâchement conservatif a été considéré en SEA pour les verres, tenant compte des débits d'eau potentiellement plus élevés pouvant circuler dans l'alvéole. Les autres manifestations de la fonction (essentiellement la précipitation des radionucléides) sont très peu affectées par le forage compte tenu de la faible influence de celui-ci sur les conditions chimiques dans l'alvéole (voir paragraphe 7.4.3.1). On notera cependant que l'étude de sensibilité envisagée sur les propriétés géochimiques de l'EDZ fracturée (lui attribuant une solubilité infinie) couvre notamment une possible défaillance de la fonction d'immobilisation en champ proche.

On focalise donc la présentation sur les fonctions « s'opposer à la circulation d'eau », puis « retarder et atténuer la migration des radionucléides » par le biais d'indicateurs intermédiaires qui sont identiques à ceux utilisés en SEN (voir paragraphe 5.2).

Les résultats peuvent être différents selon la zone de déchets concernée, et l'analyse spécifique à chaque radionucléide. Chaque fois que nécessaire, on différencie les résultats par type de déchets et par radionucléide. Quand il s'agit juste d'illustrer un résultat, on retient par défaut le cas particulier de la zone de combustibles CU1 et de l'iode 129 qui induit l'impact le plus élevé.

7.4.4.1 Effet sur la fonction « s'opposer à la circulation d'eau »

● Effet sur les charges hydrauliques

Le forage va induire un court-circuit partiel ou total de la formation hôte en créant à son emplacement une zone de perméabilité élevée depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusqu'au Dogger terminal (voir Figure 7.4-10).

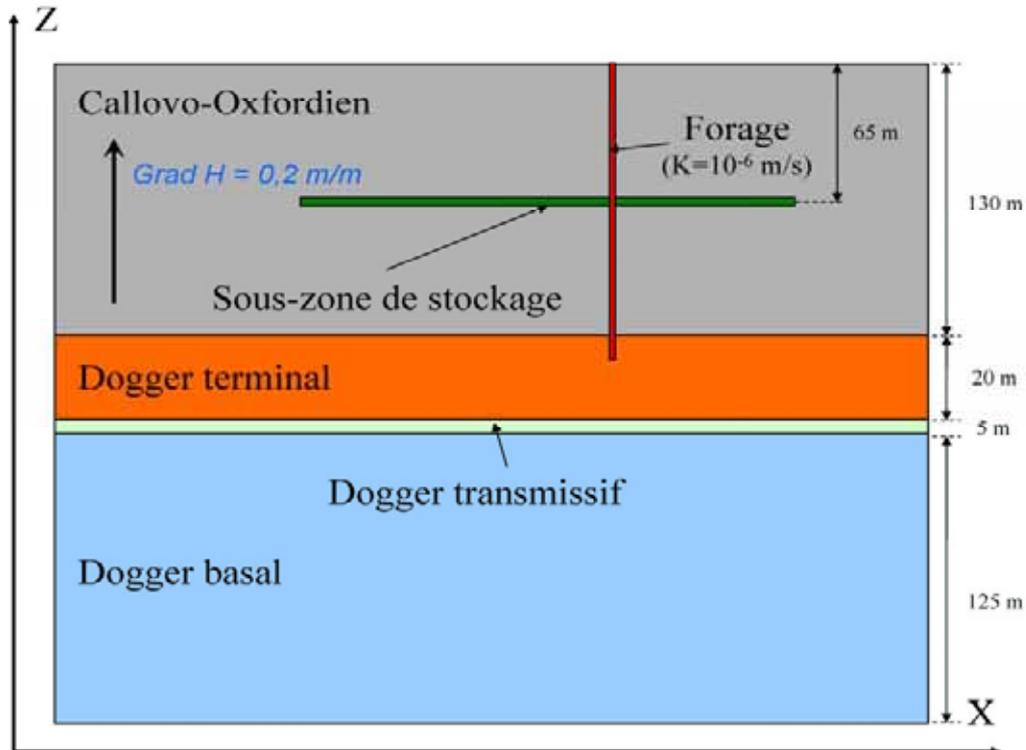


Figure 7.4-10 SEA forage abandonné dans le stockage - représentation du forage dans le milieu géologique

On considère d'abord les charges dans le forage lui-même, puis la manière dont elles se propagent à l'intérieur des ouvrages.

La charge dans le forage dépend notamment de sa perméabilité, de sa géométrie (son diamètre en particulier) et de l'aptitude du système qui l'entoure à l'alimenter en eau. Ainsi, la forte perméabilité du forage et l'apport d'eau limité du milieu environnant engendrent une diminution locale des charges hydrauliques dans le forage. Le calcul des charges hydrauliques met en évidence que, à l'équilibre (voir Figure 7.4-11) :

- dans la partie inférieure du Callovo-Oxfordien où l'apport en eau est limité, la charge dans le forage est inférieure à celle du Callovo-Oxfordien ;
- à la hauteur du stockage, le profil de charges dans le forage est quasi-constant. Il évolue d'une charge inférieure à celle du Callovo-Oxfordien à la base du stockage vers une charge en équilibre avec celle du Callovo-Oxfordien dans sa partie supérieure. Cela découle essentiellement de la capacité du stockage à alimenter le forage en eau. Bien que quasi-constante, la charge dans le forage reste inférieure ou égale (au toit du stockage) à celle du Callovo-Oxfordien ;
- dans la partie supérieure du Callovo-Oxfordien, le profil de charges dans le forage reste en équilibre avec celui du Callovo-Oxfordien.

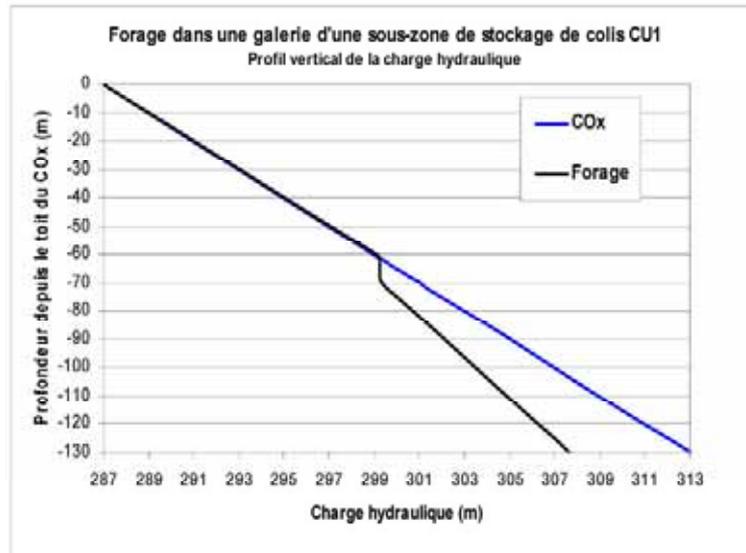


Figure 7.4-11

SEA forage abandonné dans le stockage - profil de charge hydraulique en mètres NGF⁷¹ dans le forage

Au niveau des zones impactées, les écoulements convergent vers le forage. Ces écoulements ont tendance à diminuer dans un premier temps la charge dans le stockage jusqu'à ce que s'instaure un régime hydraulique permanent. La charge à l'équilibre dans le ou les modules de stockage impactés par le forage va alors dépendre de :

- la charge dans le forage qui va avoir tendance à se propager ou s'équilibrer avec celle du module de stockage impacté ;
- l'aptitude du ou des modules impactés à alimenter hydrauliquement le forage ; plus les débits d'eau que peuvent capter les modules depuis le Callovo-Oxfordien sont faibles, plus la charge dans ces derniers va avoir tendance à diminuer ;
- l'efficacité des scellements ; leur relative faible perméabilité par rapport à celle des galeries limite la propagation de la perte de charge (voir ci après) ;
- les caractéristiques hydrauliques de chacun des modules.

Les modules de faible extension disposent d'un apport en eau plus limité, ce dernier étant contraint d'une part par le volume d'eau disponible dans le ou les modules, d'autre part à terme, par la quantité d'eau que peut fournir le Callovo-Oxfordien en paroi d'ouvrages. Le débit d'eau que peut fournir le stockage est présenté dans le Tableau 7.4-6 pour chacune des zones de stockage. Elles contribuent au débit total dans une proportion variant entre 17 % et 31 % selon le colis-type et la localisation du forage. Pour le reste, l'eau drainée par le forage provient principalement du Dogger.

Colis types ou alvéole-type*	Localisation du forage	Débit d'eau drainé par le forage à 100 000 ans (m ³ /an) ⁹⁴					Stockage / Total
		Dogger ⁹⁵	Callovo-Oxfordien sous stockage	Callovo-Oxfordien sur stockage	Stockage	Total	
Colis type C0	Galerie	0,120	0,003	0,000	0,025	0,148	17%
Colis type C2	Galerie	0,111	0,002	0,000	0,0500	0,163	31%
Colis type C4	Galerie	0,111	0,002	0,000	0,0506	0,163	31%
combustibles usés CU1	Galerie	0,110	0,002	0,000	0,0495	0,162	31%
combustibles usés CU2	Galerie	0,111	0,002	0,000	0,0490	0,162	30%
Alvéole B1x*	Alvéole	0,118	0,003	0,000	0,024	0,145	17%
Colis type B2	Alvéole	0,115	0,003	0,000	0,028	0,146	19%

* Les alvéoles de type B1x accueillent les colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène, colis types B1, B5, B6 (hors B5.1 et B6.4)

Tableau 7.4-6 SEA forage abandonné dans le stockage - contributions des composants du modèle au débit d'eau capté par le forage

De par leur perméabilité, les scellements limitent la propagation de la perte de charge depuis le module dans lequel est effectué le forage vers les modules les plus éloignés du forage. Dans le cas des combustibles usés CU1, la charge calculée est constante dans les galeries du module impacté (Figure 7.4-12) ; elle augmente en revanche au niveau du scellement (de l'ordre de 0,15 mètre sur 50 mètres de scellements). En effet, l'efficacité hydraulique du scellement limite la propagation de la perte de charges du module dans lequel est réalisé le forage vers les modules adjacents et de fait limite également les circulations d'eau des modules adjacents vers le module impacté. Ainsi, l'influence hydraulique du forage est d'autant plus limitée que les modules sont éloignés du forage. Des calculs préliminaires ont mis en évidence que la variation de charge hydraulique de part et d'autre d'un scellement diminue d'un facteur 2 à chaque passage de scellements. Ainsi, les modules de stockage les plus éloignés du forage sont moins impactés hydrauliquement et le module intercepté par le forage constitue l'apport principal en eau pour environ un tiers du débit total dans le cas des colis C ou combustibles usés et pour 95 % dans le cas des colis B.

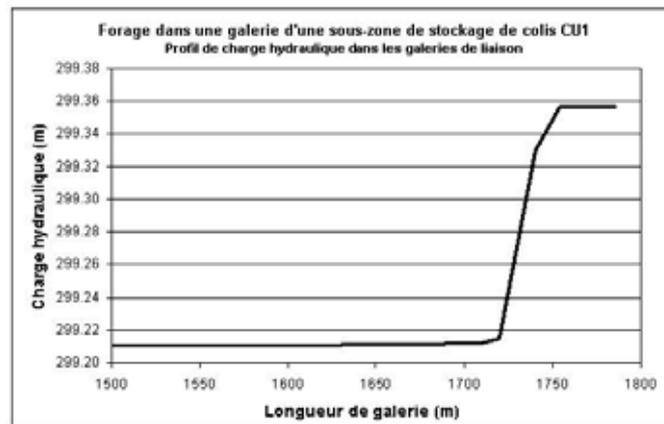


Figure 7.4-12 SEA forage abandonné dans le stockage - profil de charge hydraulique en mètres NGF⁷¹ dans les galeries (l'extrémité droite représente un passage de scellement)

⁹⁴ Date illustrative

⁹⁵ On rappelle que, dans le calcul d'impact, les débits d'eau issus du Dogger ne sont pas pris en compte pour diluer le flux de radionucléides.

● **Effet sur les circulations d'eau**

Les écoulements convergent des modules de stockage vers le forage, où la charge est plus faible. Les vitesses de Darcy et le nombre de Péclet calculés en différents points du stockage mettent en évidence que :

- le système de galerie reste en régime diffusif (ou en co-dominance diffusive convective) avec des nombres de Péclet dans la galerie compris entre 0,2 et 1. Ces derniers ont été calculés en considérant une longueur moyenne de galerie de 250 mètres, une porosité de 40 % dans les remblais et un coefficient de diffusion moléculaire égal à 2.10^{-9} m²/s. La Figure 7.4-13 fournit les valeurs des vitesses de Darcy et des nombres de Péclet à différents endroits dans le demi module de CU1 impacté par un forage dans une de ses galeries, ou au niveau des scellements de modules. On a fait figurer également, sous forme de rectangles grisés, les zones situées de part et d'autres du demi module impacté dont l'influence hydraulique est modélisée ;
- le régime au sein des alvéoles de stockage reste diffusif pour tous les colis dans l'alvéole (voir Figure 7.4-14). A titre d'exemple, une évaluation du nombre de Péclet dans les ouvrages a été réalisée pour les combustibles usés CU1. Elle fournit une valeur de 0,006 au niveau du bouchon dans l'alvéole. Le système devient légèrement convectif dans la zone fracturée où la perméabilité est la plus élevée ; dans cette zone, le nombre de Péclet est de 3 en tête d'alvéole. Par ailleurs, les cinétiques de transfert restent très limitées avec vitesses de Darcy d'au maximum de 10^{-4} m/an. Pour une alvéole de déchets B directement atteinte par un forage, le nombre de Péclet calculé en tête d'alvéole est de l'ordre de 1.

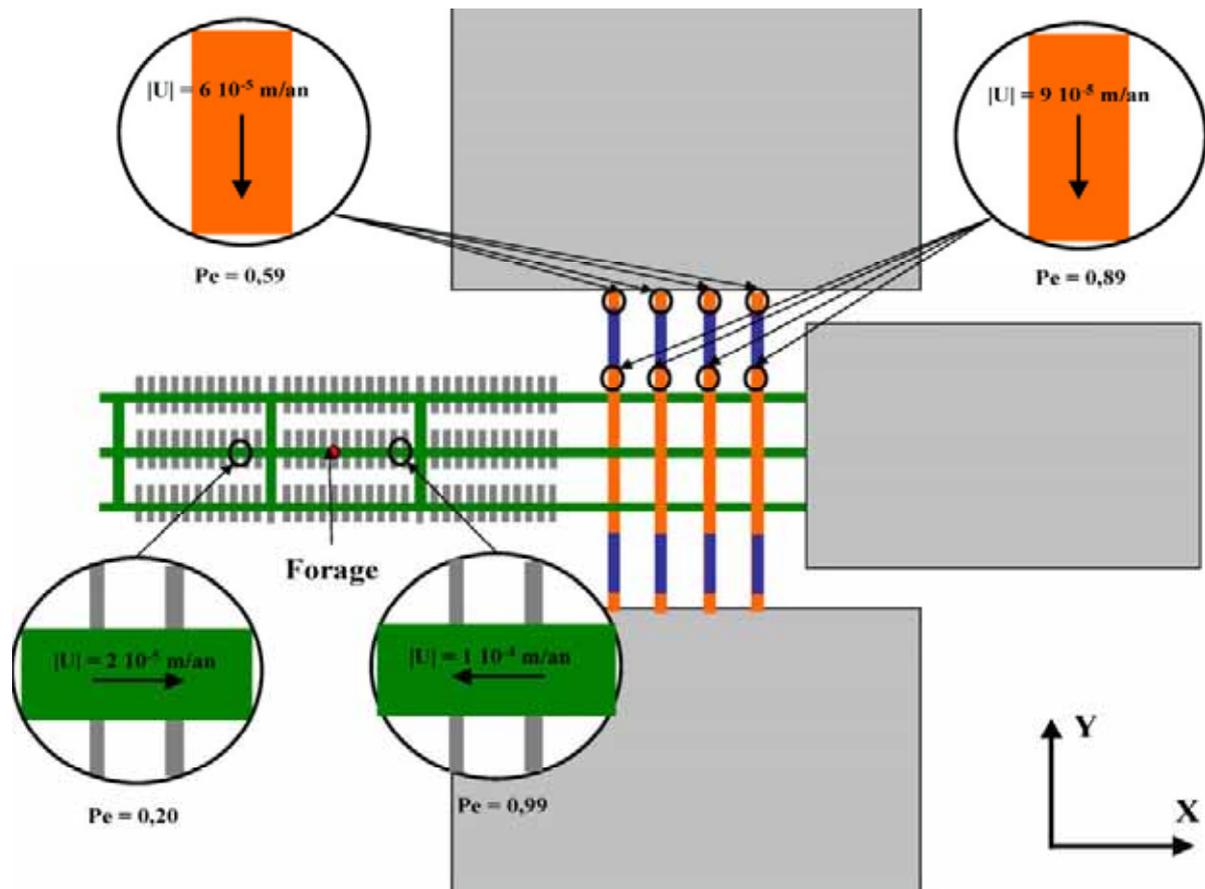


Figure 7.4-13

SEA forage abandonné dans le stockage - vitesse de Darcy et nombre de Péclet dans les galeries d'une sous-zone de colis CU1

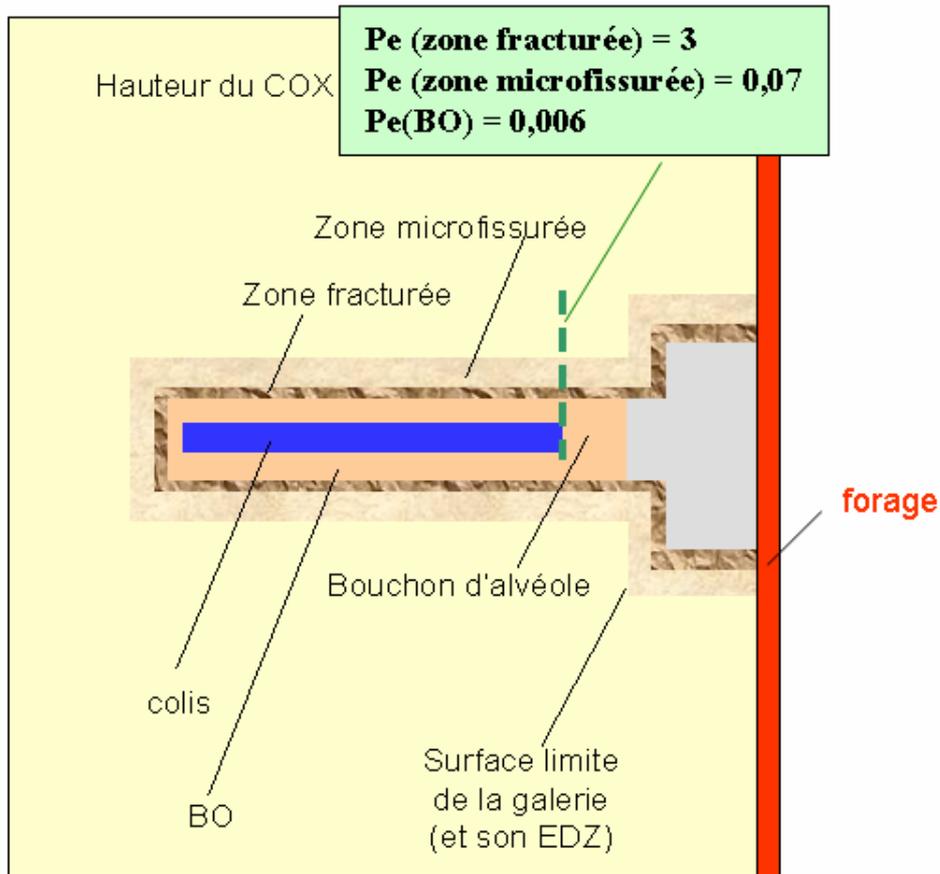


Figure 7.4-14

SEA forage abandonné dans le stockage- nombre de Péclet dans les alvéoles de combustibles usés CUI

7.4.4.2 Effets sur la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »

L'analyse qui précède a mis en évidence que le système reste diffusif dans les modules de stockage et ce malgré l'occurrence du forage. Il convient d'évaluer également l'effet du forage sur le confinement des radionucléides et plus particulièrement sur la capacité du stockage et du milieu géologique à retarder et atténuer le flux de radionucléides.

En cas de forage et une fois relâchés par les colis, les radionucléides migrent dans le corps ou le bouchon de l'alvéole. Une fraction de l'activité totale de l'alvéole atteint le forage après avoir transité dans les ouvrages ou dans les milieux situés entre les colis et le forage (voir Figure 7.4-15). L'activité qui atteint le forage est fonction de :

- l'activité initiale présente dans les colis ;
- la répartition entre les voies de transfert au niveau de l'alvéole elle-même. Une fraction de l'activité suit une trajectoire à composante horizontale (voie 2) avant d'atteindre les galeries d'accès, l'autre suit une trajectoire à composante verticale (voie 1) avant d'atteindre et de rester dans le Callovo-Oxfordien. La répartition entre ces deux voies de transfert dépend, entre autres, de l'aptitude des radionucléides à se sorber dans la formation hôte et dans les ouvrages. Dans la mesure où le régime de transport reste diffusif (ou en co-dominance diffusivo-convective), la répartition entre les voies de transfert est comparable à celle observée en SEN ;

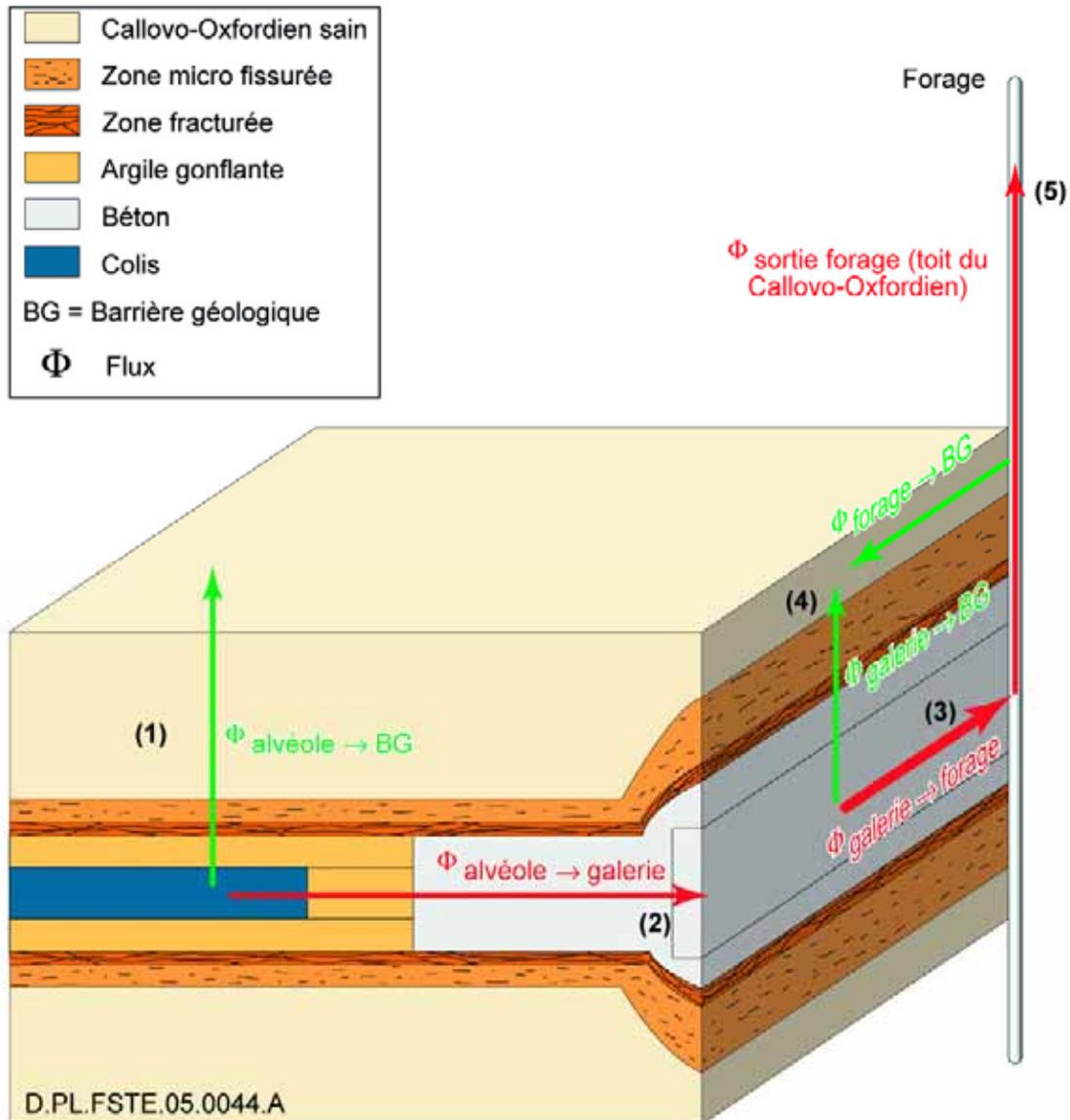


Figure 7.4-15

SEA forage abandonné dans le stockage - voies de transfert dans le cas des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés

- l'aptitude des radionucléides qui ont atteint les galeries d'accès à migrer et rester dans celles-ci avant d'atteindre le forage. En effet, le flux de radionucléides qui migrent dans les galeries peut être atténué entre la sortie de l'alvéole et le forage car les radionucléides peuvent rejoindre le Callovo-Oxfordien et migrer par diffusion dans ce dernier, ou bénéficier de la décroissance radioactive avant d'atteindre le forage. De ce fait, l'atténuation du flux entre une alvéole et le forage est d'autant plus importante que l'alvéole concernée est éloignée du forage. Par souci de simplification, l'analyse présente la quantité totale d'activité qui atteint le forage sans distinguer les apports respectifs de chacune des alvéoles en fonction de leur positionnement par rapport au forage. Il s'agit d'une valeur moyenne comparable à l'inventaire total initial stocké dans une zone, une sous-zone, un module, ou à l'activité contenue dans une alvéole ou sortant d'une alvéole dans les galeries d'accès. Dans les faits, un nombre limité d'alvéoles contribue à alimenter le forage.

● Cas des combustibles usés

La situation de référence consiste en un forage dans une galerie d'accès contiguë aux alvéoles de combustibles usés (voir Figure 7.4-15). Ainsi, les radionucléides qui atteignent le forage transitent dans le corps de barrière ouvragée, le bouchon ou le Callovo-Oxfordien avant d'atteindre les galeries d'accès, puis le forage. Seule la fraction d'activité qui suit une trajectoire à composante horizontale dans les ouvrages ou la zone endommagée associée est susceptible d'atteindre le forage.

Le transfert des radionucléides suit des modalités différentes selon le comportement chimique des éléments concernés. On a donc choisi de présenter les résultats en distinguant quatre types de radionucléides différents :

- les radionucléides à vie longue solubles et non ou très faiblement sorbés (^{129}I , ^{36}Cl , ^{41}Ca),
- les radionucléides à vie moyenne faiblement sorbés et les radionucléides à vie longue moyennement ou fortement sorbés (^{135}Cs , ^{14}C , ^{107}Pd , ^{59}Ni , ^{93}Zr , ^{93}Mo),
- les radionucléides non sorbés, mais précipitant dans la bentonite ou les argilites (en l'occurrence, uniquement ^{79}Se),
- les radionucléides à vie moyenne ou longue très fortement sorbés (^{126}Sn , ^{99}Tc , $^{166\text{m}}\text{Ho}$, ^{94}Nb).

Les radionucléides à vie longue solubles et non ou très faiblement sorbés

La répartition de la masse émise par les colis dans le champ proche de l'alvéole, à l'échéance du million d'années, est détaillée dans le Tableau 7.4-7, selon que les radionucléides entrent dans la galerie attenante ou entrent dans le milieu géologique.

Radionucléides	Masse sortant du champ proche de l'alvéole (« entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien » + « entrant dans la galerie »)	Répartition du relâchement des alvéoles	
		Masse « entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien sain » (voie 1) ⁹⁶	Masse « entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁶
^{129}I	100,00 %	42 %	58 %
^{36}Cl	86,07 %	40 %	46,07 %
^{41}Ca	97,45 %	57,99 %	39,46 %

Tableau 7.4-7 *SEA forage abandonné dans le stockage - répartition des voies de transfert dans le champ proche des alvéoles - masse sortant des différents composants sur 1 million d'années – colis-type CU1 - radionucléides à vie longue solubles et non ou très faiblement sorbés*

On constate que ces radionucléides parviennent à sortir de l'alvéole. L'atténuation de la masse dans le champ proche est très faible, voire nulle. On distingue l'iode et le chlore pour lesquels la masse émise par les colis atteint préférentiellement les galeries en migrant par diffusion dans les ouvrages situés entre les colis et la galerie d'accès. Il est à noter que les conditions aux limites choisies vis-à-vis de la voie de transfert à composante horizontale (concentration nulle au droit du bouchon) tendent à favoriser la migration à l'horizontale pour tous les radionucléides. Le calcium 41, partiellement sorbé par la formation hôte, y migre préférentiellement.

⁹⁶ Voir Figure 7.4-15

La masse entrant dans les galeries et atteignant le forage est extrêmement dépendante de la position des alvéoles pour rapport au forage. Plus les alvéoles sont éloignées du forage moins elles contribuent à l'impact du forage. Ainsi, le ratio de la masse qui atteint le forage par rapport à la masse totale initiale d'une sous-zone est extrêmement limité. Ces ratios sont fournis dans le Tableau 7.4-8. Les pourcentages sont donnés par rapport à l'inventaire initial total de la sous-zone de stockage concernée par le forage.

Radionucléides	% Masse « Entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁶	% Masse atteignant le forage par les galeries (voie 3) ⁹⁶	% Masse atteignant le toit du Callovo-Oxfordien par le forage (voie 5) ⁹⁶
¹²⁹ I	58 %	1,455 %	1,42 %
³⁶ Cl	46,07 %	0,82 %	0,79 %
⁴¹ Ca	39,46 %	0,025 %	0,005 %

Tableau 7.4-8 *SEA forage abandonné dans le stockage - voies de transfert depuis les ouvrages de stockage jusqu'au forage – pourcentage de la masse sortant du forage sur 1 million d'années. - radionucléides à vie longue solubles et non ou très faiblement sorbés*

La fraction d'activité d'iode 129 atteignant le forage est, à l'échelle du million d'années, plus importante que celle du chlore 36 car ce dernier bénéficie de la décroissance radioactive. En effet, on montre que la masse d'iode 129 captée par le forage correspond à la masse présente initialement dans 15 alvéoles alors que pour le chlore 36, elle correspond à la masse présente initialement dans 8 alvéoles.

La fraction de calcium 41 qui atteint le forage est plus limitée par rapport à celle de l'iode 129 et du chlore 36. Cette différence résulte du coefficient de diffusion effectif des cations dans la formation hôte, plus fort que celui des anions ; il tend à favoriser le transfert des radionucléides depuis les galeries vers le Callovo-Oxfordien plutôt que vers le forage.

La Figure 7.4-16 présente, en divers points entre le colis et le forage, les débits molaires d'iode 129, ainsi que la répartition entre les voies de transfert.

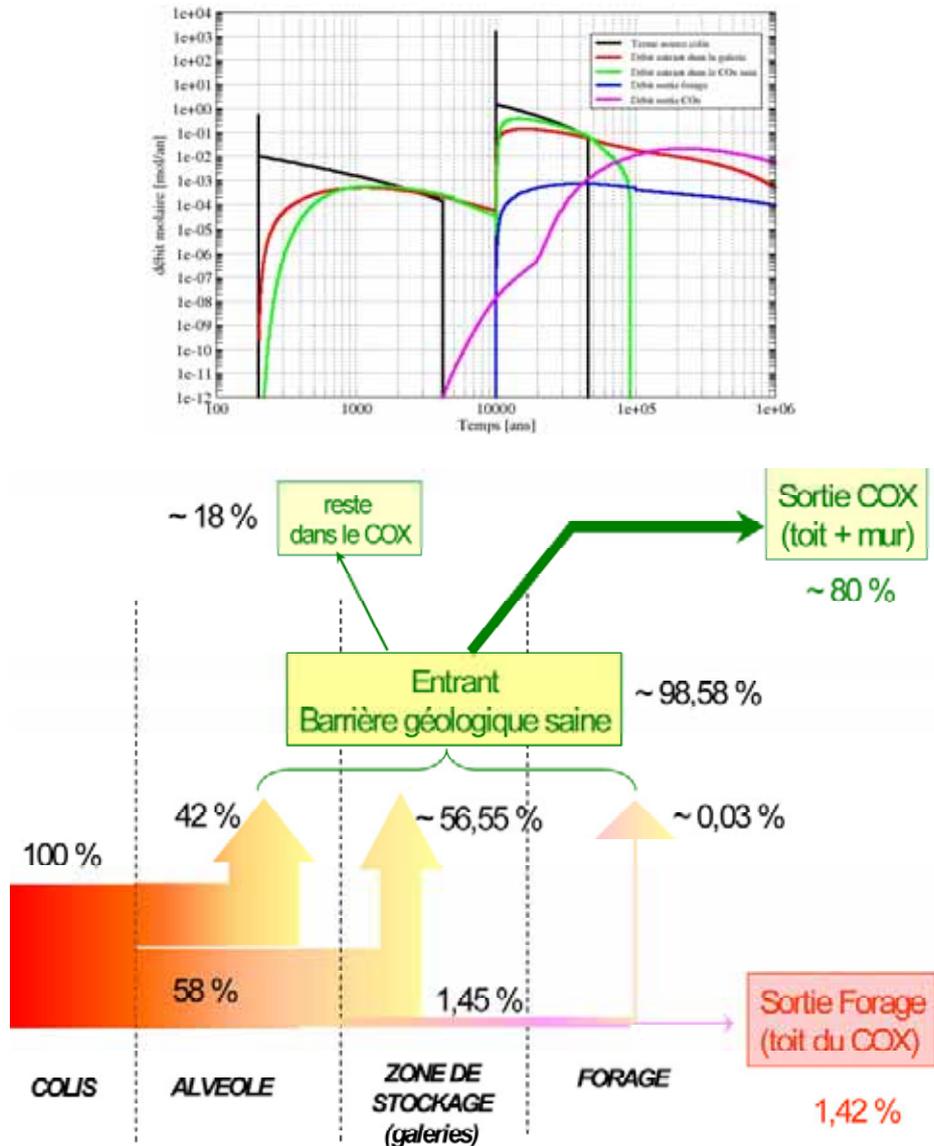


Figure 7.4-16

SEA forage abandonné dans le stockage - Historique de débit molaire en champ proche et détail de répartition des voies de transfert - ^{129}I

Les radionucléides à vie moyenne faiblement sorbés et les radionucléides à vie longue moyennement ou fortement sorbés

Au niveau des alvéoles, les radionucléides à vie moyenne très faiblement ou faiblement sorbés (^{14}C , ^{93}Mo) ainsi que les radionucléides à vie longue moyennement ou fortement sorbés (^{135}Cs , ^{59}Ni , ^{107}Pd , ^{93}Zr) dans le Callovo-Oxfordien et dans les ouvrages, bénéficient de la décroissance radioactive et/ou restent confinés pour l'essentiel (au minimum 80 %) dans le champ proche. En effet, la masse sortant des ouvrages (voir Tableau 7.4-9) varie de moins d'un pourcent (0,15 % pour le ^{93}Mo) à quelques dizaines de pourcents (14,46 % pour le ^{135}Cs); leur sorption leur permet de bénéficier de la décroissance radioactive et de l'étalement diffusif dans le champ proche de l'alvéole et l'image de la fraction labile émise par le colis est atténuée en sortie d'alvéole. De plus, les radionucléides migrent préférentiellement dans la formation hôte.

Radionucléides	Masse sortant du champ proche de l'alvéole (« entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien » + « entrant dans la galerie »)	Répartition du relâchement des alvéoles	
		Masse « entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien sain » (voie 1) ⁹⁶	Masse « entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁶
¹³⁵ Cs	14,46 %	9,55 %	4,91 %
¹⁴ C	12,17 %	8,19 %	3,98 %
¹⁰⁷ Pd	6,32 %	3,22 %	3,10 %
⁵⁹ Ni	2,33 %	1,18 %	1,15 %
⁹³ Zr	0,63 %	0,45 %	0,18 %
⁹³ Mo	0,15 %	0,00012 % ⁹⁷	0,15328 %

Tableau 7.4-9

SEA forage abandonné dans le stockage - Répartition des voies de transfert dans le champ proche des alvéoles - masse sortant des différents composants pendant 1 million d'années – colis-type CU1 - radionucléides à vie moyenne faiblement sorbés et les radionucléides à vie longue moyennement ou fortement sorbés

Les anions à vie moyenne faiblement sorbés (¹⁴C ; ⁹³Mo) n'atteignent le forage qu'en quantité limitée, car leur aptitude à se sorber dans la formation hôte favorise leur migration depuis les galeries vers la formation hôte et les radionucléides bénéficient de la décroissance radioactive dès lors que les alvéoles sont un peu éloignées du forage.

Les radionucléides fortement sorbés dans la formation hôte (¹³⁵Cs, ¹⁰⁷Pd, ⁵⁹Ni, ⁹³Zr, ¹²⁶Sn, ⁹⁹Tc, ^{166m}Ho, ⁹⁴Nb) migrent par diffusion depuis les galeries d'accès vers le milieu géologique, limitant fortement la masse de radionucléides qui atteint le forage. Pour les radionucléides qui atteignent malgré tout le forage, la capacité de sorption de ces radionucléides par la formation hôte favorise de nouveau un retour dans la roche et le débit molaire sortant par le forage au toit du puits est extrêmement faible, voire nul (voir Tableau 7.4-10).

⁹⁷ Même si la masse de ⁹³Mo migre préférentiellement vers la barrière géologique depuis l'alvéole, la masse de ⁹³Mo traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien apparaît inférieure à celle entrant dans la galerie (voie 2). Ceci est dû au fait que la dizaine de mètres de barrière géologique (au niveau de laquelle est calculée la masse empruntant la voie 1) est suffisante pour permettre au ⁹³Mo de bénéficier de la décroissance radioactive.

Radionucléides	% Masse « Entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁶	% Masse atteignant le forage par les galeries (voie 3) ⁹⁶	% Masse atteignant le toit du Callovo- Oxfordien par le forage (voie 5) ⁹⁶
¹⁴ C	3,98 %	0,0085 %	0,0075 %
⁹³ Mo	0,15328 %	0,000165 %	0,000125 %
¹³⁵ Cs	4,91 %	0,00046 %	0,00003 %
¹⁰⁷ Pd	3,10 %	0,00026 %	0,00001 %
⁵⁹ Ni	1,15 %	0,0001 %	0,000005 %
⁹³ Zr	0,18 %	0,000015 %	Nul

Tableau 7.4-10

SEA forage abandonné dans le stockage - Voies de transfert depuis les ouvrages de stockage jusqu'au forage – pourcentage de la masse sortant du forage sur 1 million d'années. - radionucléides à vie moyenne faiblement sorbés et les radionucléides à vie longue moyennement ou fortement sorbés

La Figure 7.4-17 illustre la migration du nickel 59.

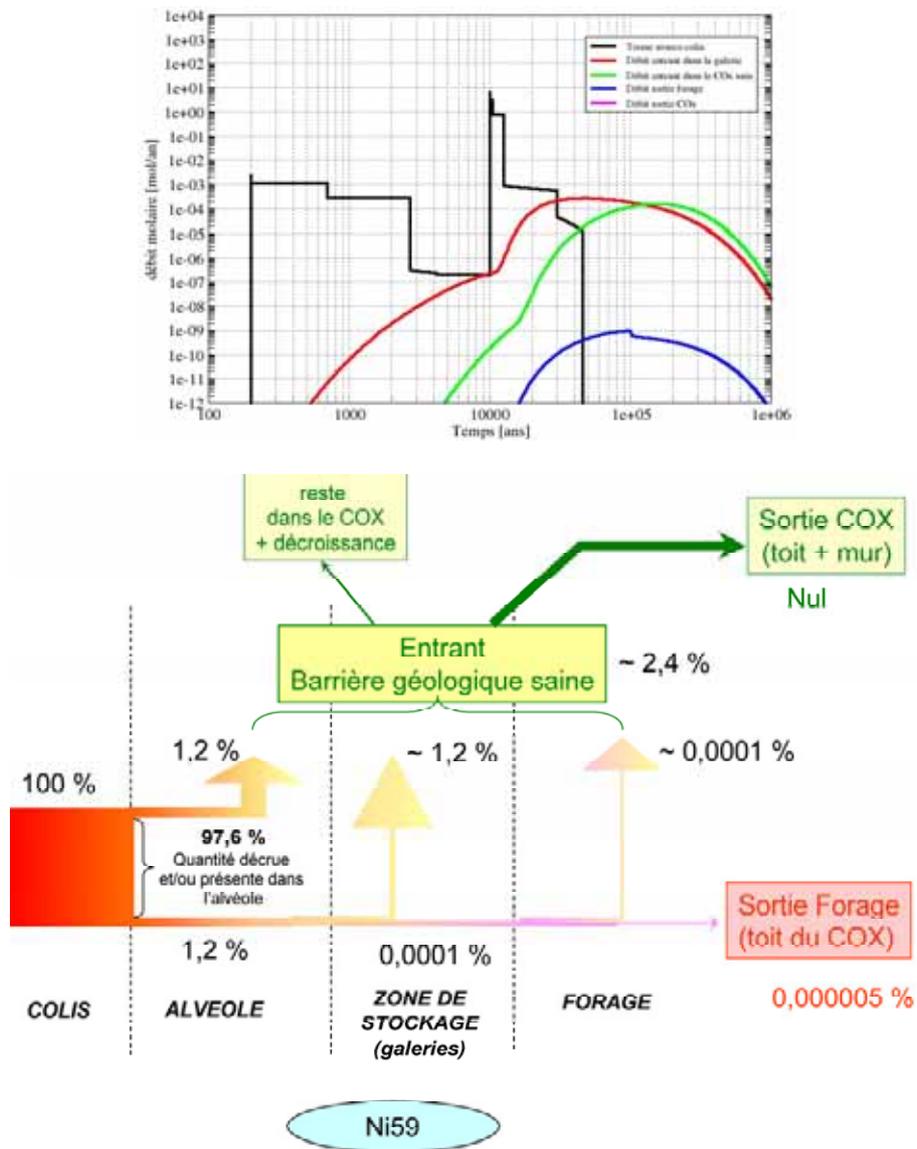


Figure 7.4-17 SEA forage abandonné dans le stockage - Historique de débit molaire en champ proche et détail de répartition des voies de transfert – Nickel 59

Les radionucléides non sorbés, mais précipitant dans la bentonite ou les argilites

Le ^{79}Se , non sorbé mais précipitant dans le champ proche, présente un débit d'activité fortement atténué en sortie d'alvéoles. Cette atténuation se répercute sur la masse sortant du champ proche de l'alvéole sur la durée de l'analyse (1 million d'années). Le transfert du sélénium jusqu'au forage est également limité (voir Tableau 7.4-11 et Tableau 7.4-12).

Radionucléides	Masse sortant du champ proche de l'alvéole (« entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien » + « entrant dans la galerie »)	Répartition du relâchement des alvéoles	
		Masse « entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien sain » (voie 1) ⁹⁶	Masse « entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁶
⁷⁹ Se	0,564 %	0,3347 %	0,2290 %

Tableau 7.4-11

SEA forage abandonné dans le stockage - Répartition des voies de transfert dans le champ proche des alvéoles - masse sortant des différents composants pendant 1 million d'années – colis-type CU1 - radionucléide non sorbé mais précipitant dans la bentonite ou les argilites

Radionucléides	% Masse « Entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁵	% Masse atteignant le forage par les galeries (voie 3) ⁹⁶	% Masse atteignant le toit du Callovo-Oxfordien par le forage (voie 5) ⁹⁶
⁷⁹ Se	0,229 %	0,00235 %	0,00225 %

Tableau 7.4-12

SEA forage abandonné dans le stockage - Voies de transfert depuis les ouvrages de stockage jusqu'au forage – pourcentage de la masse sortant du forage sur 1 million d'années. - radionucléide non sorbé mais précipitant dans la bentonite ou les argilites.

Les radionucléides à vie moyenne ou longue très fortement sorbés

Ces radionucléides restent presque totalement confinés dans le champ proche de l'alvéole et/ou bénéficient de la décroissance radioactive. Dans le cas du ¹²⁶Sn et du ⁹⁹Tc, une très faible quantité de la masse diffuse dans les ouvrages et atteint les galeries contiguës au bouchon d'alvéole. Néanmoins, ces éléments étant très fortement sorbés dans la formation hôte, cette dernière continue à les piéger dans leur cheminement vers les galeries, et la faible quantité de ⁹⁹Tc et ¹²⁶Sn qui atteint les galeries ne peut rejoindre le forage (voir Tableau 7.4-13 et Tableau 7.4-14).

Radionucléides	Masse sortant du champ proche de l'alvéole (« entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien » + « entrant dans la galerie »)	Répartition du relâchement des alvéoles	
		Masse « entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien sain » (voie 1) ⁹⁶	Masse « entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁶
¹²⁹ Sn	0,00075 %	Nul	0,00075 %
⁹⁹ Tc	0,00009 %	Nul	0,00009 %
^{166m} Ho	Nul	Nul	Nul
⁹⁴ Nb	nul	Nul	Nul

Tableau 7.4-13

SEA forage abandonné dans le stockage - Répartition des voies de transfert dans le champ proche des alvéoles - masse sortant des différents composants pendant 1 million d'années – colis-type CU1 - radionucléides à vie moyenne ou longue très fortement sorbés

Radionucléides	% Masse « entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁶	% Masse atteignant le forage par les galeries (voie 3) ⁹⁶	% Masse atteignant le toit du Callovo-Oxfordien par le forage (voie 5) ⁹⁶
¹²⁶ Sn	0,00075 %	Nul	Sans objet
⁹⁹ Tc	0,00009 %	Nul	Sans objet
^{166m} Ho	Nul	Sans objet	Sans objet
⁹⁴ Nb	Nul	Sans objet	Sans objet

Tableau 7.4-14

SEA forage abandonné dans le stockage - Voies de transfert depuis les ouvrages de stockage jusqu'au forage – pourcentage de la masse sortant du forage sur 1 million d'années. – combustibles usés CU1 - radionucléides à vie moyenne ou longue très fortement sorbés

Conclusion relative à l'effet du forage pour les combustibles usés

L'analyse a mis en évidence que l'effet hydraulique du forage est limité, et que le transport au sein du stockage tant au niveau de alvéole qu'au niveau des galeries reste diffusif ou en co-dominance diffusif convectif, avec des cinétiques de transfert extrêmement lentes.

L'impact radiologique du forage est fortement limité également :

- d'une part, car une partie de l'activité migre par diffusion dans le Callovo-Oxfordien et reste dans ce dernier. Ce phénomène concerne les radionucléides qui sont sorbés dans la formation hôte ;
- d'autre part, car la fraction d'activité qui migre vers les galeries d'accès n'atteint pas systématiquement le forage. En effet, les alvéoles situées dans les modules adjacents, du fait de l'efficacité des scellements en particulier, ne contribuent que très peu à l'impact du forage aux échelles de temps étudiées. De même, les alvéoles du module impacté participent d'autant moins à l'impact qu'elles sont éloignées du forage. En outre, la fraction d'activité captée par le forage est spécifique à chaque radionucléide. Elle est d'autant plus importante que les radionucléides sont solubles, non sorbés et à vie longue.

Ainsi dans le cas de l'iode (cas le plus pénalisant), le forage draine une activité correspondant à une activité initiale moyenne égale à 1,45 % de celle de la sous-zone de stockage et moins de 0,4 % de la

totalité de la zone de combustibles usés CU1. L'impact du forage reste donc extrêmement limité à l'échelle du stockage.

Il est à noter que, pour les éléments non sorbés dans les ouvrages, le maximum de débit d'activité au niveau du forage survient quelques milliers d'années après la rupture du conteneur de combustibles usés. Pour les éléments plus sorbés, le maximum de débit est retardé et l'influence de la fraction labile est lissée.

● Cas des déchets C

Les résultats relatifs aux déchets C sont similaires à ceux des combustibles usés, hormis la date de relâchement et de transfert des radionucléides qui survient plus tôt (la rupture du surconteneur s'effectue à 4 000 ans au lieu de 10 000 ans pour les CU). L'absence de corps de barrière ouvragée et de zone fracturée au droit du bouchon n'influe pas ou peu sur le résultat dans la mesure où :

- l'argilite en champ proche pour les alvéoles C joue alors un rôle similaire à celui de la barrière ouvragée des alvéoles CU ;
- l'influence de la zone microfissurée créant un court-circuit direct entre les colis et la galerie est limitée car le transport reste diffusif au niveau du corps de l'alvéole (ou en co-dominance diffusive-convective en tête d'alvéole).

Le Tableau 7.4-15 présente la répartition entre les voies de transfert au niveau de l'alvéole et jusqu'au forage pour les principaux radionucléides étudiés.

Radionucléide	Répartition du relâchement des alvéoles		% Masse atteignant le forage par les galeries (voie 3) ⁹⁶	% Masse atteignant le toit du Callovo-Oxfordien par le forage (voie 5) ⁹⁶
	Masse « entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien sain » (voie 1) ⁹⁶	Masse « entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁶		
¹²⁹ I	39,82%	60,18%	1,28%	1,24%
³⁶ Cl	51,23%	46,50%	0,78%	0,75%
⁴¹ Ca	49,62%	32,23%	Nul	Sans objet
¹³⁵ Cs	7,06%	3,60%	0,00033%	0,000015%
¹⁴ C	4,15%	2,36%	0,0050%	0,0045%
¹⁰⁷ Pd	1,95%	1,95%	0,00016%	0,0000043%
⁵⁹ Ni	0,93%	0,85%	0,000077%	0,0000026%
⁹³ Zr	0,62%	0,38%	0,000036%	0,0000013%
⁹³ Mo	0,0000041%	0,00070%	0,0000092%	0,0000076%
⁷⁹ Se	0,16%	0,11%	0,0011%	0,0010%
¹²⁶ Sn	Nul	0,000059%	Nul	Sans objet
⁹⁹ Tc	Nul	0,000031%	Nul	Sans objet
^{166m} Ho	Nul	Nul	Sans objet	Sans objet
⁹⁴ Nb	Nul	Nul	Sans objet	Sans objet

Les pourcentages sont donnés par rapport à l'inventaire initial total de la sous-zone de stockage concernée par le forage

Tableau 7.4-15

SEA forage abandonné dans le stockage - Répartition des voies de transfert - masse sortant des différents composants du système de stockage et du forage pendant 1 million d'années - Colis type C2 - calculs de référence

● **Cas des déchets B**

Les calculs ont été réalisés pour les déchets B non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (B1x) et pour les colis de boues bitumées. L'analyse qui suit, sur la répartition des voies de transfert, est menée pour les colis types B1x qui induisent le plus fort impacts radiologique (les résultats restant qualitativement similaire pour les colis de boues bitumés). Les doses à l'exutoire Saulx sont néanmoins fournies pour tous les colis types étudiés dans le Tableau 7.4-18. La situation étudiée en référence diffère de celle retenue pour les combustibles usés ou pour les déchets C, dans la mesure où le forage est réalisé directement en tête d'alvéole de déchets B (voir Figure 7.4-18). Cette situation est particulièrement pénalisante du fait qu'il n'existe pas de bouchon ni de formation hôte entre les colis et le forage permettant de retarder et d'atténuer le flux de radionucléides. Par ailleurs, les conteneurs primaires de déchets B étant supposés non étanches dès la fermeture du stockage, et la phase de resaturation étant négligée, une fraction de l'activité est déjà présente dans l'alvéole hors des colis primaires à l'occurrence du forage. L'impact associé au forage peut donc apparaître peu après son occurrence en particulier dans le cas des radionucléides non sorbés dans le béton.

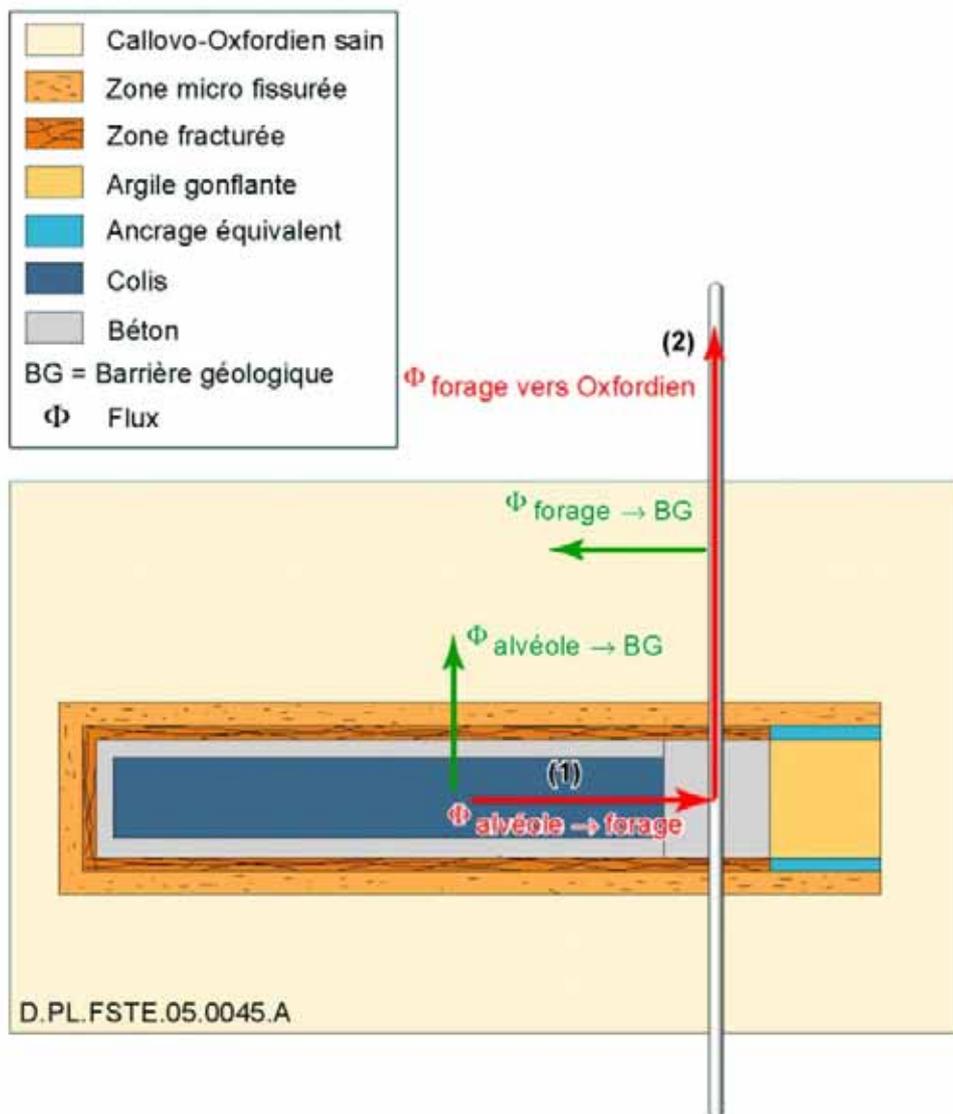


Figure 7.4-18

SEA forage abandonné dans le stockage - Organisation des voies de transfert en champ proche alvéole - alvéole de déchets B

Le nombre de Pécelet en tête d'alvéole de déchets B est de l'ordre de 1 ; le transport dans l'alvéole reste donc diffusif de manière dominante. Les cinétiques sont néanmoins plus rapides que dans le cas de déchets C ou des combustibles usés.

Dans la mesure où les colis ne présentent pas de fonction d'étanchéité et peuvent relâcher l'activité dès la fermeture du stockage, l'évaluation de l'impact de cette situation a été menée avec les radionucléides de période supérieure à 30 ans, période minimale choisie arbitrairement au regard de la date d'occurrence du forage et de manière à intégrer des radionucléides tels que le césium 137 et le strontium 90 en quantité relativement significative dans les colis ; ce choix conduit à retenir 54 radionucléides. Il s'avère que la fraction d'activité relâchée par le forage par rapport à l'activité totale initiale du module est très limitée, voire nulle pour la majorité des radionucléides. Cette atténuation résulte :

- d'une part, du fait que la majorité des radionucléides est fortement sorbée dans le béton. Ce phénomène est accru pour les radionucléides à vie courte qui ont déjà bénéficié de la décroissance radioactive pendant les 500 ans précédant le forage ;
- d'autre part, du fait qu'une grande partie des radionucléides migre par diffusion dans le Callovo-Oxfordien où ils sont sorbés.

Ainsi sur l'ensemble des radionucléides étudiés, seuls 27 radionucléides sur 54 ont une masse sortant du forage non totalement atténuée par rapport à la masse totale initiale présente dans l'alvéole. Par ailleurs, parmi ces radionucléides, certains présentent des débits molaires extrêmement faibles du fait de leur faible quantité initiale dans les colis de déchets.

Le Tableau 7.4-16 donne la liste des radionucléides qui sont susceptibles de présenter un débit non nul à la sortie du forage.

La fraction d'activité de la masse sortant du forage par rapport à l'activité totale initiale de l'alvéole est présentée dans le Tableau 7.4-17 (à titre d'exemple pour les colis de déchets stockés dans les alvéoles accueillant des colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène - alvéole de type B1x).

Radionucléides	Période [ans]	Retard barrière géologique [-]	Solubilité dans le béton [mol/m ³]	Retard barrière ouvrageée béton [-]
¹²⁹ I	15 700 000	1	soluble	8
²⁶ Al	720 000	1	3.10 ⁻⁴	1
³⁶ Cl	302 000	1	soluble	1
⁵³ Mn	3 700 000	1	soluble	1
⁴⁰ K	1 280 000 000	14	soluble	1
¹⁰ Be	1 600 000	31 900	soluble	8
⁸⁷ Rb	48 000 000 000	30	soluble	71
¹⁹⁴ Hg*	520	1	2.10 ⁻¹	1
⁹³ Mo	3 500	1	7.10 ⁻⁴	1
⁷⁹ Se	65 000	1	1,3.10 ⁻²	701
⁴¹ Ca	103 000	16	20	3 500
¹⁴ C	5 730	5,6	1.10 ⁻²	3 500
¹³⁵ Cs	2 300 000	Iso. de Langmuir**	soluble	70
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	8 950	1.10 ⁻²	4 200
⁵⁹ Ni	75 000	2 050	2,3.10 ⁻⁴	14 000
⁹² Nb	35 000 000	53 400	2,4.10 ⁻⁴	70 000
^{93m} Nb	16,4	53 400	2,4.10 ⁻⁴	70 000
⁹⁴ Nb	20 300	53 400	2,4.10 ⁻⁴	70 000
⁹⁹ Tc	213 000	128 000	soluble	210 000
⁹³ Zr	1 530 000	12 8000	6.10 ⁻³	280 000
* : Radionucléide dont les valeurs de sorption et de précipitation sont retenues arbitrairement pénalisantes par manque de données				
** Isotherme de Langmuir : $K_d = (1,85 \cdot 10^{-7}) / (4,76 \cdot 10^{-7} + C_{eq})$ avec C_{eq} : concentration en solution (mol/l)				

Tableau 7.4-16

SEA forage abandonné dans le stockage - Principales caractéristiques intervenant dans la rétention des radionucléides

Radionucléides	Période [ans]	Relâchement de l'alvéole vers le forage	Relâchement vers Oxfordien (sortie forage)
¹²⁹ I	15 700 000	22,400 %	21,70 %
²⁶ Al	720 000	20,060 %	19,33 %
³⁶ Cl	302 000	16,610 %	15,89 %
⁵³ Mn	3 700 000	3,400 %	0,910 %
⁴⁰ K	1 280 000 000	1,700 %	0,400 %
¹⁰ Be	1 600 000	1,4869 %	0,3515 %
⁸⁷ Rb	48 000 000 000	0,5200 %	0,0350 %
¹⁹⁴ Hg ⁹⁸	520	0,4000 %	0,3500 %
⁷⁹ Se	65 000	0,2100 %	0,2000 %
⁹³ Mo	3 500	0,2100 %	0,1600 %
⁴¹ Ca	103 000	0,0330 %	0,00500 %
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	0,0720 %	0,00100 %
¹³⁵ Cs	2 300 000	0,0870 %	0,00074 %
¹⁴ C	5 730	0,000120 %	0,0001000 %
⁹² Nb	35 000 000	0,00210 %	0,0014000 %
^{93m} Nb	16,4	0,00130 %	0,0005000 %
⁹³ Zr	1 530 000	0,0000810 %	0,0000130 %
⁵⁹ Ni	75 000	0,00120 %	0,0000110 %
⁹⁹ Tc	213 000	0,00400 %	0,0000020 %
⁹⁴ Nb	20 300	0,0000030 %	0,0000012 %

Tableau 7.4-17 *SEA forage abandonné dans le stockage - Fraction d'activité qui atteint le forage par rapport à l'activité totale initiale contenue dans l'alvéole – Colis type Blx*

On note que :

- seuls trois radionucléides (¹²⁹I, ²⁶Al, ³⁶Cl) ont une masse sortant du forage qui représente 15 à 20 % de la masse totale présente initialement dans l'alvéole. Ces radionucléides à vie longue ne précipitent pas dans le béton ; ils ne sont pas sorbés dans la formation hôte⁹⁹ et peu ou pas dans le béton. Ainsi, dans la mesure où la migration s'effectue essentiellement par diffusion, la répartition de la masse entre la voie de transfert à composante horizontale et celle à composante verticale vers le Callovo-Oxfordien dépend étroitement des surfaces d'échange développées à l'interface alvéole / barrière géologique. Pour ces radionucléides qui sont pas ou peu sorbés dans le béton, le maximum de débit molaire sortant du forage se situe à l'occurrence du forage (500 ans) ou peu de temps après dans le cas de l'iode qui est faiblement sorbé (voir Figure 7.4-19 et Figure 7.4-20) ;

⁹⁸ Le mercure 194 de période de décroissance relativement courte (520 ans). Ce radionucléide considéré non sorbé dans le béton et dans l'argilite par manque de données, présente une atténuation en sortie de forage de l'ordre de 0,35 %, atténuation étroitement liée à la décroissance radioactive du ¹⁹⁴Hg dans le colis de déchets. Ce résultat (atténuation non totale) n'est cependant pas représentatif au regard des hypothèses pénalisantes retenues pour ses caractéristiques géochimiques.

⁹⁹ On notera que, pour ²⁶Al, cette hypothèse résulte d'un choix arbitraire par manque de données chimiques sur son comportement

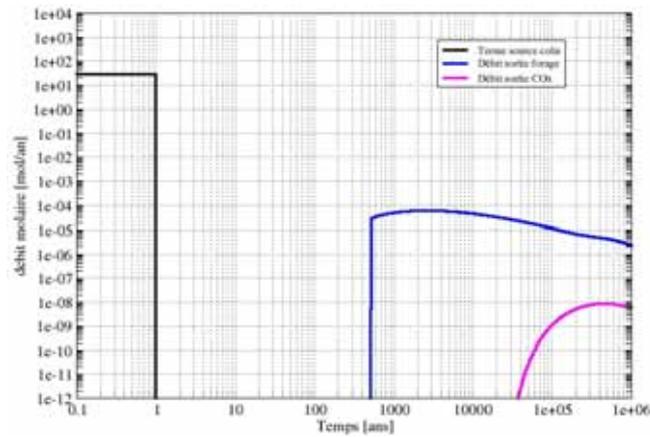


Figure 7.4-19

SEA forage abandonné dans une alvéole de déchets B - Historique de débit molaire en champ proche – colis type B1x – ^{129}I

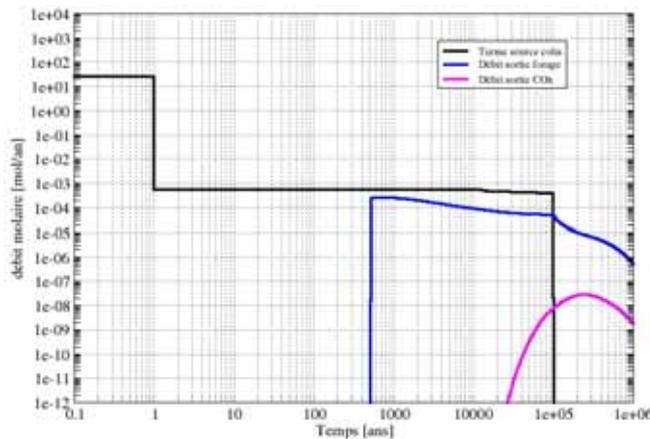


Figure 7.4-20

SEA forage abandonné dans une alvéole de déchets B - Historique de débit molaire en champ proche – colis type B1x – ^{36}Cl

- pour tous les autres radionucléides, la masse sortant du forage est inférieure à 1 % de la masse totale initiale présente dans le module. Cette atténuation est corrélée aux caractéristiques intrinsèques et au comportement des radionucléides dans les matériaux. Il peut s'agir :
 - (i) de cations à vie longue non ou peu sorbés (et ne précipitant pas) dans le béton et dans la formation hôte argileuse. Dans ce cas, la fraction d'activité atteignant, puis sortant du forage est limitée par la migration significative des radionucléides vers le Callovo-Oxfordien. En effet, le coefficient de diffusion effectif des cations dans la formation hôte tend à favoriser le transfert des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien plutôt que dans le forage. C'est notamment le cas de ^{53}Mn , ^{40}K , ^{10}Be ;
 - (ii) des éléments à vie moyenne ou longue dont la sorption dans le béton des alvéoles suffit à atténuer considérablement leur transfert jusqu'au forage ; c'est le cas notamment de ^{79}Se , ^{41}Ca , ^{107}Pd , ^{14}C , ^{92}Nb , ^{93}Zr (\rightarrow ^{93}Nb), ^{59}Ni , ^{99}Tc et ^{94}Nb . Pour la plupart de ces radionucléides (tous hormis ^{79}Se , ^{41}Ca et ^{14}C), cet effet est amplifié par une sorption importante dans la barrière géologique saine et endommagée ; dans ce cas, les gradients de concentration entre l'alvéole et la barrière géologique sont forts et ils favorisent le transfert par diffusion radiale vers la formation hôte.

On note les cas particuliers :

- du césium 135 peu sorbé dans le béton, dont l'atténuation de la masse sortant du forage est essentiellement liée à la forte sorption dans la barrière géologique;
- du molybdène 93 non sorbé dans le béton et dans les argilites du Callovo-Oxfordien, dont l'atténuation de la masse captée par le forage par rapport à la masse présente initialement dans l'alvéole, résulte de la précipitation dans le béton et de la décroissance radioactive.

La quantité de radionucléides sortant du forage au toit du Callovo-Oxfordien est dans tous les cas inférieure à la quantité de radionucléides captée dans le forage au niveau des galeries. Dans la partie du forage située au-dessus du stockage, les radionucléides fortement sorbés dans la barrière géologique migrent préférentiellement vers cette dernière, ce qui atténue la masse atteignant le toit du Callovo-Oxfordien par le forage : ainsi pour les radionucléides fortement sorbés dans la barrière géologique tels que ^{107}Pd , ^{59}Ni , ^{135}Cs , ^{99}Tc ou ^{93}Zr , le débit molaire maximum diminue de plus d'un ordre de grandeur entre l'entrée et la sortie du forage.

Conclusion relative à l'impact du forage pour les déchets B

L'analyse a mis en évidence que l'effet hydraulique du forage est limité et que le transport au sein de l'alvéole de déchets B reste diffusif ou en co-dominance diffusif / convectif.

L'impact radiologique du forage est également fortement limité :

- d'une part, car une partie de l'activité migre par diffusion dans le Callovo-Oxfordien et reste dans ce dernier. Ce phénomène est d'autant plus important que les radionucléides sont sorbés dans la formation hôte ;
- d'autre part, car un grand nombre de radionucléides est fortement sorbé dans le béton des alvéoles et de colisage. Ainsi pour ces radionucléides, les débits d'activité sont extrêmement faibles et retardés dans le temps (en particulier niobium, technétium, zirconium).

Les radionucléides qui présentent les fractions d'activité les plus élevées atteignant le forage sont les espèces à vie longue solubles non ou faiblement sorbées dans la barrière ouvragée en béton et dans le Callovo-Oxfordien. Il s'agit en particulier de ^{129}I , du ^{36}Cl et du ^{26}Al . Ce dernier radionucléide est en faible quantité dans les colis de déchets. De plus, ces propriétés géochimiques ont été choisies pénalisantes par manque de données. Le résultat est donc vraisemblablement surestimé.

Pour l'ensemble des autres radionucléides, les fractions d'activité atteignant le forage sont inférieures à 1 % de l'activité totale initiale présente dans l'alvéole.

7.4.5 Evaluation de l'impact

L'impact a été évalué pour la fraction d'activité qui suit une évolution altérée. La fraction d'activité non impactée par le forage suit une évolution normale, elle est couverte par les résultats du SEN. On retient donc que :

- l'exutoire « pompage d'eau potable au Barrois » à proximité du forage est spécifique du scénario. L'impact à cet exutoire est donc un impact supplémentaire par rapport à ceux considérés en scénario d'évolution normale. Le Tableau 7.4-18 synthétise les maxima de dose et les principaux contributeurs à l'exutoire « pompage AEP » ;

Colis type	Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs
B1x - (colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène)	0,012	770	^{36}Cl ; ^{93}Mo
B2 - (boues bitumées)	0,00022	12 000	^{36}Cl ; ^{129}I
Verres C2	0,00065	25 000	^{36}Cl ; ^{129}I
Verres C4	0,00053	23 000	^{36}Cl ; ^{129}I
Combustibles usés CU1	0,0072	42 000	^{129}I
Combustibles usés CU2	0,0012	43 000	^{129}I

Tableau 7.4-18 *SEA forage abandonné dans le stockage – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoire pompage AEP dans le Barrois (cas le plus pénalisant) – tous déchets*

- l'exutoire Saulx est étudié en variante de l'exutoire Barrois défini ci-dessus (voir paragraphe 7.4.3.1). Les courbes de doses à l'exutoire « Saulx » (voir Figure 7.4-21 à Figure 7.4-30) correspondent à l'impact associé à la fraction d'activité qui sort du forage et qui suit donc une évolution altérée. Pour reconstituer l'impact total à cet exutoire, il conviendrait d'ajouter cet impact à celui du scénario d'évolution normale. On verra que l'impact ajouté par le forage à la Saulx est en fait négligeable devant celui du SEN.

Comme les temps de transfert dans les formations encaissantes sont faibles et la dispersion y est réduite, il n'y a en fait que peu de différence entre les deux exutoires, celui à la Saulx présentant néanmoins des impacts plus faibles.

● **Combustibles usés CU1 (UOx3)**

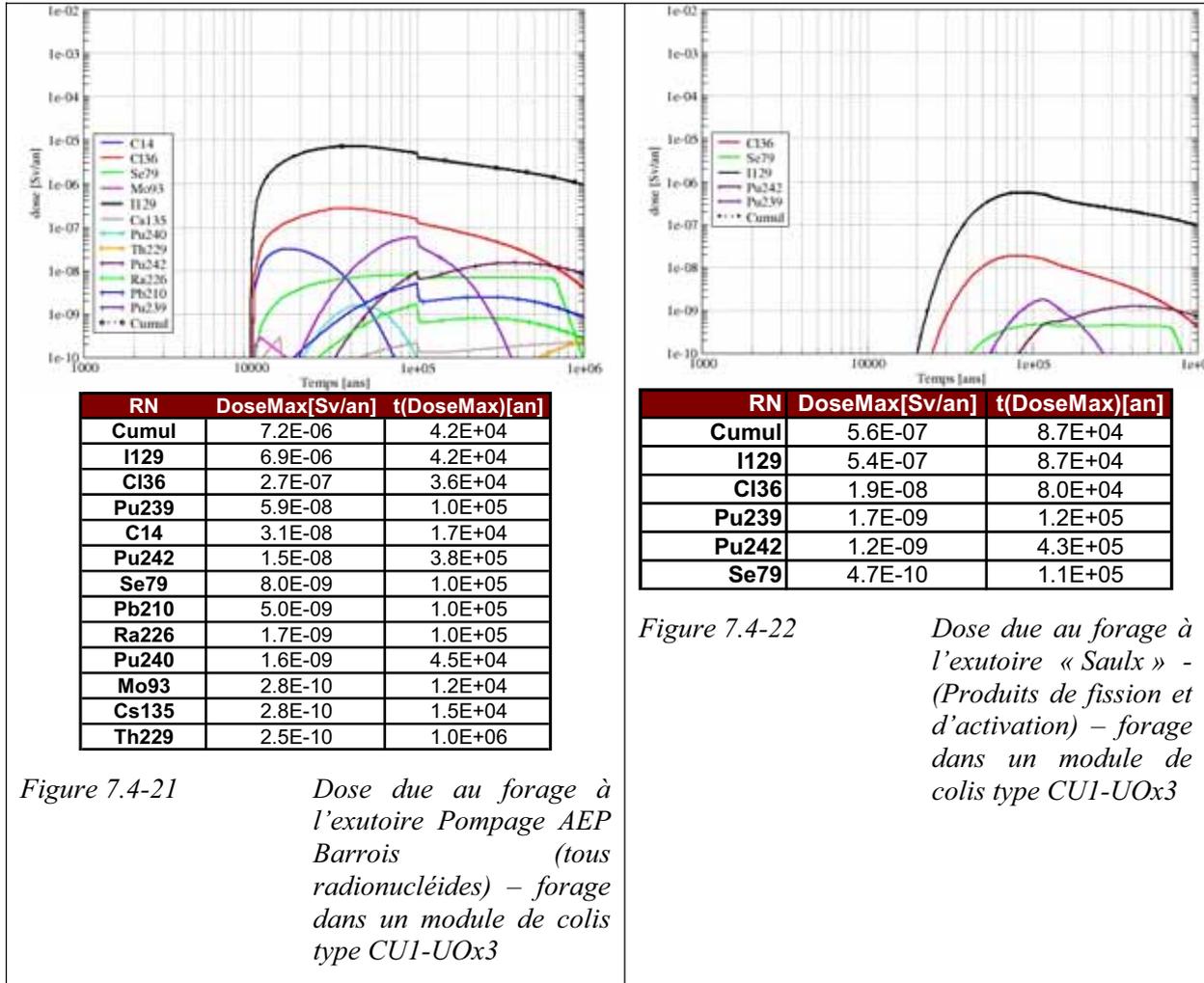


Figure 7.4-21

Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP Barrois (tous radionucléides) – forage dans un module de colis type CU1-UOx3

Figure 7.4-22

Dose due au forage à l'exutoire « Saulx » - (Produits de fission et d'activation) – forage dans un module de colis type CU1-UOx3

La dose maximale totale est dominée par l'iode 129 et dans une moindre mesure par le chlore 36.

A l'exutoire AEP, le maximum de dose est de l'ordre de 0,007 mSv/an ; il est atteint aux alentours de 50 000 ans. A l'exutoire Saulx étudié en variante, le maximum de dose, dû à la fraction d'activité sortant du forage, est de l'ordre de 0,0006 mSv/an ; il apparaît aux alentours de 90 000 ans.

La dose associée à la fraction d'activité qui suit une évolution normale n'est pas représentée ici. Elle est identique à la dose évaluée en SEN, car la fraction d'activité qui suit une évolution altérée est négligeable devant l'activité totale de la zone de combustibles usés CU1. Le maximum de dose de la fraction d'activité qui suit une évolution normale est atteint au plus tôt vers 330 000 ans et vaut environ 0,02 mSv/an.

● Combustibles usés CU2

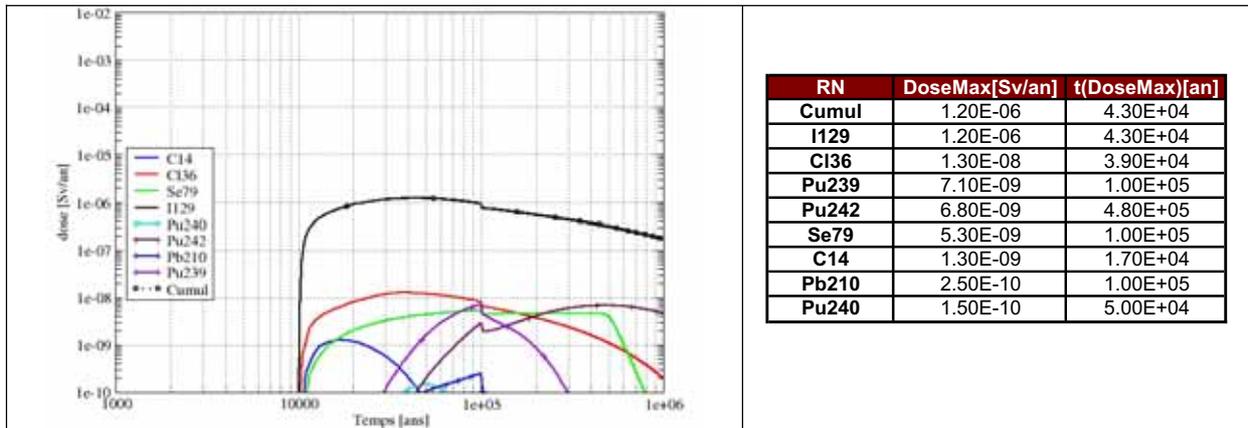


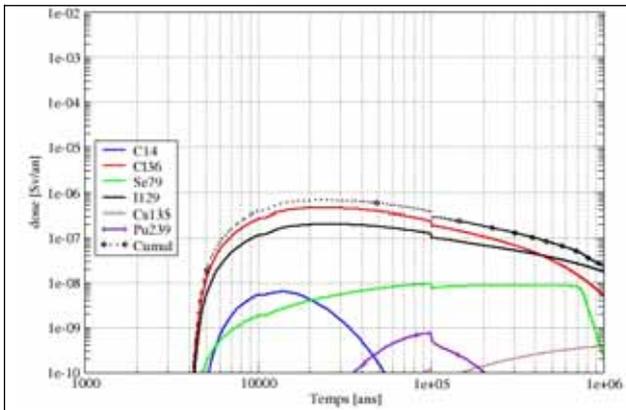
Figure 7.4-23

SEA forage abandonné dans le stockage - Calcul de référence – Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP dans le Barrois (tout radionucléides)-forage dans un module de colis type CU2

Comme pour les combustibles usés CU1, le principal contributeur à l'impact des combustibles usés CU2 est l'iode 129. Seul l'impact à l'exutoire AEP est représenté. Le maximum de dose de 0,0012 mSv/an est atteint aux alentours de 50 000 ans.

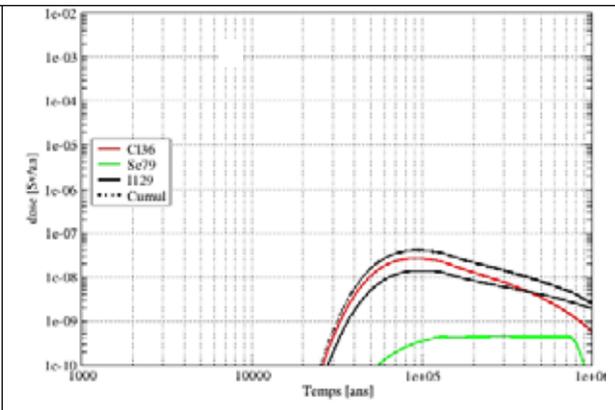
La dose associée à la fraction d'activité qui suit une évolution normale n'est pas représentée. Elle est identique à la dose évaluée en SEN ; le maximum de dose est atteint au plus tôt à 340 000 ans et vaut 0,0017 mSv/an.

● **Déchets C (C2 et C4)**



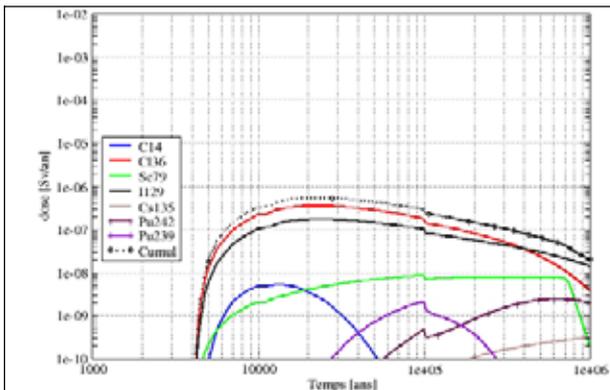
RN	DoseMax[Sv/an]	t(DoseMax)[an]
Cumul	6.5E-07	2.5E+04
Cl36	4.4E-07	2.3E+04
I129	2.0E-07	2.7E+04
Se79	9.4E-09	1.0E+05
C14	6.2E-09	1.4E+04
Pu239	7.4E-10	1.0E+05
Cs135	3.8E-10	1.0E+06

Figure 7.4-24 SEA forage abandonné dans le stockage - Calcul de référence - Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP Barrois (tout radionucléides) - forage dans un module de colis types C2



RN	DoseMax[Sv/an]	t(DoseMax)[an]
Cumul	4.0E-08	9.5E+04
Cl36	2.6E-08	9.2E+04
I129	1.4E-08	9.9E+04
Se79	4.4E-10	2.9E+05

Figure 7.4-25 SEA forage abandonné dans le stockage - Calculs de sensibilité - Dose due au forage à l'exutoire « Saulx »



RN	DoseMax[Sv/an]	t(DoseMax)[an]
Cumul	5.3E-07	2.3E+04
Cl36	3.5E-07	2.3E+04
I129	1.7E-07	2.4E+04
Se79	8.7E-09	1.0E+05
C14	5.2E-09	1.3E+04
Pu242	2.4E-09	6.3E+05
Pu239	2.0E-09	1.0E+05
Cs135	3.0E-10	1.0E+06

Figure 7.4-26 SEA forage abandonné dans le stockage - Calcul de référence - Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP dans le Barrois (tous radionucléides) - forage dans un module de colis types C4

Pour les déchets C le principal contributeur est le chlore36 qui est en quantité plus importante que dans les combustibles usés.

L'impact des colis types C2 est évalué à l'exutoire AEP et à l'exutoire Saulx étudié en variante pour la fraction qui transite par le forage. Celui des colis types C4 n'est présenté qu'à l'exutoire AEP. A cet

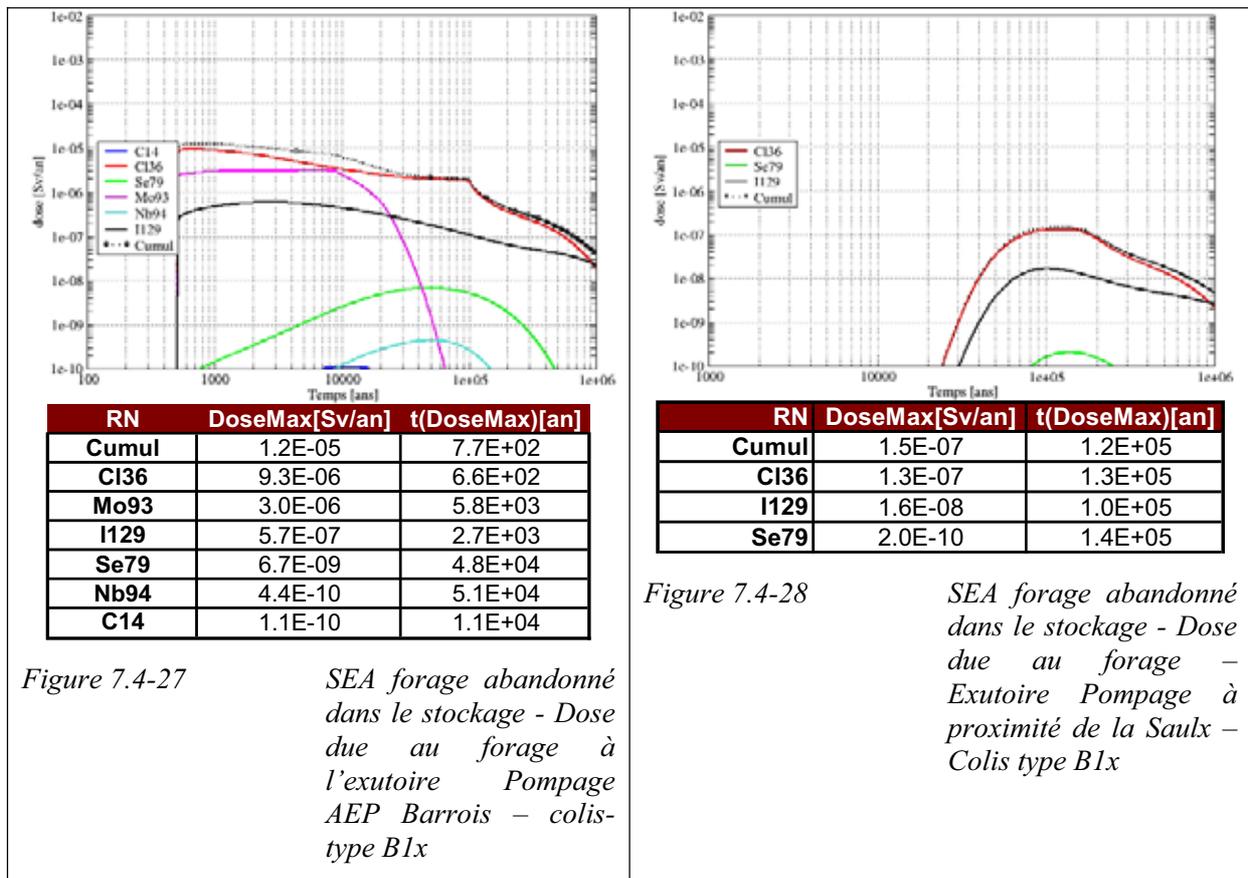
exutoire, le maximum de dose est de l'ordre de 0,0005 mSv/an pour les colis types C4 et 0,0006 mSv/an pour les colis types C2. Il survient aux alentours de 20 000 ans soit 20 000 ans plus tôt que pour les combustibles usés. Cet écart résulte d'une part de la durée d'étanchéité des conteneurs de combustibles usés plus longue que celle des déchets C, d'autre part de la prise en compte d'un modèle de relâchement pénalisant pour les déchets vitrifiés qui engendre un relâchement des radionucléides sur 10 000 ans environ contre 35 000 ans environ pour les combustibles usés CU1.

● Impact associé au forage dans une alvéole B1x

L'impact radiologique est dominé par les radionucléides suivants à court terme : ^{36}Cl , ^{93}Mo , ^{129}I et dans une moindre mesure ^{79}Se et ^{94}Nb . A plus long terme (au-delà de 50 000 ans) ce sont le chlore 36 et l'iode 129 qui dominent l'impact total, les autres ayant une activité qui a décrû. L'étalement par diffusion de l'iode 129 labile est très marqué compte tenu de son retard dans le béton. A l'inverse, le modèle de relâchement des gaines ($10^{-5}/\text{an}$) pour l'activité du chlore 36 explique la discontinuité à 100 000 ans observée sur les courbes. L'activité labile du chlore 36, étalée par diffusion avant l'occurrence du forage, explique la forte concentration dans le forage dès 500 ans.

A l'exutoire « pompage AEP », le maximum de dose se situe à la date d'occurrence du forage, soit 500 ans, avec une dose totale de l'ordre de 0,01 mSv/an. En effet, l'impact étant associé à l'iode qui est relâché de façon labile pour les colis stockés dans une alvéole B1x, cet élément est immédiatement disponible à l'arrivée d'eau. Le stockage étant supposé resaturé dès l'instant initial, le forage capte les éléments accumulés dans l'alvéole avant son occurrence.

A l'exutoire Saulx étudié en variante, seuls l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79 contribuent à l'impact, les autres radionucléides ayant bénéficié de la décroissance radioactive. Le maximum de dose de l'ordre de 0,00015 mSv/an est atteint aux alentours de 120 000 ans.



- **Impact associé au forage dans une alvéole B2**

Les radionucléides qui engendrent l'impact le plus élevé sont similaires à ceux des alvéoles de déchets B1x (^{36}Cl et ^{129}I dans une moindre mesure). Néanmoins, l'inventaire étant plus faible et le modèle de relâchement des colis de boues bitumées engendrant un relâchement plus lent (modèle COLONBO 3), l'impact est plus faible.

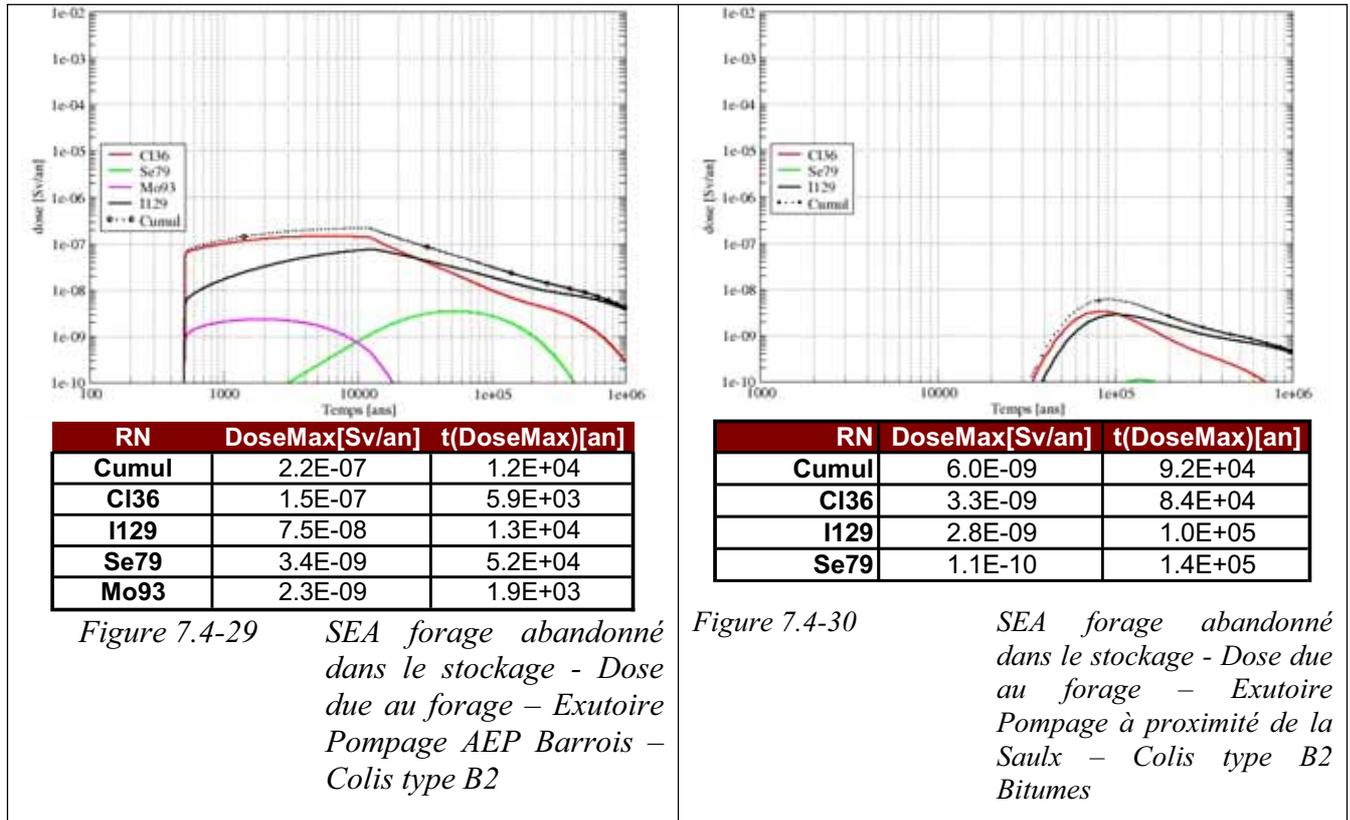


Figure 7.4-29 SEA forage abandonné dans le stockage - Dose due au forage – Exutoire Pompage AEP Barrois – Colis type B2

Figure 7.4-30 SEA forage abandonné dans le stockage - Dose due au forage – Exutoire Pompage à proximité de la Saulx – Colis type B2 Bitumes

7.4.6 Analyse de sensibilités

7.4.6.1 Sensibilité à la position du forage

- **Sensibilité à la position du forage – dans une alvéole de combustibles usés CU1**

Cette étude, menée à titre illustratif pour les combustibles usés CU1, consiste à évaluer les conséquences à long terme associées à la réalisation d'un forage impactant directement une alvéole, contrairement au calcul de référence des déchets C et des combustibles usés où le forage est supposé réalisé dans une galerie d'accès. Compte tenu du caractère extrêmement improbable d'une telle situation, on suppose que le forage n'est pas réalisé dans le module de stockage contenant le colis défaillant ; l'influence de ce dernier n'est donc pas visible au niveau du forage.

D'un point de vue hydraulique, on note sur la Figure 7.4-31 que la perturbation engendrée par le forage s'étend aux différentes galeries et alvéoles de la zone de stockage.

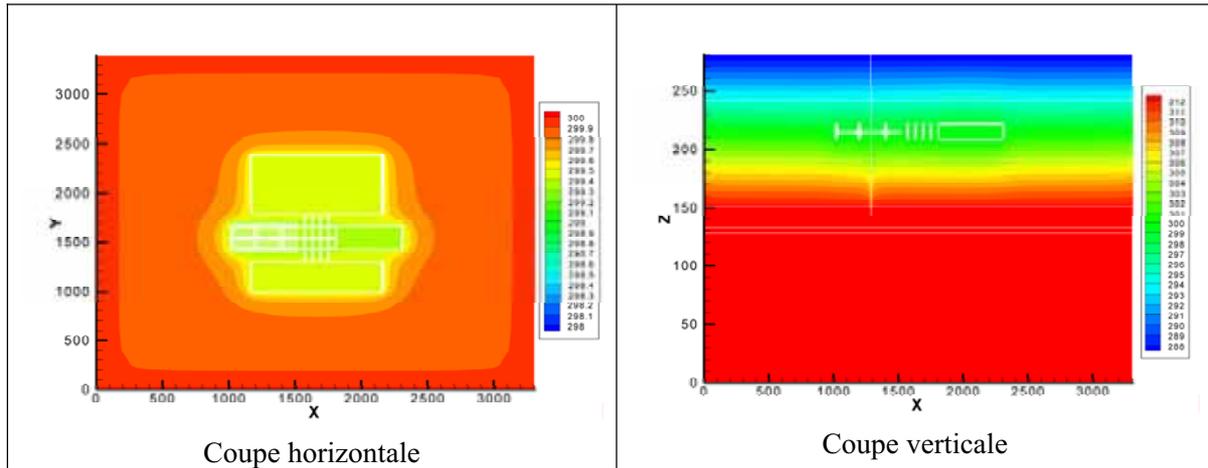


Figure 7.4-31 SEA forage dans le stockage – étude de sensibilité à la position du forage (forage dans une alvéole de combustibles usés CU1) – champ de charge hydraulique en mètres NGF⁷¹ dans la zone de stockage

Du point de vue du transport et de l'impact en sortie de forage, les résultats mettent en évidence que le maximum de débit molaire de la plupart des radionucléides est atteint dès la rupture des conteneurs. Le forage « capte » instantanément une partie de l'activité labile des colis les plus proches, puis une grande partie de l'inventaire de l'alvéole, et enfin à plus long terme pour les radionucléides les plus mobiles, les contributions des alvéoles voisines par les galeries et l'EDZ de l'alvéole forée.

Pour les radionucléides les plus mobiles, solubles et non sorbés, en particulier l'iode 129 et le chlore 36, on note que la quantité d'activité captée par le forage sur 1 million d'années est moindre en cas de forage dans une alvéole qu'en cas de forage dans une galerie d'accès. On vérifie en effet que l'activité d'iode 129 captée par le forage correspond à l'équivalent de l'activité initiale contenue dans 9 alvéoles en cas de forage dans une alvéole contre 15 en cas de forage dans une galerie d'accès (5 alvéoles contre 8 pour le chlore 36 qui bénéficie de la décroissance radioactive). En revanche, le maximum de débit molaire capté par le forage est significativement plus important en sensibilité. En effet, en cas de forage dans une alvéole, l'activité labile relâchée par les colis de l'alvéole impactée est directement interceptée par le forage. De même, la date d'apparition du maximum de débit molaire est plus précoce que pour le calcul de référence du fait de la disponibilité immédiate de l'inventaire situé à proximité du forage (voir Figure 7.4-32).

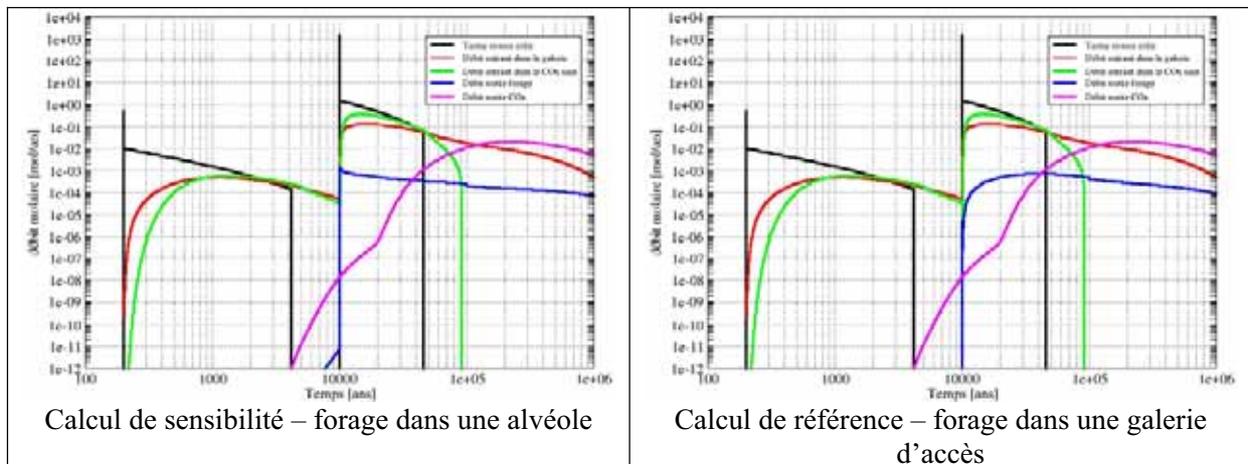


Figure 7.4-32 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire CU1 – UOx3 – ¹²⁹I

Pour les radionucléides fortement sorbés dans les argilites du Callovo-Oxfordien, la voie de transfert par la barrière géologique saine domine celle par le forage. De plus, pour ces radionucléides, la contribution des autres alvéoles est négligeable, d'une part parce que ces radionucléides restent confinés en grande partie dans le champ proche de chacune des alvéoles, d'autre part car la fraction d'activité qui atteint finalement les galeries est très fortement atténuée par effet de diffusion vers la barrière géologique saine avant d'atteindre le forage. Pour le nickel 59, seulement 0,0025 % de l'inventaire initial d'une sous zone de stockage (soit environ 5 % de l'inventaire d'une seule alvéole) sort par le forage, cette fraction d'activité correspondant essentiellement à celle de l'alvéole impactée (voir Figure 7.4-33).

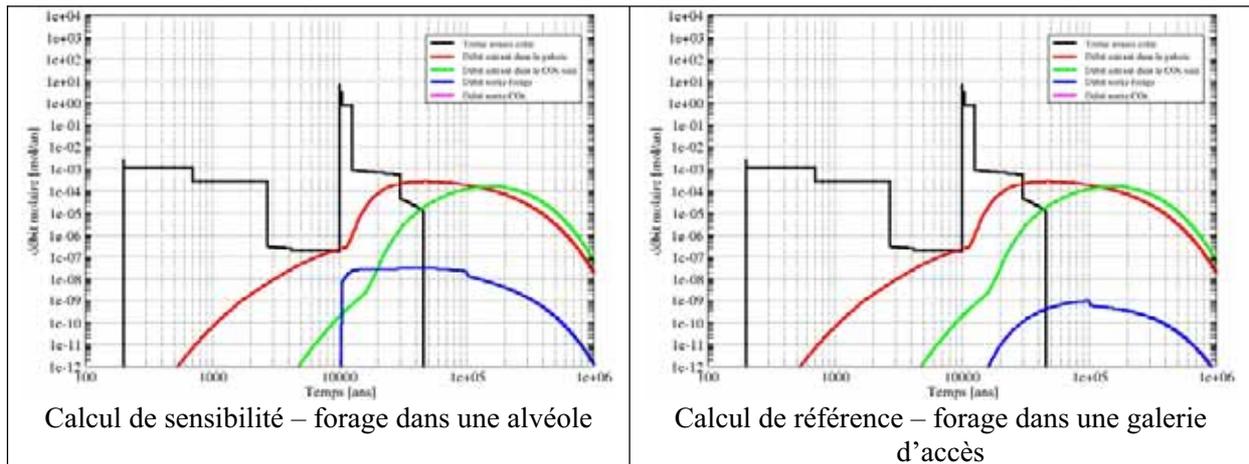


Figure 7.4-33 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire CU – ^{59}Ni

D'un point de vue de l'impact, les doses associées à la voie de transfert par le forage sont significativement plus élevées que pour le calcul de référence. Le maximum de dose au niveau du pompage AEP est de l'ordre de 0,1 mSv/an vers 30 000 ans contre 0,007 mSv/an vers 40 000 ans pour le calcul de référence. L'impact est principalement piloté par le relâchement labile, les principaux contributeurs étant le niobium 94 dans un premier temps et le plutonium 239 à plus long terme. Notons néanmoins que le calcul de la dose à l'exutoire « pompage AEP » est très pénalisant (voir Figure 7.4-34). En effet, la prise en compte d'un temps de transfert de quelques dizaines de milliers d'années dans les encaissants jusqu'au l'exutoire Saulx suffirait à retarder et atténuer l'impact du plutonium 239.

En conclusion, on note que même dans une situation très pénalisante où le forage atteint une alvéole de combustibles usés, à proximité immédiate d'un colis, l'impact reste modéré (de l'ordre de 0,1 mSv/an).

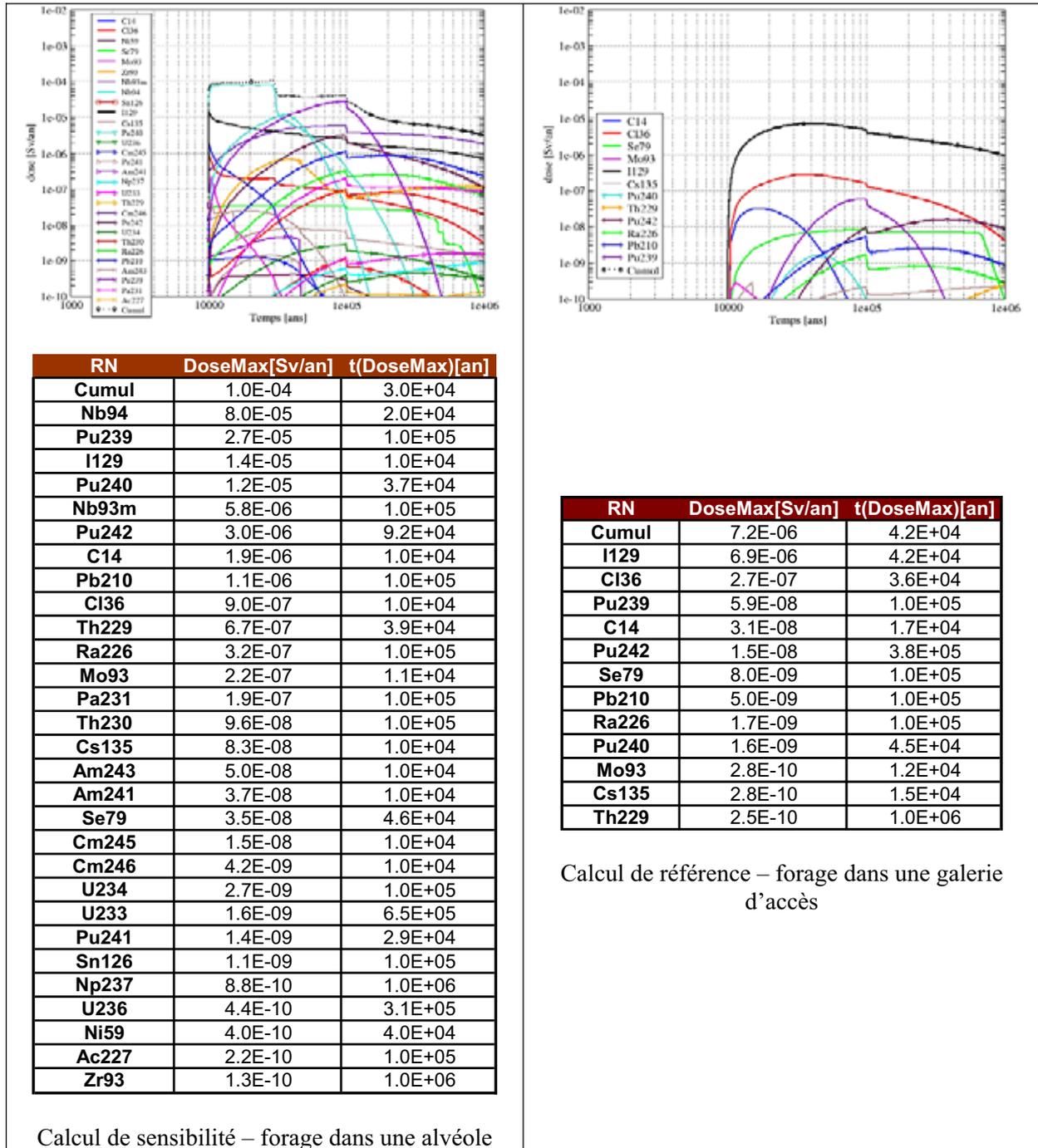


Figure 7.4-34

SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage (forage dans une alvéole) – historique de dose à l'exutoire pompage AEP – CUI – Uox3

● **Sensibilité à la position du forage – dans les galeries d'accès de déchets B (B1x)**

Cette étude, menée à titre illustratif pour les colis de déchets non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (B1x), consiste à évaluer les conséquences à long terme associées à la réalisation d'un forage dans une galerie de liaison secondaire contrairement au calcul de référence où le forage est supposé réalisé dans une alvéole.

D'un point de vue hydraulique, on note sur la Figure 7.4-35 que le forage n'engendre que de très faibles gradients de charge horizontaux dans les galeries d'accès, ce qui a pour effet de limiter les phénomènes convectifs.

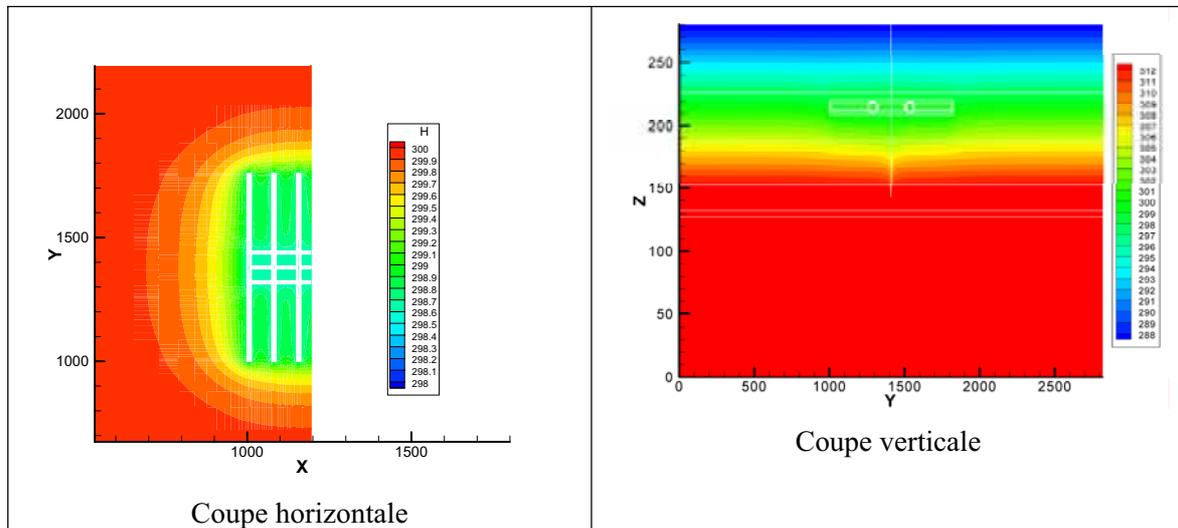


Figure 7.4-35 SEA forage abandonné dans le stockage – étude de sensibilité à la position du forage (forage dans une galerie d'accès aux alvéoles de déchets B- colis type B1x – champ de charge hydraulique en mètres NGF⁷¹ dans la zone de stockage)

Du point de vue du transport, les résultats mettent en évidence que les cinétiques convectives extrêmement lentes combinées aux distances significatives à parcourir depuis les colis jusqu'au forage dans la galerie (20 à 250 mètres dans l'alvéole selon la localisation des colis et 60 mètres de galerie jusqu'au forage) engendrent des temps de transfert importants jusqu'au forage.

Ainsi, on note les points suivants :

- Le chlore 36, soluble et non sorbé dans le béton, présente un maximum de débit molaire en sortie de forage très tardivement, aux alentours de 500 000 ans, date à laquelle il commence à bénéficier de la décroissance radioactive (voir Figure 7.4-36).

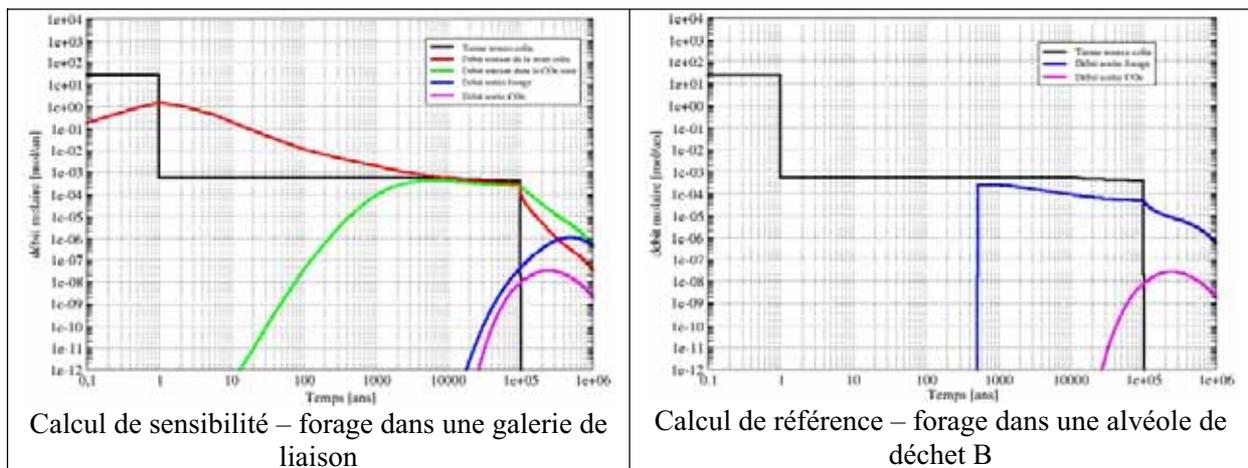


Figure 7.4-36 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ³⁶Cl

- La faible sorption de l'iode 129 dans les bétons (coefficient de retard de 8) accroît significativement son temps de transfert moyen depuis les colis jusqu'au forage ce qui favorise les échanges avec la barrière géologique. Ainsi, le maximum de débit molaire sortant du forage apparaît au-delà du million d'années et est significativement atténué (voir Figure 7.4-37).

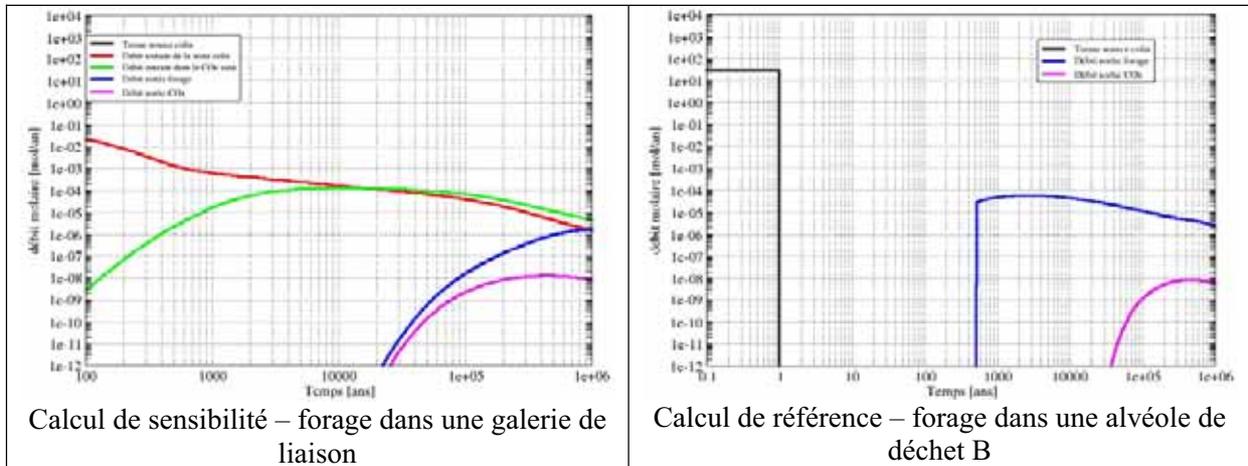


Figure 7.4-37 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ^{129}I

- La quantité de sélénium 79 et de carbone 14 atteignant le forage est fortement limitée et retardée par les phénomènes de sorption dans le béton (coefficient de retard dans le béton de 700, voir Figure 7.4-38).

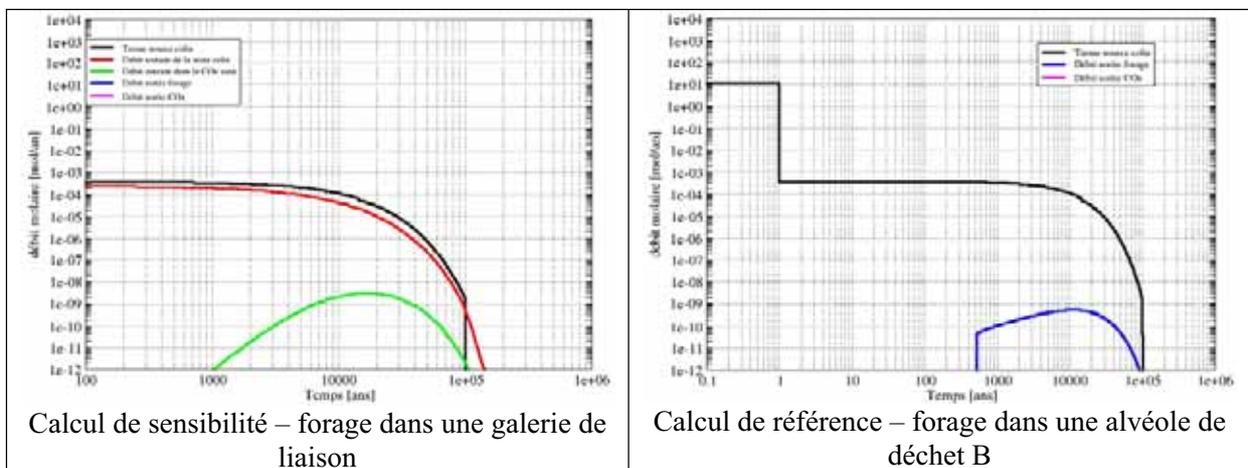


Figure 7.4-38 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ^{14}C

- Pour les autres radionucléides (^{59}Ni , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{99}Tc , ^{94}Nb , actinides...), leur forte affinité chimique avec les argilites du Callovo-Oxfordien favorise leur migration dans la barrière géologique, au niveau de la galerie puis au niveau du forage. Pour tous ces radionucléides le débit molaire sortant du forage est négligeable (voir Figure 7.4-39).

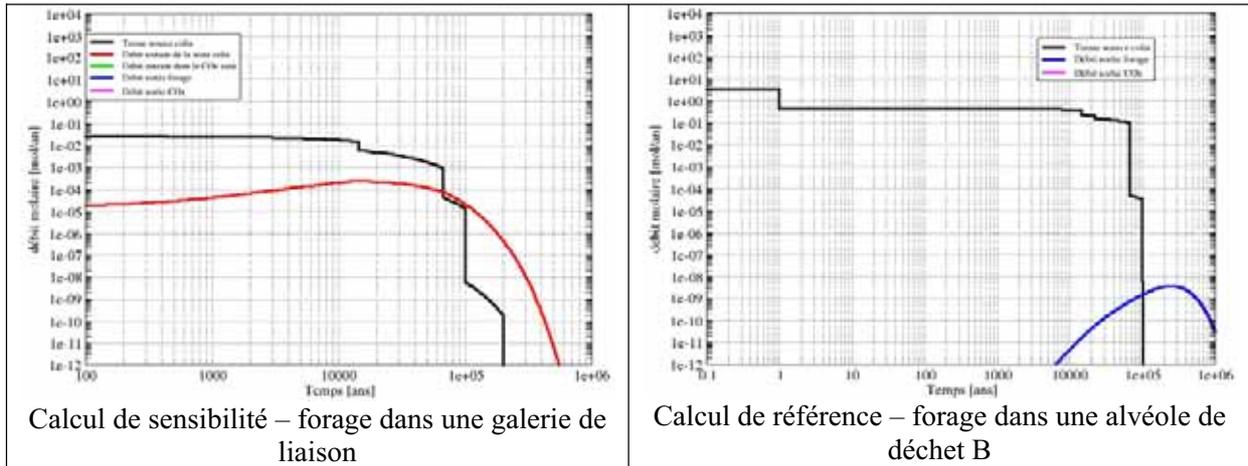


Figure 7.4-39 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage - historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ⁵⁹Ni

D'un point de vue de l'impact, on note un maximum de dose de 0,00005 mSv/an vers 550 000 ans piloté par le chlore 36 et dans une moindre mesure par l'iode 129 (voir Figure 7.4-40). Le maximum de dose de l'iode 129 se situe au-delà de 1 million d'années. Les autres radionucléides présentent tous des doses inférieures à 10⁻⁷ mSv/an.

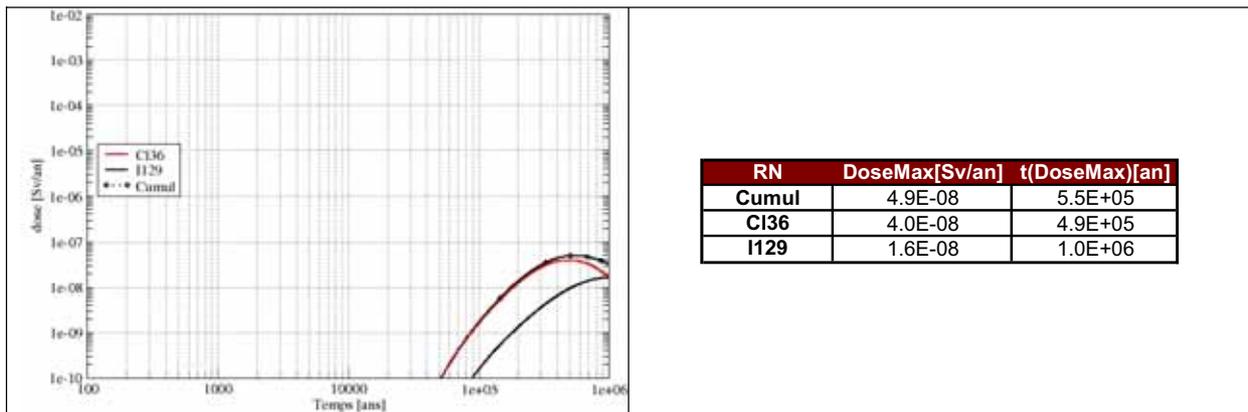


Figure 7.4-40 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage (forage dans une galerie de liaison de déchets B) - historique de dose à l'exutoire pompage AEP – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (B1x)

● **Doublet de forage – dans un module de stockage de combustibles usés CU1**

Ce cas traite un doublet de forages situés respectivement à l'est et à l'ouest d'un module de combustibles usés CU1. Le gradient de charge horizontale dans les encaissants d'Ouest en Est est de 0,0013 m/m (voir Figure 7.4-8). Comme vu au paragraphe 7.4.3.2, deux situations de doublet sont traitées : une maximisant les différences de charge entre les deux forages en les positionnant aux extrémités des galeries d'accès (situation 1), l'autre maximisant l'influence radiologique des forages en les positionnant en milieu des galeries d'accès (situation 2). Les deux situations de doublet ont été calculées à titre illustratif pour l'iode 129.

La Figure 7.4-41 et la Figure 7.4-42 fournissent les champs de charges hydrauliques dans une sous-zone de stockage de combustibles usés CUI et son voisinage géologique (Dogger et Callovo-Oxfordien) à 100 000 ans pour les deux situations étudiées.

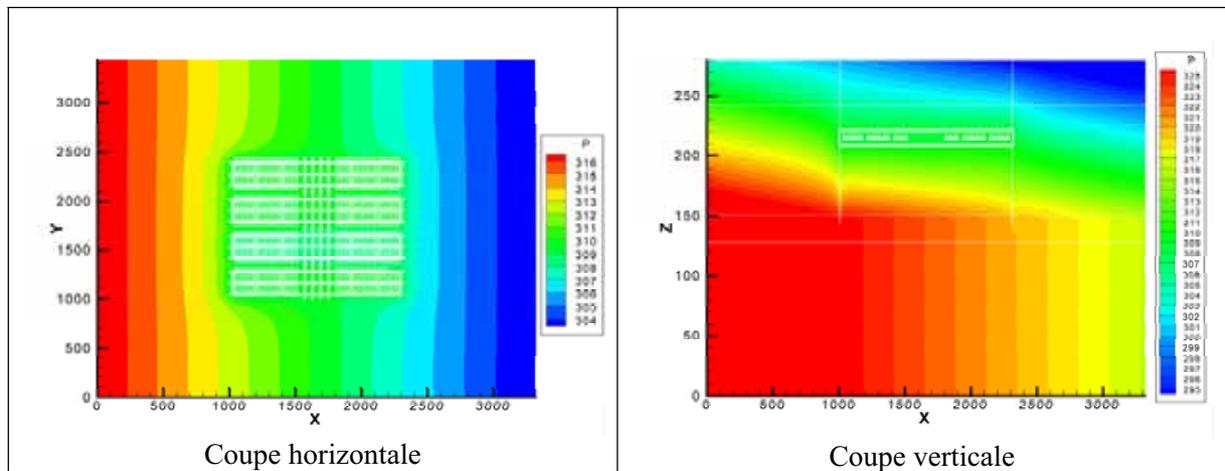


Figure 7.4-41 *SEA forage abandonné dans le stockage – étude de sensibilité doublet de forage aux extrémités des galeries d'accès aux alvéoles de combustibles usés – colis type CUI – champ de charge hydraulique hydraulique en mètres NGF⁷¹ dans la zone de stockage*

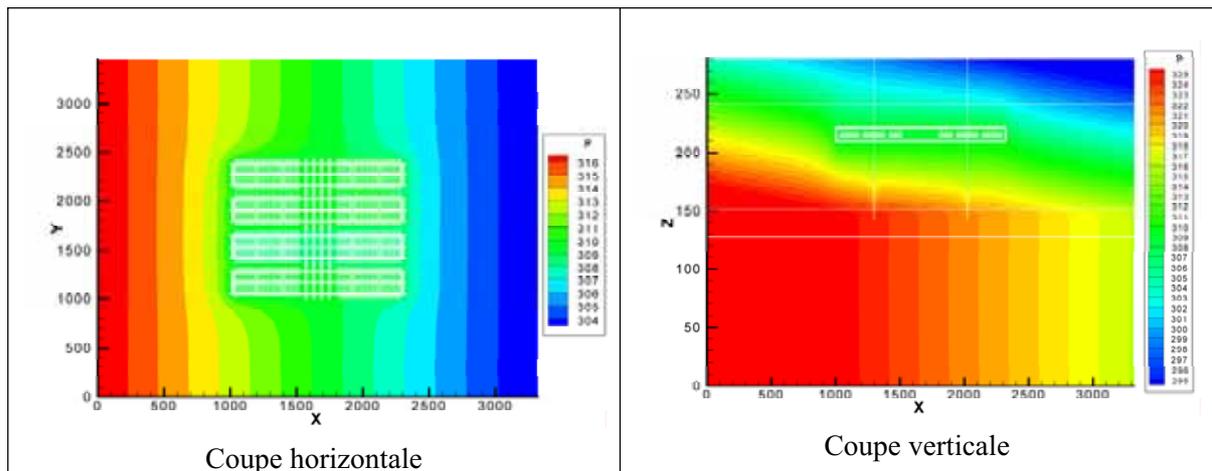


Figure 7.4-42 *SEA forage dans le stockage – étude de sensibilité doublet de forage au centre des galeries d'accès aux alvéoles de combustibles usés – colis type CUI – champ de charge hydraulique hydraulique en mètres NGF⁷¹ dans la zone de stockage*

Comme dans le calcul de référence, les coupes verticales des champs de charges hydrauliques mettent en évidence que les forages diminuent localement les charges hydrauliques sous le stockage. Au niveau du stockage, le rabattement est plus important dans le module intercepté que dans les autres modules. Les débits d'eau drainés par les forages dans chacun des principaux composants du modèle sont donnés dans le Tableau 7.4-19. Une comparaison avec les résultats du calcul de référence montre que le débit d'eau total drainé par le doublet de forage est environ deux fois plus élevé que pour le calcul de référence.

Scénario		Débit d'eau drainé par les forages à 100 000 ans (m ³ /an)					Stockage/Tota l
		Dogger	Callovo- Oxfordie n sous stockage	Callovo- Oxfordie n sur stockage	Stockage	Total	
Référence	-	0,110	0,002	0,000	0,050	0,162	31 %
Doublet (situation 1)	Ouest	0,131	0,006	0,000	-0,011 ¹⁰⁰	0,126	-9 %
	Est	0,087	0,003	0,000	0,110	0,200	55 %
Doublet (situation 2)	Ouest	0,125	0,003	0,000	0,010	0,138	7 %
	Est	0,100	0,002	0,000	0,076	0,178	43 %

Tableau 7.4-19 *SEA forage abandonné dans le stockage – Contributions des composants du modèle au débit d'eau drainé par le forage dans une sous-zone de stockage de colis CUI.*

D'un point de vue du transport, les résultats du doublet de forage mettent en évidence les points suivants (voir Tableau 7.4-20) :

- Le débit maximal en sortie de forage est plus important à l'Est du module de stockage que dans sa partie Ouest. Cette différence, au plus d'un facteur 2,5, est due au gradient de charges horizontal qui favorise le transfert des radionucléides vers l'Est.
- Pour les deux situations de doublet, la contribution du forage le plus pénalisant (forage Est) en terme de débit molaire et de masse sortant du forage sur 1 million d'années reste inférieure (mais du même ordre de grandeur) à celle du forage seul étudié dans le cas de référence. Ces résultats mettent en évidence que les gradients de charge horizontaux limités, la perméabilité de la barrière géologique et la disposition en « cul-de-sac » des alvéoles limitent fortement les circulations en U. Pour la première situation, la localisation du forage en bout de galerie d'accès l'éloigne globalement des alvéoles, ce qui réduit l'impact de manière significative par rapport à la situation de référence où le forage est situé au centre des galeries d'accès. Pour la seconde situation, les résultats sont très proches de la situation de référence.
- Pour les deux situations de doublet, la masse sortant des deux forages sur un million d'années est plus élevée que celle d'un forage unique, mais ne double pas. En effet, l'augmentation par rapport au calcul de référence est de l'ordre de 26 % pour la situation 1 (doublet de forages aux extrémités d'une galerie) et 62 % pour la situation 2 (doublet de forages aux centres de deux demi-modules de stockage).

	Scénario				
	Référence	Doublet (situation 1)		Doublet (situation 2)	
		Forage Ouest	Forage Est	Forage Ouest	Forage Est
Débit molaire maximal [mol/an]	7,28.10 ⁻⁴	2,02.10 ⁻⁴	4,92.10 ⁻⁴	4,68.10 ⁻⁴	6,78.10 ⁻⁴
Date du débit molaire maximal [an]	42 000	51 000	59 000	45 000	47 000
Débit molaire cumulé sur 1 MA [mol]	213,64	65,97	202,43	135,69	209,62

Tableau 7.4-20 *SEA forage abandonné dans le stockage – débits molaires cumulés et instantanés – combustibles usés CUI – ¹²⁹I*

¹⁰⁰ La présence de valeurs négatives traduit une perte d'eau du forage dans le composant qu'il traverse : le forage Ouest du doublet (situation 1) perd 0,011 m³/an dans les galeries de stockage alors qu'il draine 0,137 m³/an dans les composants sous-jacents (Dogger et Callovo-Oxfordien sous stockage). La diminution des charges hydrauliques à l'Est du modèle engendre en effet des écoulements horizontaux qui se traduisent par des pertes d'eau du forage à la traversée de milieux perméables tels que les galeries de stockage.

Les résultats de l'impact radiologique sont cohérents avec les observations précédentes (voir Figure 7.4-43 et Figure 7.4-44) :

- Pour la première situation, la dose maximale due aux deux forages du doublet situés aux extrémités de galeries est légèrement inférieur à celle obtenue en calcul de référence (0,0066 mSv/an contre 0,0069 mSv/a pour l'iode 129 soit -4 %).
- Pour la seconde situation, considérant un doublet de forages au centre de deux demi-modules de stockage, le niveau de dose maximale augmente d'environ 60 % par rapport au calcul de référence.

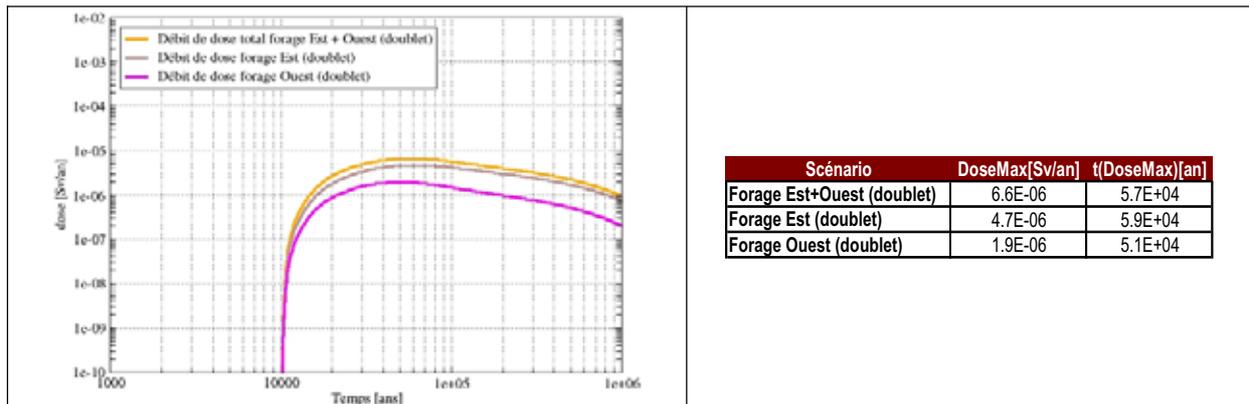


Figure 7.4-43

SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité – doublet de forage aux extrémités d'une galerie (situation 1) – historique de dose – combustibles usés ^{129}I

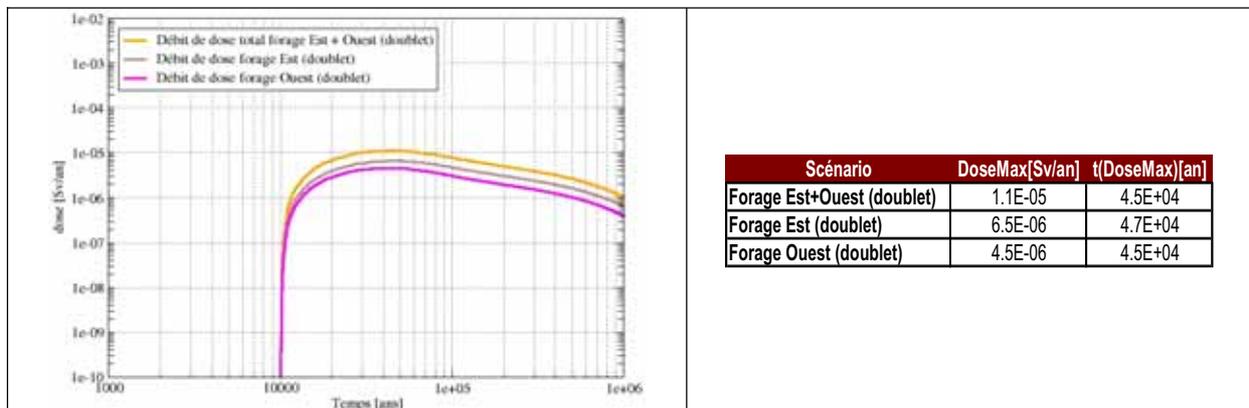


Figure 7.4-44

SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité – doublet de forages au milieu de deux demi-modules de stockage (situation 2) – historique de dose – combustibles usés ^{129}I

En conclusion, pour les deux situations de doublet, l'impact de chacun des forages du doublet est inférieur ou égal à la dose associée au forage seul étudié en référence.

7.4.6.2 Sensibilité sur les barrières ouvragées

● Sensibilité au concept de déchet C – variante avec barrière ouvragée (déchet C2)

Cette étude a considéré les conséquences associées à la prise en compte d'une variante pour les déchets C dans laquelle l'alvéole dispose d'un corps de barrière ouvragée en argile de 80 centimètres d'épaisseur, dont les propriétés sont identiques à celles du bouchon (bentonite).

Les historiques de débit molaire (voir Figure 7.4-45 à Figure 7.4-47) mettent en évidence qu'il n'existe aucune différence notable de relâchement entre les deux concepts. La faible épaisseur de corps de barrière ouvragée ne modifie pas la nature des relâchements au regard du temps de parcours diffusif moyen vers la galerie.

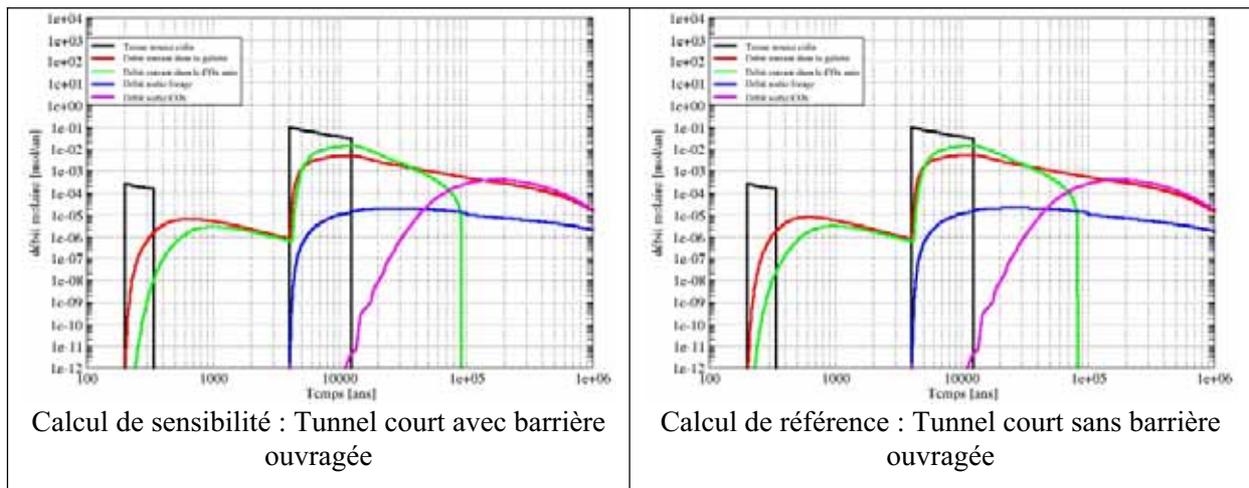


Figure 7.4-45

SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) – historique de débit molaire – colis type de C2 - ¹²⁹I

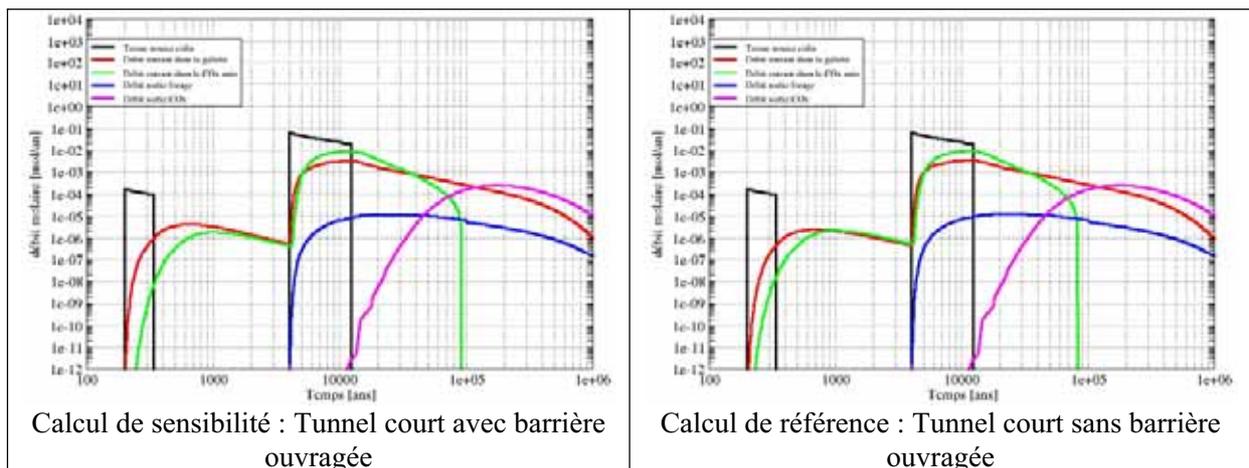


Figure 7.4-46

SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) – historique de débit molaire – colis type de C2 - ³⁶Cl

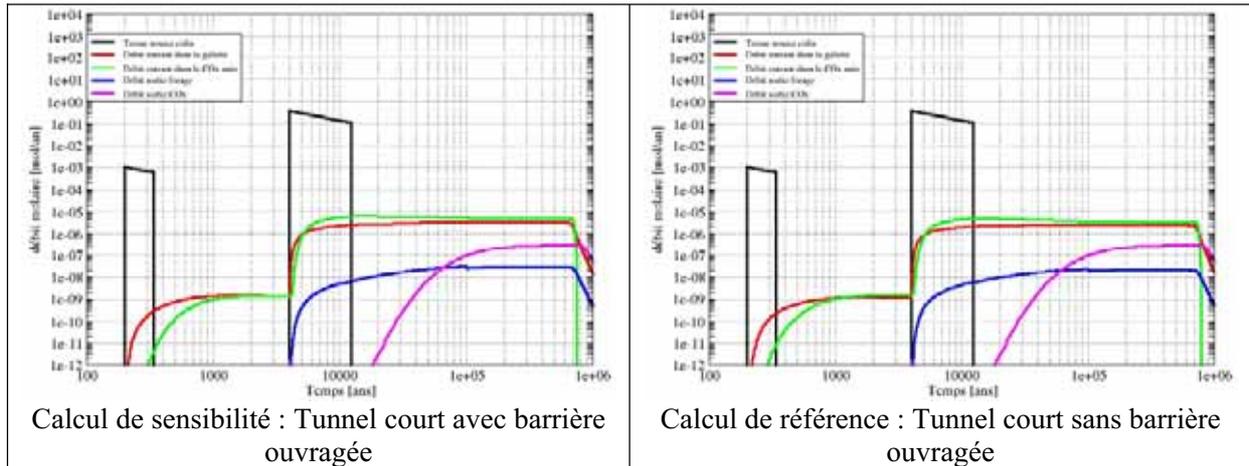


Figure 7.4-47 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) - historique de débit molaire – colis type de C2 - ¹²⁹I

Les doses sont identiques à celles de la situation de référence (voir paragraphe 7.4.5).

Contrairement à ce qui aurait pu être imaginé a priori, il s'avère donc que la barrière ouvragée ne joue pas un rôle de barrière redondante du milieu géologique en cas de forage. Sa non prise en compte ne diminue pas la robustesse du stockage face à un forage impactant une galerie.

7.4.6.3 Sensibilité sur les paramètres hydrauliques de l'EDZ (« EDZ dégradée »)

La finalité de cette étude est d'évaluer les conséquences d'une diminution des caractéristiques hydrauliques, de transfert et de rétention de l'EDZ en cas de forage. Cette étude menée pour le colis type C2 a consisté à considérer une EDZ « dégradée » dont le détail des valeurs de paramètres est fourni dans le Tableau 7.4-3 avec :

- une zone fracturée « pénalisante » représentée une forte perméabilité (10^{-6} m/s), une diffusion égale à celle d'une particule d'eau dans de l'eau, et une absence de propriétés de rétention géochimiques ;
- une zone micro fissurée avec des paramètres hydrauliques de transfert et de rétention « conservatifs ».

Le Tableau 7.4-21 donne les pourcentages de masse sortant des différents composants du système sur 1 million d'années.

Radionucléide	Répartition du relâchement des alvéoles		% Masse atteignant le forage par les galeries (voie 3) ⁹⁶	% Masse atteignant le toit du Callovo-Oxfordien par le forage (voie 5) ⁹⁶
	Masse « entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien sain » (voie 1) ⁹⁶	Masse « Entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁶		
¹²⁹ I	39,40%	60,60%	1,41%	1,37%
³⁶ Cl	51,02%	46,88%	0,80%	0,78%
¹⁴ C	4,44%	2,65%	0,0057%	0,0052%
¹⁰⁷ Pd	2,14%	2,10%	0,00018%	0,000005%
⁵⁹ Ni	0,95%	0,91%	0,000084%	0,0000029%
⁹³ Zr	1,30%	0,92%	0,000091%	0,0000035%
⁷⁹ Se	0,20%	0,16%	0,0015%	0,0014%
¹²⁶ Sn	Nul	0,00030%	Nul	Sans objet
⁹⁹ Tc	Nul	0,00044%	Nul	Sans objet

Les pourcentages sont donnés par rapport à l'inventaire initial total de la sous-zone de stockage concernée par le forage

Tableau 7.4-21

SEA forage abandonné dans le stockage – Répartition des voies de transfert – masse sortant des différents composants du système de stockage et du forage pendant 1 million d'années – Colis type C2 – calculs de sensibilité à l'EDZ (EDZ dégradée)

Du fait de l'architecture en « cul-de-sac », de la faible perméabilité du milieu et du faible drain que constitue le forage, la dégradation de l'EDZ et donc la diminution des performances des scellements, n'ont pas de conséquences importantes sur le régime hydraulique dans les alvéoles, qui reste diffusif de manière dominante.

Au niveau du transport et de la répartition des voies de transfert entre les ouvrages et la barrière géologique, on note que :

- les éléments solubles et non sorbés (¹²⁹I et ³⁶Cl) présentent un comportement similaire à celui de la situation de référence. La fraction d'activité d'iode 129 sortant du forage est de 1,37 % de l'activité totale initiale de la sous-zone de stockage alors quelle est de 1,24 % en référence (voir Tableau 7.4-15 et Figure 7.4-48) ;

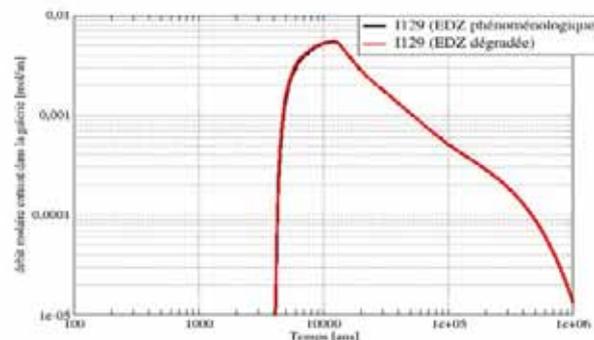


Figure 7.4-48

SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – ¹²⁹I – C2 – Comparaison entre le modèle EDZ (best-estimate) et EDZ (dégradée)

- les différences sont sensibles pour les éléments sorbés. En effet, la prise en compte de valeurs de rétention conservatives dans la zone micro fissurée augmente la masse entrant dans les galeries par cette voie. A titre d'exemple pour l'étain 126, la fraction d'activité entrant dans les galeries correspond à $3.10^{-4}\%$ de l'activité initiale de la sous-zone alors qu'elle est de $5,9.10^{-5}\%$ dans le calcul de référence. Ce résultat se répercute sur la fraction d'activité atteignant le forage, mais le transport dans les galeries n'induit pas d'écart supplémentaire significatif avec le calcul de référence. En effet, une fois dans les galeries, l'EDZ dégradée influe peu sur le transfert des radionucléides jusqu'au puits, ces derniers empruntant essentiellement les remblais.

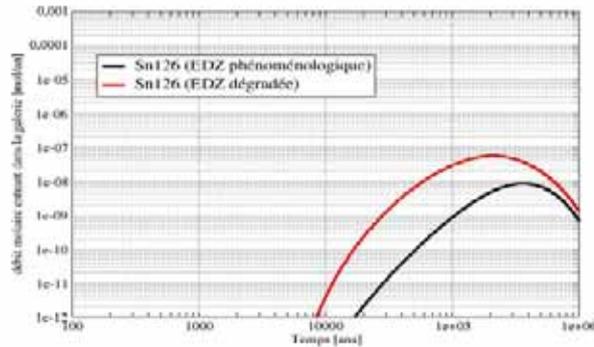


Figure 7.4-49

SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – Sn126 – C2 – Comparaison entre le modèle EDZ (best-estimate) et EDZ (dégradée)

Une EDZ dégradée a peu d'influence sur l'impact car les principaux contributeurs sont des radionucléides non sorbés dans les argilites. Les résultats mettent d'ailleurs en évidence, que la dose due au forage est similaire à celle du calcul de référence avec un maximum de dose de 0,00067 mSv/an contre 0,00065 mSv/an en référence à 25 000 ans (voir Figure 7.4-50).

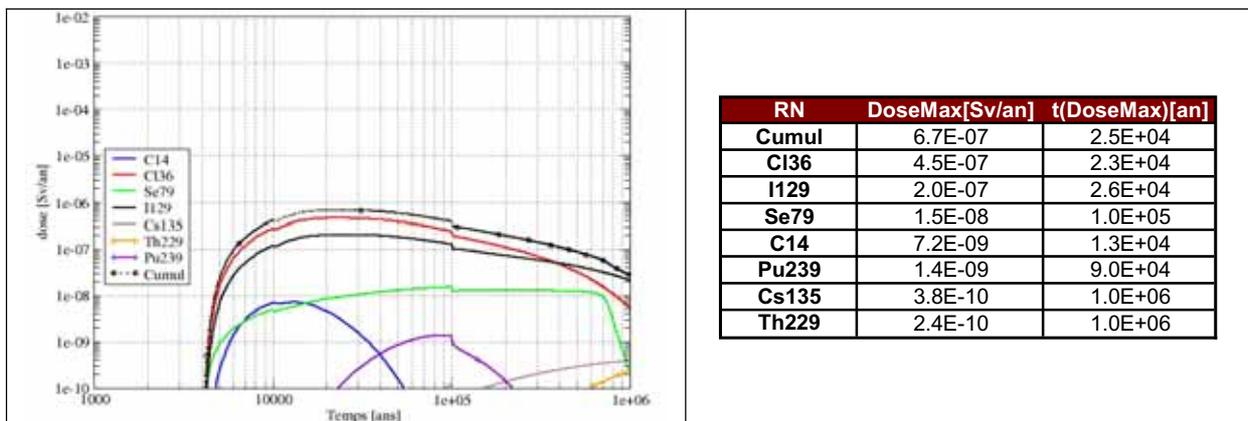


Figure 7.4-50

SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à l'EDZ « dégradée » - dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type C2

7.4.6.4 Sensibilité sur les paramètres chimiques

● Sensibilité au paramètre de barrière ouvragée (géochimie conservative)

Cette étude consiste à considérer des paramètres géochimiques conservatifs dans la bentonite du bouchon d'alvéole, du corps de barrière ouvragée le cas échéant et des scellements. Ces paramètres sont fournis dans le Tableau 7.4-22 et le Tableau 7.4-23.

L'étude a été menée pour les colis types CU1, CU2, C2 et C4.

	Calcul de référence					Sensibilité aux paramètres géochimique	
	Période [ans]	$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]	R [-]	Csat [mol/m ³]
¹⁰ Be	1 600 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	973	10 ⁻²	1	10
¹⁰ Be (deltaT>20)	1 600 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	98	10 ⁻²	1	10
¹⁴ C	5 730	0,05	5.10 ⁻¹²	1	2,3	1	9
³⁶ Cl	302 000	0,05	5.10 ⁻¹²	1	soluble	1	soluble
⁴¹ Ca	103 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	6	2,3	1	9
⁴¹ Ca (deltaT>20)	103 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	1,5	2,3	1	9
⁵⁹ Ni	75 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	2 430	5.10 ⁻²	487	1
⁷⁹ Se	65 000	0,05	5.10 ⁻¹²	1	5.10 ⁻⁷	1	5.10 ⁻⁴
⁹³ Zr	1 530 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	486 000	2.10 ⁻⁵	48 600	3.10 ⁻³
⁹³ Mo	3 500	0,05	5.10 ⁻¹²	1	1.10 ⁻⁵	1	1.10 ⁻³
^{93m} Nb	16,4	0,05	5.10 ⁻¹²	350 000	2.10 ⁻⁴	35 000	2.10 ⁻³
⁹⁴ Nb	20 300	0,05	5.10 ⁻¹²	350 000	2.10 ⁻⁴	35 000	2.10 ⁻³
⁹⁹ Tc	213 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	146 000	4.10 ⁻⁶	48 600	1.10 ⁻⁴
¹⁰⁷ Pd	6 500 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	4 380	4.10 ⁻⁴	4 380	1.10 ⁻²
¹²⁶ Sn	100 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	53 500	1.10 ⁻⁵	14 600	1.10 ⁻⁴
¹²⁹ I	15 700 000	0,05	5.10 ⁻¹²	1	soluble	1	soluble
^{166m} Ho	1 200	0,36	5.10 ⁻¹⁰	58 300	1.10 ⁻⁴	5 830	1.10 ⁻³
¹³⁵ Cs	2 300 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	487	soluble	290	soluble
¹³⁵ Cs (deltaT>20)	2 300 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	50	soluble	30	soluble

Tableau 7.4-22

SEA forage abandonné dans le stockage – Valeurs de référence et de sensibilité des paramètres de rétention chimique dans l'argile gonflante des barrières ouvragées, des bouchons et des scellements – produits de fission et d'activation

Barrière ouvragée, bouchons et scellements en bentonite							
Calcul de référence						Sensibilité aux paramètres géochimique	
	Période [ans]	$\omega_{\text{Diffusion}}$ [-]	De [m ² /s]	R [-]	Csat [mol/m ³]	R [-]	Csat [mol/m ³]
²⁴⁴ Cm	18,1	0,36	5.10 ⁻¹⁰	58 300	4.10 ⁻⁴	5 830	1.10 ⁻³
²⁴⁰ Pu	6 560	0,36	5.10 ⁻¹⁰	4 860	2.10 ⁻⁴	3 400	2.10 ⁻⁴
²³⁶ U	23 400 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	486 000	7.10 ⁻⁴	48 600	5.10 ⁻²
²³² Th	14 100 000 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	14 600	6.10 ⁻⁴	14 600	1.10 ⁻³
²⁴⁵ Cm	8 500	0,36	5.10 ⁻¹⁰	58 300	4.10 ⁻⁴	5 830	1.10 ⁻³
²⁴¹ Pu	14,4	0,36	5.10 ⁻¹⁰	4 860	2.10 ⁻⁴	3 400	2.10 ⁻⁴
²⁴¹ Am	433	0,36	5.10 ⁻¹⁰	58 300	4.10 ⁻⁴	5 830	1.10 ⁻³
²³⁷ Np	2 140 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	4 860	4.10 ⁻⁶	3 400	1.10 ⁻⁴
²³³ U	159 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	486 000	7.10 ⁻⁴	48 600	5.10 ⁻²
²²⁹ Th	7 340	0,36	5.10 ⁻¹⁰	14 600	6.10 ⁻⁴	14 600	1.10 ⁻³
²⁴⁶ Cm	4 730	0,36	5.10 ⁻¹⁰	58 300	4.10 ⁻⁴	5 830	1.10 ⁻³
²⁴² Pu	374 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	4 860	2.10 ⁻⁴	3 400	2.10 ⁻⁴
²³⁸ U	4 470 000 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	486 000	7.10 ⁻⁴	48 600	5.10 ⁻²
²³⁴ U	246 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	486 000	7.10 ⁻⁴	48 600	5.10 ⁻²
²³⁰ Th	75 400	0,36	5.10 ⁻¹⁰	14 600	6.10 ⁻⁴	14 600	1.10 ⁻³
²²⁶ Ra	1 600	0,36	5.10 ⁻¹⁰	2 900	soluble	490	soluble
²¹⁰ Pb	22,3	0,36	5.10 ⁻¹⁰	15 100	4.10 ⁻³	1 510	4.10 ⁻³
²⁴³ Am	7 370	0,36	5.10 ⁻¹⁰	58 300	4.10 ⁻⁴	5 830	1.10 ⁻³
²³⁹ Pu	24 100	0,36	5.10 ⁻¹⁰	4 860	2.10 ⁻⁴	3 400	2.10 ⁻⁴
²³⁵ U	704 000 000	0,36	5.10 ⁻¹⁰	486 000	7.10 ⁻⁴	48 600	5.10 ⁻²
²³¹ Pa	32 800	0,36	5.10 ⁻¹⁰	48 600	1.10 ⁻³	4 860	1
²²⁷ Ac	21,8	0,36	5.10 ⁻¹⁰	58 300	4.10 ⁻⁴	5 830	4.10 ⁻⁴

Tableau 7.4-23 SEA forage abandonné dans le stockage – données bentonite considérées dans le calcul – actinides

Combustibles usés CU1

En ce qui concerne la répartition des voies de transfert, la comparaison des résultats avec le calcul de référence met en évidence les points suivants :

- les radionucléides déjà solubles dans le calcul de référence et dont le coefficient de retard ne change pas (¹²⁹I, ³⁶Cl, ¹⁴C, ⁹³Mo, ¹⁰⁷Pd) présentent des résultats similaires ;
- la faible variation du coefficient de retard du césium (à peine un facteur 2) ne modifie que très peu le débit molaire entrant dans le forage. La forte sorption dans la barrière géologique saine implique une prédominance de la voie de transfert par la barrière géologique et augmente très peu (moins de 2 %) la quantité de césium 135 entrant dans la galerie ;
- l'holmium 94 et l'étain 126, dont la contribution au forage est négligeable en référence du fait de leur très forte sorption dans les matériaux argileux, restent totalement atténués en sensibilité. En effet, la réduction de leur coefficient de retard d'un facteur 10 ne suffit pas à rendre significative leur contribution radiologique au forage : compte tenu de leur période, ils sont atténués ;
- l'augmentation de trois ordres de grandeur de la limite de solubilité du sélénium 79 dans la bentonite accroît d'un facteur trois le débit molaire sortant du forage avec un maximum atteint vers 20 000 ans (au lieu de 80 000 ans pour le calcul de référence).

Pour les autres radionucléides (^{59}Ni , ^{93}Zr , ^{99}Tc , actinides...), la prise en compte d'un coefficient de retard plus faible dans la bentonite augmente de manière significative la voie de transfert par la galerie par rapport au calcul de référence. Néanmoins, compte tenu de leur forte sorption dans la barrière géologique, la quantité de radionucléides sortant par le forage est très faible et la contribution de ces radionucléides reste négligeable (voir Tableau 7.4-24).

Radionucléide	Répartition du relâchement des alvéoles		% Masse atteignant le forage par les galeries (voie 3) ⁹⁶	% Masse atteignant le toit du Callovo-Oxfordien par le forage (voie 5) ⁹⁶
	Masse « entrant et traversant les premiers mètres de Callovo-Oxfordien sain » (voie 1) ⁹⁶	Masse « Entrant dans la galerie » (voie 2) ⁹⁶		
^{129}I	42%	58%	1,45%	1,42%
^{36}Cl	40 %	46,07%	0,82%	0,79%
^{41}Ca	54,60%	36,93%	0,0215%	0,005%
^{135}Cs	9,73%	4,97%	0,0005%	0,000032%
^{14}C	8,19%	3,98%	0,0085%	0,0075%
^{107}Pd	3,22%	3,10%	0,00026%	0,000011%
^{59}Ni	1,99%	2,16%	0,00018%	0,000008%
^{93}Zr	2,87%	2,04%	0,00021%	0,0000115%
^{93}Mo	0,00012%	0,15%	0,00016%	0,00012%
^{79}Se	0,45%	0,44%	0,00415%	0,00395%
^{126}Sn	Nul	0,016%	0,0000010%	0,000000003%
^{99}Tc	Nul	0,0075%	0,00000047%	0,0000000025%
$^{166\text{m}}\text{Ho}$	Nul	0,0000023%	Nul	Sans objet
^{94}Nb	Nul	Nul	Sans objet	Sans objet

Tableau 7.4-24

SEA forage abandonné dans le stockage – Répartition des voies de transfert – masse sortant des différents composants du système de stockage et du forage pendant 1 million d'années – Colis type CU1 – calculs de sensibilité à la géochimie de la bentonite

En ce qui concerne les résultats de l'impact (voir Figure 7.4-51), la dose reste dominée par l'iode 129 avec un maximum de dose quasi identique à celui du calcul de référence (0,0073 mSv/an contre 0,0072 mSv/an en référence).

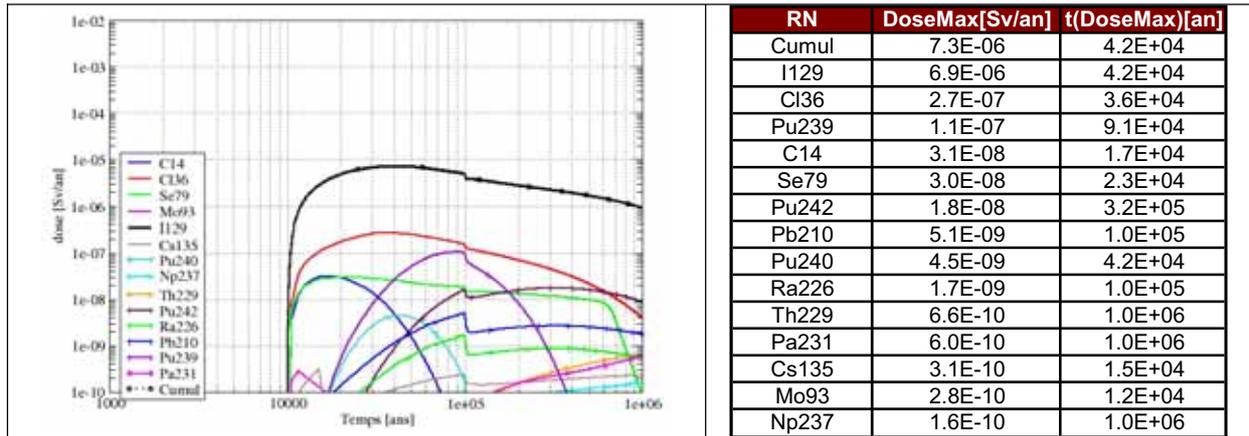


Figure 7.4-51 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres géochimiques conservatifs de la bentonite – dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type CU1

Combustibles usés CU2

Les commentaires sont qualitativement similaires à ceux des combustibles usés CU1. L'iode 129 est le principal contributeur (voir Figure 7.4-52) ; le maximum de dose est identique à celui du calcul de référence (0,0012 mSv/an à 43 000 ans).

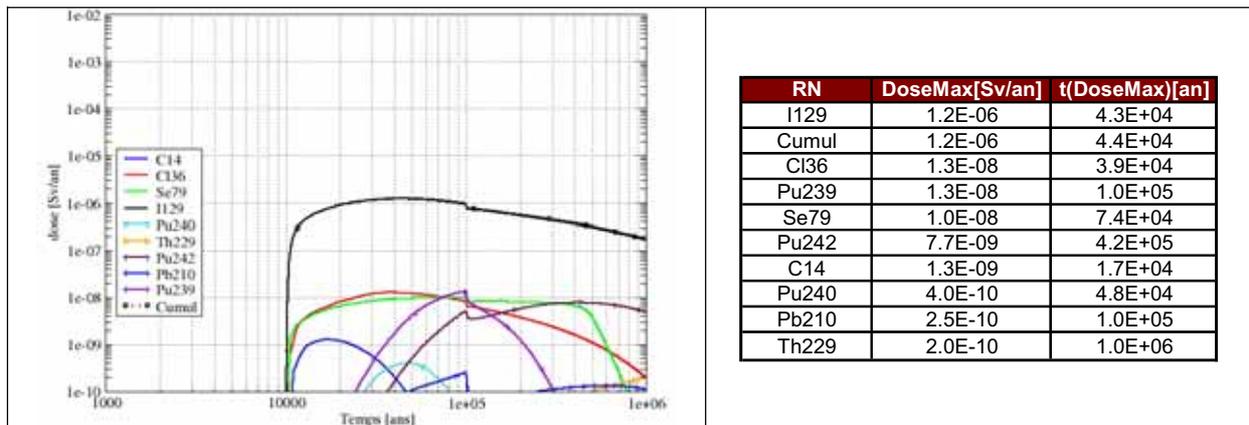


Figure 7.4-52 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres géochimiques conservatifs de la bentonite – dose due à l'exutoire pompage AEP au forage – colis type CU2

Colis types C2 et C4

La dose reste pilotée par les radionucléides solubles et non sorbés (^{36}Cl et ^{129}I) ; elle est identiques à celle du calcul de référence pour les deux colis types.

- **Sensibilité au modèle de relâchement des verres : modèle « $V_0.S \rightarrow V_r$ » au lieu du modèle $V_0.S$ retenu en référence**

Cette étude a consisté à prendre en compte un modèle de relâchement des déchets vitrifiés phénoménologique tenant compte de la vitesse de dissolution résiduelle (« $V_0.S \rightarrow V_r$ ») plutôt qu'un modèle conservatif $V_0.S$, fondé uniquement sur la vitesse de dissolution initiale du verre. Cette étude a été menée à titre illustratif pour les colis type C2. Le modèle « $V_0.S \rightarrow V_r$ » est testé ici en raison des faibles nombres de Péclet dans l'alvéole, caractéristiques d'un régime co-dominant convectif/diffusif

en tête d'alvéole. La prise en compte d'un modèle de relâchement « $V_0.S \rightarrow V_r$ » a pour conséquence d'augmenter la durée de relâchement de la matrice de verre de 8 000 ans à plus de 300 000 ans.

Au niveau du transport depuis les colis jusqu'au forage, on note que la prise en compte d'un modèle de relâchement moins conservatif n'influe pas significativement sur la répartition de la masse entre les ouvrages et la barrière géologique.

En revanche, la cinétique de transfert par la galerie est très différente selon les modèles de relâchement. Le modèle de relâchement étudié en sensibilité engendre des maxima de débits molaires plus faibles en entrée de galerie. A titre d'exemple, le maximum de débit molaire de l'iode 129 entrant dans la galerie est 10 fois plus faible que celui obtenu avec le modèle $V_0.S$ du calcul de référence. Le maximum est atteint vers 300 000 ans au lieu de 12 000 ans (voir Figure 7.4-53).

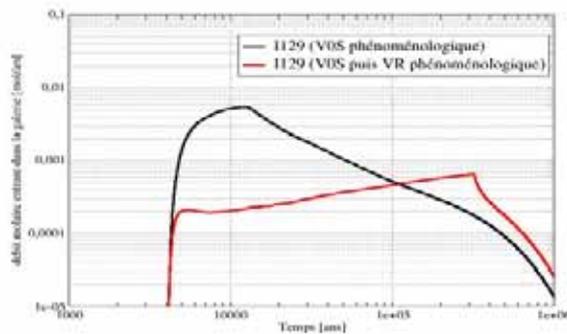


Figure 7.4-53

SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Comparaison entre le modèle $V_0.S$ et $V_0.S \rightarrow V_r$

On note également qu'à 50 000 ans, dans le cas du modèle $V_0.S$, 26 % de l'inventaire initial d'une alvéole a transité par la galerie de stockage, au lieu de 4 % avec le modèle « $V_0.S \rightarrow V_r$. » La contribution instantanée du modèle « $V_0.S \rightarrow V_r$ » devient supérieure à partir de 100 000 ans, car dans ce cas le terme source s'épuise moins rapidement (voir Figure 7.4-54).

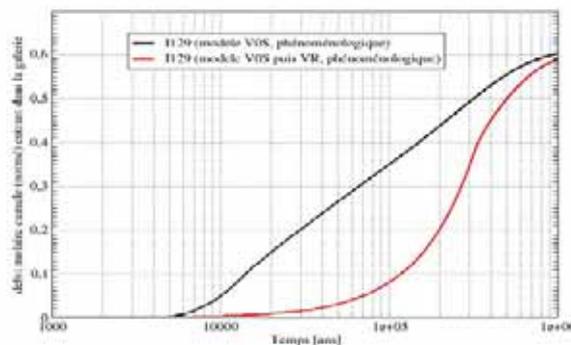


Figure 7.4-54

SEA forage abandonné dans le stockage – débit molaire cumulé et normé en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Comparaison entre le modèle $V_0.S$ et $V_0.S \rightarrow V_r$

La baisse du maximum de débit molaire des éléments mobiles se répercute dans une moindre mesure au niveau du forage. Ainsi, l'iode 129 et le chlore 36 présentent un maximum de débit molaire au niveau du forage diminué d'un facteur cinq environ par rapport au calcul de référence.

Le gain en terme d'impact est également visible sur les éléments faiblement sorbés dans le bouchon tel que le carbone 14. En revanche, dès lors que les radionucléides sont fortement sorbés le bouchon (^{126}Sn , ^{99}Tc , certains actinides...), les temps de transferts diffusifs supérieurs au million d'années masquent l'influence du relâchement plus lent. Il en est de même pour le sélénium 79 dont la limitation par la précipitation masque l'influence du modèle de relâchement.

Les résultats de l'impact mettent en évidence que les principaux contributeurs à l'impact sont le chlore 36 et l'iode 129 (voir Figure 7.4-55). Le maximum de dose est de l'ordre de 0,0002 mSv/an vers 320 000 ans soit trois fois plus faible environ que pour le calcul de référence.

Ces résultats montrent l'intérêt de la matrice du déchet comme barrière complémentaire, en cas de forage.

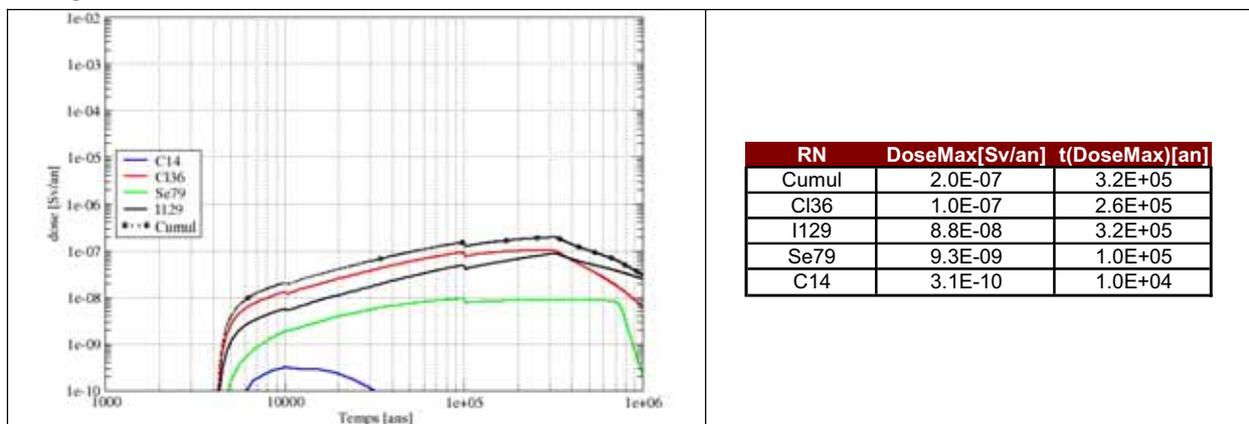


Figure 7.4-55 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au modèle de relâchement des verres » - dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type C2

● Sensibilité au paramètre du modèle de relâchement des déchets vitrifiés (paramètres conservatifs)

Cette étude a consisté à considérer des paramètres conservatifs (taux de fracturation et vitesse de dissolution initiale du verre – voir Tableau 7.4-25) du modèle $V_0.S$ diminuant la durée de relâchement de 8 000 ans à 110 ans. Ce cas de calcul simule par exemple un endommagement important du verre.

	Calculs de référence	Calculs de sensibilité
Taux de fracturation	5	40
Vitesse initiale de dissolution du verre ($\text{g.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$)	0,89	4,45

Tableau 7.4-25 Taux de fracturation et vitesse de dissolution du verre dans les calculs de référence et de sensibilité

Les résultats mettent en évidence que :

- les maxima de débit molaire des radionucléides mobiles entrant dans la galerie sont augmentés à court terme d'un facteur deux environ (Figure 7.4-56). En effet, compte tenu des faibles temps caractéristiques de diffusion (pour la quantité de radionucléides proches du bouchon et traversant les 3 mètres de bentonite et de zone fracturée), la durée du terme source (110 ans au lieu de 8 000 ans) influence le niveau maximal de relâchement, celui-ci se situant juste après 4000 ans au lieu de 12 000 ans. Au-delà de 40 000 ans, les niveaux de relâchement avec les paramètres de

relâchement retenus en référence sont identiques et l'influence du modèle de relâchement n'est plus visible ;

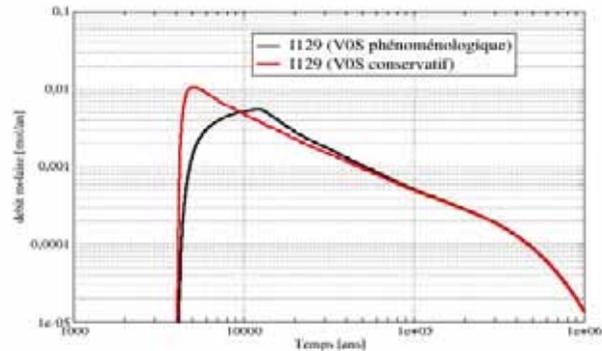


Figure 7.4-56 SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Sensibilité aux paramètres conservatifs du modèle de relâchement V_0S des verres

- pour les radionucléides très sorbés (actinides, ^{99}Tc , ^{126}Sn , ^{135}Cs ...), le modèle de relâchement n'influence pas la voie de transfert par la galerie (et donc le relâchement par le forage), le temps de transfert étant largement le facteur dominant. Il en est de même pour le sélénium 79 peu soluble dont la limitation par la précipitation masque l'influence du terme source.

Les résultats de l'impact sont fournis ci-après pour les colis types C2 et C4 (voir Figure 7.4-57 et Figure 7.4-58). Le maximum de dose à l'exutoire « pompage AEP » est lié à l'iode 129 et au chlore 36. Il est très similaire au calcul de référence, soit 0,00066 mSv/an pour les colis types C2 (contre 0,00065 mSv/an en référence) et 0,00058 mSv/an pour les colis types C4 (contre 0,00053 mSv/an en référence).

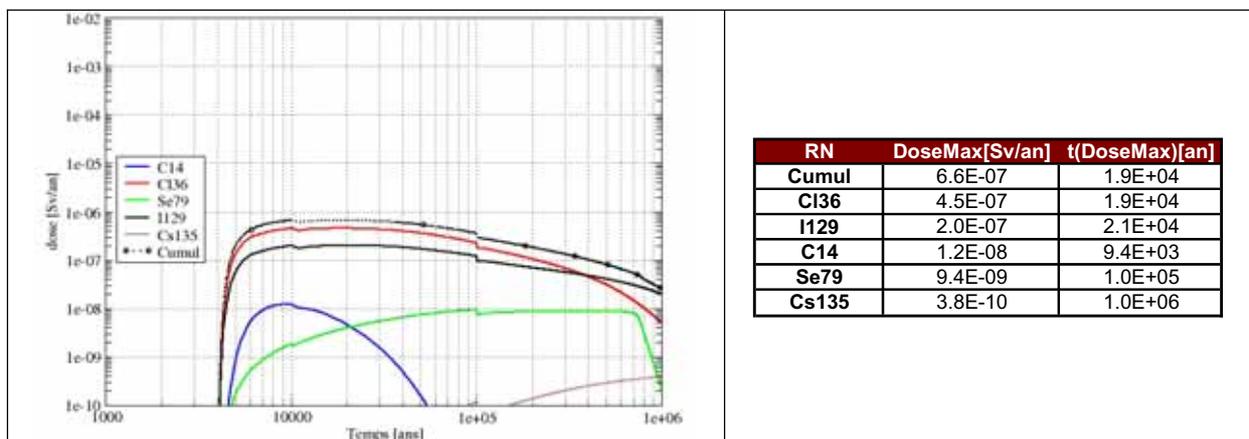


Figure 7.4-57 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres conservatifs du modèle de relâchement $V_0.S$ des verres – dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type C2

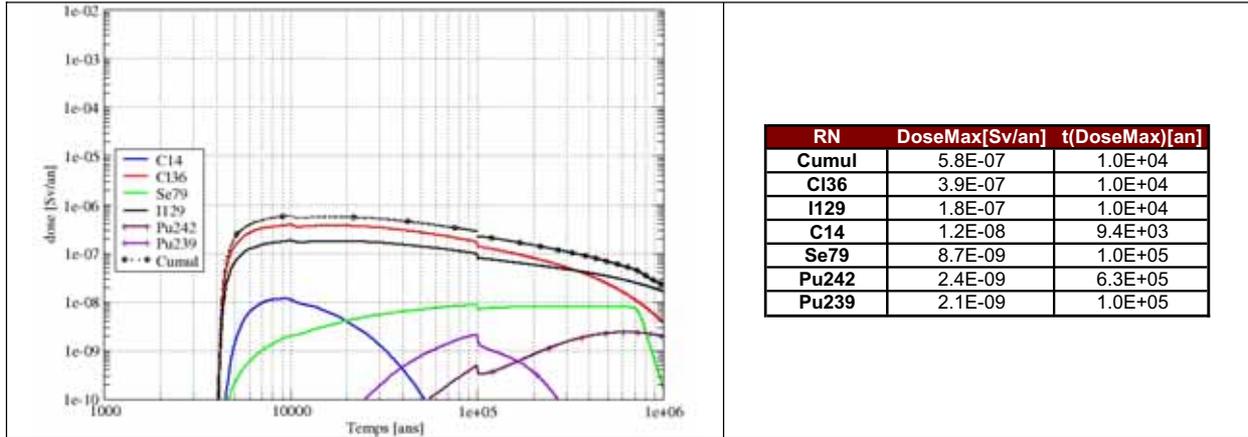


Figure 7.4-58

SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres conservatifs du modèle de relâchement V0.S des verres - dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type C4

Le Tableau 7.4-26 synthétise les résultats de l'impact dû au forage (à l'exutoire pompage AEP dans le Barrois) associés aux calculs de référence et aux études de sensibilité.

Colis type	Etudes de sensibilité				Calcul de référence		
		Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs	Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs
B1x	Forage dans galerie d'accès	4,9.10 ⁻⁵	550 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I	0,012	770	³⁶ Cl ; ⁹³ Mo
B2	Pas d'étude de sensibilité				0,00022	12 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I
C2	Concept avec barrière ouvragée	Idem référence			0,00065	25 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I
	« EDZ dégradée »	0,00067	25 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I			
	Modèle relâchement phénoménologique (V ₀ .S → V _r)	0,0002	320 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I			
	Paramètres conservatifs du modèle V ₀ .S	0,00066	19 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I			
	Géochimie de bentonite conservative	Idem référence					
C4	Géochimie de bentonite conservative	Idem référence			0,00053	23 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I
	Paramètres conservatifs du modèle V ₀ .S	0,00058	10 000	³⁶ Cl ; ¹²⁹ I			
CU1	Forage dans alvéole	0,1	30 000	⁹⁴ Nb ; ¹²⁹ I ; ^{239,240} Pu	0,0072	42 000	¹²⁹ I
	Doublet aux extrémités des galeries	0,0066	57 000	¹²⁹ I			
	Doublet aux centres des galeries d'accès	0,011	45 000	¹²⁹ I			
	Géochimie de bentonite conservative	0,0073	42 000	¹²⁹ I			
CU2	Géochimie de bentonite conservative	0,0012	43 000	¹²⁹ I	0,0012	43 000	¹²⁹ I

Tableau 7.4-26

SEA forage abandonné dans le stockage – Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoire pompage AEP du Barrois – calculs de référence et sensibilité

7.4.7 Enseignements du SEA « forage »

L'étude du scénario « forage » a permis de mettre en évidence que le système de stockage est robuste face la réalisation, puis l'abandon d'un ou plusieurs forages dans le stockage.

En effet, quelles que soient les situations étudiées, même en considérant des modèles de relâchement pénalisants pour les déchets vitrifiés et des paramètres de transport conservatifs pour l'EDZ ou la bentonite, l'impact associé à la fraction d'activité qui sort par le forage est pour la plupart des situations (hors cas de forage direct dans les alvéoles) du même ordre de grandeur que l'impact associé au reste de l'activité qui suit une évolution normale. Les maxima de dose apparaissent néanmoins plus tôt compte tenu de la date d'occurrence du forage choisie volontairement pénalisante et cohérente avec les recommandations de la RFS.III.2.f. Les situations les plus pénalisantes correspondent à celles où le forage est réalisé dans une alvéole de déchets (cas de référence pour les déchets B et cas étudié en sensibilité pour les combustibles usés).

D'un point de vue hydraulique, les résultats mettent en évidence une influence limitée du forage du fait, en particulier, de la faible perméabilité de la barrière géologique et de l'efficacité des scellements qui permettent de « s'opposer à la circulation d'eau ». Même en cas de doublet de forages dans les galeries d'accès des sous-zones de combustibles usés, la faible perméabilité de la barrière géologique, l'architecture en « cul-de-sac » et le faible gradient de charge horizontal empêchent le développement une circulation en U susceptible d'engendrer une augmentation significative de la contribution d'un des forages du doublet ; ces derniers présentant individuellement un impact inférieur ou égal à celui d'un seul forage.

D'un point de vue de l'impact, on montre que les principaux contributeurs sont des éléments solubles et non sorbés comme l'iode et le chlore. Les éléments fortement sorbés dans la barrière géologique présentent un impact souvent négligeable au niveau du forage, ces derniers ayant soit migré préférentiellement dans la barrière géologique, soit bénéficié de la décroissance radioactive avant d'atteindre le forage. Les différentes études de sensibilité ont permis de mettre en évidence que la dose est peu sensible à une géochimie conservatrice de la bentonite ou à des paramètres dégradés d'EDZ.

Pour les déchets C, la prise en compte du concept alternatif avec corps de barrière ouvragée, n'induit pas non plus de gain potentiel vis-à-vis de l'impact, ce dernier étant strictement identique à celui obtenu avec le concept de référence. En revanche, les matrices de déchets sont une barrière utile, la prise en compte de modèles de relâchement plus lents permettant de limiter la dose.

En conclusion, les résultats confirment que le système est robuste face à des événements externes tels qu'un forage intrusif dans le stockage. La fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » est certes dégradée du fait du court circuit partiel de la barrière géologique mais reste en partie effective en limitant fortement la fraction d'activité atteignant le forage, pour les éléments sorbés dans la barrière géologique.

7.5 Le scénario de « fonctionnement très dégradé »

7.5.1 Définition du scénario

La logique qui préside à la définition du scénario qualifié de « fonctionnement très dégradé » est d'amoinrir très significativement les performances des trois fonctions de sûreté principales relatives aux transferts par l'eau, de manière simultanée. Il s'agit d'un scénario conventionnel, dont l'objectif est de vérifier le degré de complémentarité des fonctions. Dans la mesure où on a vu précédemment qu'aucun scénario altéré ne conduisait à des impacts qui divergeaient significativement de celui du SEN, il a paru intéressant de tester plus avant le comportement des fonctions de sûreté dans une situation très dégradée de défaillances multiples. Ce scénario s'inscrit dans une volonté de tester la robustesse d'ensemble du stockage.

Dans la mesure où il est purement conventionnel, le scénario n'est pas soumis à une contrainte de dose particulière.

7.5.2 Traitement du scénario

Le scénario se fonde sur le schéma général du SEN, au sein duquel on dégrade fortement la valeur des paramètres et pour lequel on retient des modèles pénalisants. Les modifications qui sont apportées au SEN sont de plusieurs natures, en relation avec les fonctions qu'il s'agit de dégrader.

- **Pour prendre en compte la dégradation de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau »**

On a vu au chapitre 5 que, jusqu'à des perméabilités de l'ordre de 10^{-12} m/s, le nombre de Péclet dans les argilites permet d'assurer un régime diffusif. Hors les valeurs de mesure correspondant à des protocoles expérimentaux mal maîtrisés, aucune valeur de mesure de perméabilité dans le Callovo-Oxfordien n'est supérieure à ce seuil de 10^{-12} m/s. On retient donc cette dernière valeur pour les perméabilités verticales et horizontales.

Par ailleurs, on retient le modèle de zone endommagée « dégradée », dont les caractéristiques sont rappelées pour mémoire dans le Tableau 7.5-1.

	Calcul de référence EDZ phénoménologique	Calcul de sensibilité EDZ « dégradée »
Zone fracturée	$K = 5.10^{-9} \text{ m/s}$ <u>Anions :</u> $De_{\text{Anions}} = 1.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,15$ <u>Cations :</u> $De_{\text{Cations}} = 5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,20$ géochimie phénoménologique	$K = 10^{-6} \text{ m/s}$ Coefficient pénalisant $(Dp = De / \omega = 2.10^{-9} \text{ m}^2/\text{s})$ Pas de rétention géochimique
Zone microfissurée	$K = 5.10^{-11} \text{ m/s}$ <u>Anions :</u> $De_{\text{Anions}} = 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,05$ <u>Cations :</u> $De_{\text{Cations}} = 2,5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,18$ géochimie phénoménologique	$K = 5.10^{-9} \text{ m/s}$ <u>Anions :</u> $De_{\text{Anions}} = 1.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Anions}} = 0,04$ <u>Cations :</u> $De_{\text{Cations}} = 5.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $\omega_{\text{Cations}} = 0,21$ géochimie conservative

Tableau 7.5-1 *SEA de fonctionnement très dégradé – Sensibilité aux valeurs des paramètres hydrauliques de transfert et de rétention chimique de l'EDZ*

On prend également dans cette étude, comme pour l'étude de sensibilité à l'EDZ du SEA « défaut de scellements », une perméabilité de noyau de bentonite de 10^{-9} m/s au lieu de 10^{-11} m/s . Cela concerne tous les noyaux de scellements, y compris les bouchons d'alvéole.

Compte tenu de ces conditions de calcul très pénalisantes, les scellements ont dans ces conditions des performances faibles, proches d'une défaillance complète. Les scellements étant très peu efficaces, on ne considère pas la possibilité d'une montée en pression des gaz de corrosion.

A titre complémentaire, on considère aussi une dégradation de la perméabilité du remblai, dont on attend cependant peu d'effets (10^{-6} m/s).

Du point de vue du traitement numérique, il n'est pas possible de négliger a priori la voie de transport par les ouvrages d'accès. On représente donc explicitement, dans deux modèles distincts, le transport par les galeries et le puits d'une part, par le milieu géologique d'autre part. Le calcul est effectué pour la voie de transfert par les ouvrages en utilisant le modèle hydrogéologique à l'actuel, compte tenu des temps de transfert anticipés, qui devraient être courts.

Parallèlement, on conduit un calcul relatif à la voie de transfert par la formation hôte saine. Pour cette voie de transfert, le choix est fait de retenir le modèle géoprospectif (1 million d'années) qui maximise le gradient de charges vertical ascendant dans le Callovo-Oxfordien. En effet, compte tenu de l'augmentation de la perméabilité de la barrière géologique d'un facteur 20 pour la composante verticale, le transport dans la formation hôte pourrait devenir co-dominant diffusif/convectif et donc sensible au gradient. Ainsi, la prise en compte du modèle à un million d'années maximise le débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien, et réduit le temps de transfert vers les encaissants.

● **Pour prendre en compte la dégradation de la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »**

On retient des modèles de relâchement conservatifs pour l'ensemble des colis types du modèle d'inventaire :

- un relâchement labile pour les colis de déchets stockés dans les alvéoles B1x (colis types B1, B5 hors B5.1, B6 hors B6.1),
- un relâchement en 1000 ans pour les boues bitumées,
- un modèle $V_0.S$ avec des paramètres conservatifs pour les déchets vitrifiés,
- un modèle de dissolution radiolytique avec une cinétique conservative pour les combustibles usés.

Le scénario « très dégradé » n'a que quelques conteneurs défaillants, comme le SEN, en référence. On retient cependant, pour dégrader encore plus la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », une étude de sensibilité incluant une défaillance de l'ensemble des colis de l'inventaire, identique à celle considérée pour le SEA « défaut de colis ». La charge thermique dans le stockage est celle évaluée avec le modèle 2D conservatif.

Rappelons également que le fait de considérer une absence de propriétés géochimiques de la zone fracturée (solubilité infinie) permet de simuler l'effet d'un transport colloïdal dans cette même zone pour les radionucléides qui font l'objet du calcul (voir chapitre 6).

● **Pour prendre en compte la dégradation de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »**

On considère :

- des valeurs de paramètres de transport conservatives dans le Callovo-Oxfordien et l'EDZ ;
- des valeurs de paramètres de rétention conservatives dans le Callovo-Oxfordien, l'EDZ et dans les ouvrages en béton ou en argile gonflante (barrière ouvragée).

Ces valeurs sont les mêmes que celles qui ont été retenues en études de sensibilité du SEN.

7.5.3 Effet sur les fonctions de sûreté

Les résultats sont présentés globalement, toutes fonctions confondues, en adoptant une logique qui consiste à suivre le transfert des radionucléides. On s'attache à distinguer d'une part la voie de transfert par les ouvrages, d'autre part celle par le milieu géologique.

7.5.3.1 Voie de transfert par les ouvrages

On s'attache ici à évaluer les conséquences de la prise en compte d'une situation très dégradée sur l'importance de voie de transfert par les ouvrages d'accès. Les résultats sont synthétisés ci-après.

La forte perméabilité de l'EDZ et du Callovo-Oxfordien sain (facteur 20 sur la composante verticale) engendre une perturbation hydraulique significative ; le débit hydraulique sortant du stockage par le puits est de $24 \text{ m}^3/\text{an}$ (voir Figure 7.5-1), soit 50 fois plus qu'en SEN, et 10 fois plus que le scénario altéré « défaut de scellements » dans le cas « tous scellements défailants ». En effet, la forte perméabilité du Callovo-Oxfordien engendre des gradients de charges plus élevés entre le stockage et le puits, ce qui a pour effet d'accroître les vitesses d'écoulements le long des galeries de stockage et d'accroître les transferts par convection.

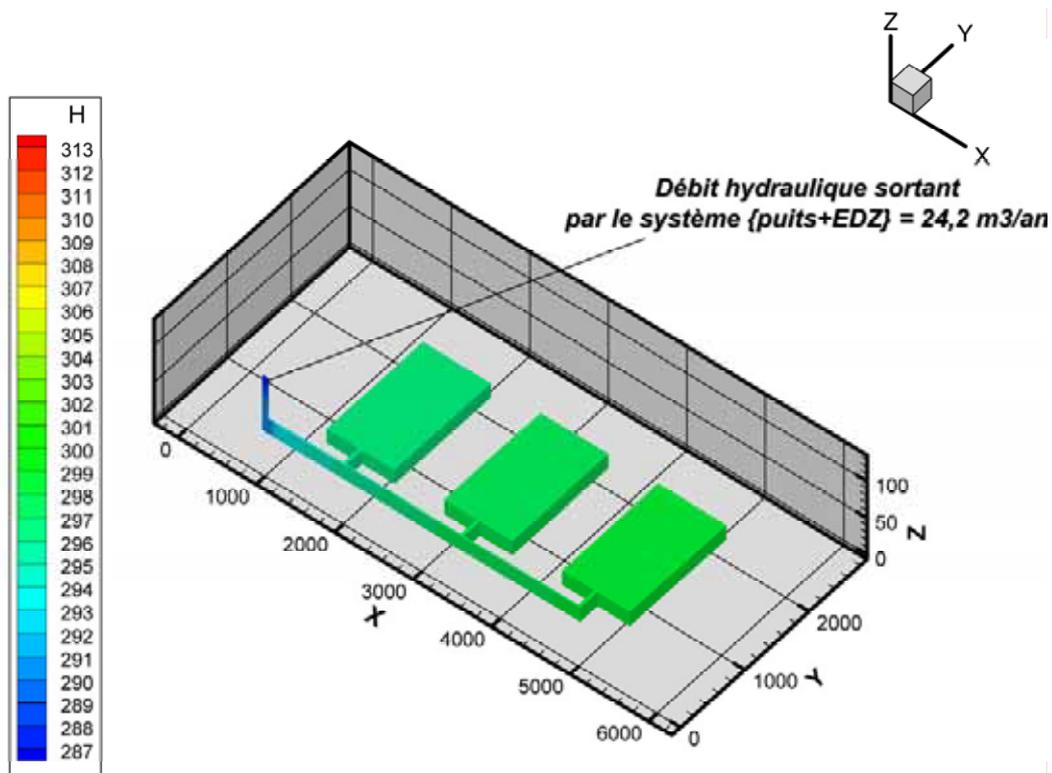


Figure 7.5-1

SEA de fonctionnement très dégradé – Répartition des charges hydrauliques en mètres NGF⁷¹ dans les ouvrages d'accès du stockage – Fonctionnement très dégradé – exemple des combustibles usés

● Au niveau des alvéoles

Contrairement au SEA « défaut de scellements » le scénario « fonctionnement très dégradé » combinant une EDZ dégradée et une perméabilité de barrière géologique plus élevée (voir Figure 7.5-2), engendre un régime convectif dans la zone fracturée en tête d'alvéole de combustibles usés avec un nombre de Péclet 10 fois plus élevé (égal à 7 contre 0,7 en SEN). Le régime reste néanmoins diffusif dans l'alvéole, le nombre de Péclet y étant de $0,002$ (contre $7 \cdot 10^{-4}$ en SEN).

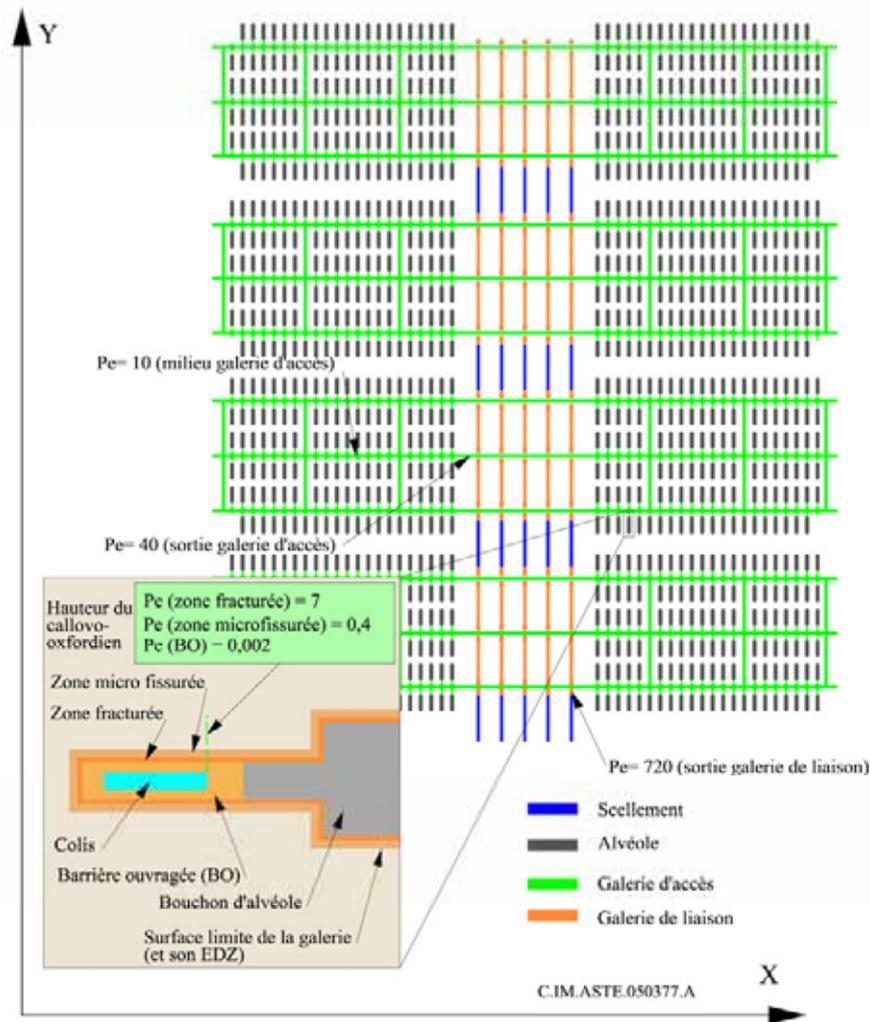


Figure 7.5-2

SEA « Fonctionnement très dégradé » - Colis type CU1 - ^{129}I - Valeurs du nombre de Péclet dans les ouvrages et alvéoles de combustibles usés

Les paramètres dégradés d'EDZ, et les paramètres hydrauliques dans la bentonite et la formation hôte, combinés à la prise en compte d'un terme source conservatif, contribuent à augmenter d'un ordre de grandeur, par rapport au calcul de référence du SEN, le débit molaire maximal entrant dans la galerie (dans l'exemple de l'iode 129 des colis types CU1), et de 7 % la masse d' ^{129}I entrant dans la galerie sur 1 million d'années (66 % contre 59 %). Notons que la masse entrant dans la galerie est identique dans le fonctionnement très dégradé et dans le calcul de sensibilité du SEN (voir paragraphe 5.4.6.1) envisageant une EDZ dégradée. L'augmentation de perméabilité du Callovo-Oxfordien accroît les cinétiques convectives dans les ouvrages et dans la formation hôte. Cependant, en tête d'alvéole, le flux convectif n'est pas suffisant pour accentuer la masse migrant depuis les alvéoles vers les galeries par rapport à l'étude de sensibilité du SEN.

Dans les alvéoles de déchets B (voir Figure 7.5-3), même avec une forte diffusion, la convection devient également prépondérante sur les 50 mètres en tête d'alvéole et dans les zones de forte perméabilité (zone fracturée et zone micro-fissurée).

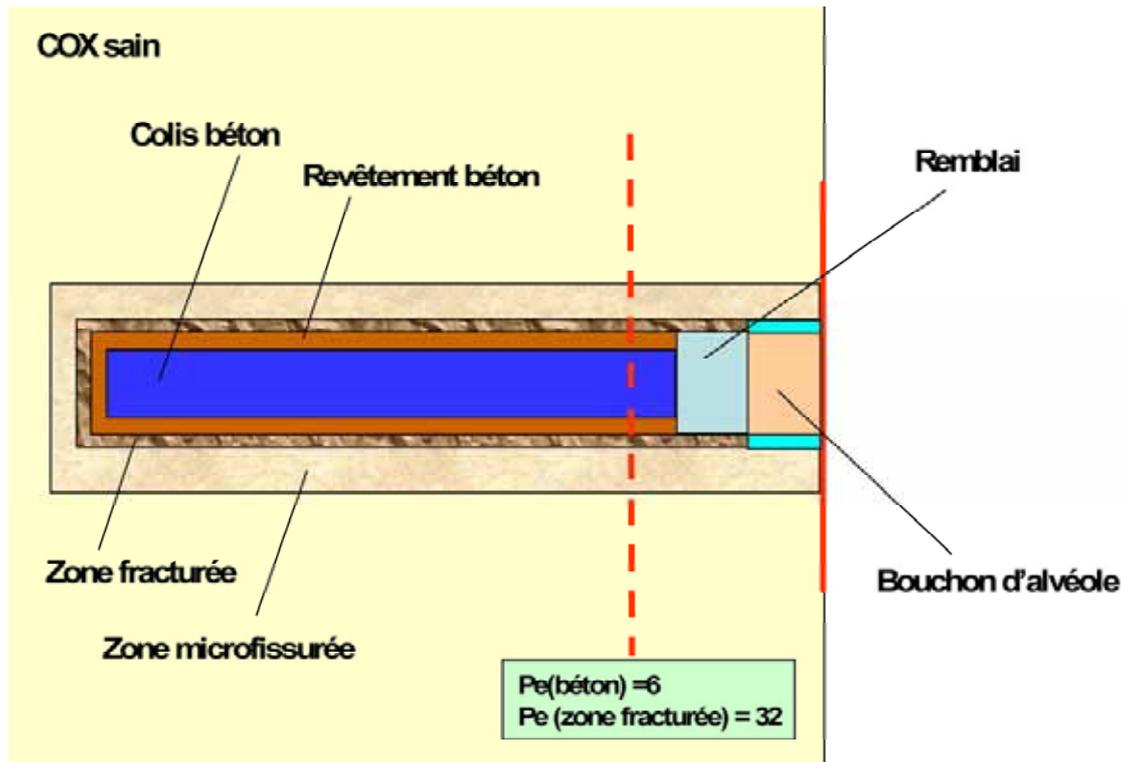


Figure 7.5-3 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Colis type de déchets B stockés dans alvéoles de type B1x - ^{129}I - Valeurs du nombre de Péclet dans les alvéoles

Globalement, la « dégradation » des différents paramètres de transport et hydrauliques augmente de manière simultanée les cinétiques diffusives et convectives.

- **Au niveau de la zone de stockage**

Dans les galeries de stockage d'une zone, les écoulements deviennent convectifs (nombre de Péclet de l'ordre de 10 dans le milieu de zone de stockage) par l'influence des ouvrages situés en amont. A la sortie de la zone de stockage, le caractère convectif s'affirme (nombre de Péclet de l'ordre de 720) avec des temps caractéristiques de transports réduits (voir Figure 7.5-2). De ce fait, sur l'exemple de l'iode 129 des CU1 (voir Figure 7.5-4) le maximum de débit molaire en sortie de zone de stockage apparaît à 20 000 ans contre 100 000 ans en SEN ; Ces transferts plus rapides dans les ouvrages tendent à diminuer les échanges avec la barrière géologique, favorisant ainsi la voie de transfert ouvrages ; en conséquence, la quantité d' ^{129}I intégrée à 1 million d'années sortant de la zone de stockage est nettement plus forte qu'en SEN (facteur 60) et le débit molaire maximal en sortie de zone de stockage est augmenté d'un facteur 70 environ.

Néanmoins les longueurs de galeries à parcourir (plusieurs centaines de mètres) sont importantes et les échanges avec la barrière géologique restent suffisants pour limiter la contribution de cette voie de transfert (qui était négligeable en SEN) : à titre d'exemple, seulement 0,5% de quantité initiale d'iode 129 sort de la zone de stockage de CU1.

Pour les déchets B, on observe les mêmes tendances (voir Figure 7.5-5).

● **Dans les ouvrages d'accès**

La convection étant très dominante dans les galeries de liaison principales, avec des temps de transfert qui sont très réduits, la quantité de matière sortant par le puits devient plus importante qu'en SEN d'un facteur 10 000 (0,38 % de la masse initiale contre $3.10^{-5}\%$ en SEN – voir Figure 7.5-6), avec un maximum apparaissant vers 50 000 ans au lieu de 800 000 ans (voir Figure 7.5-4).

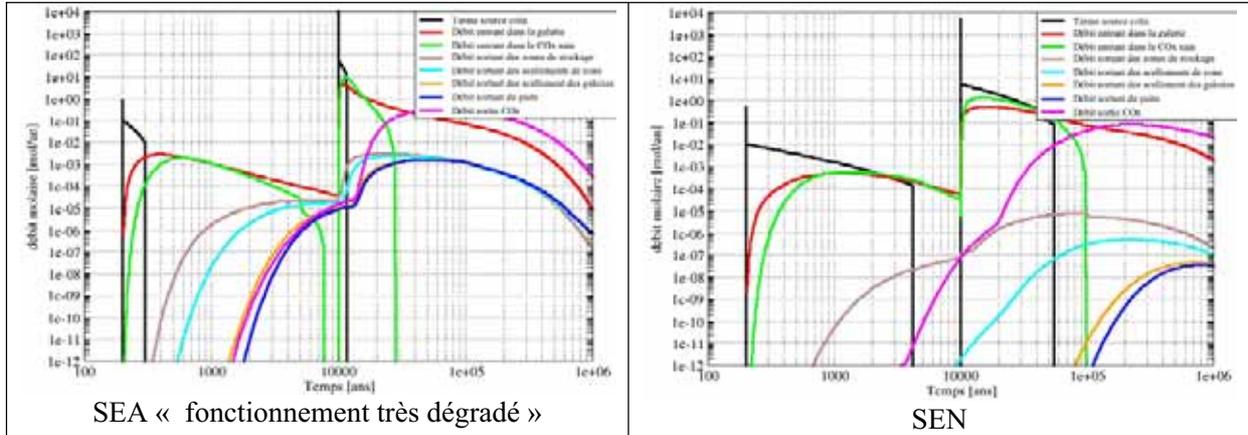


Figure 7.5-4 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CUI – ^{129}I – Historique de débits molaire

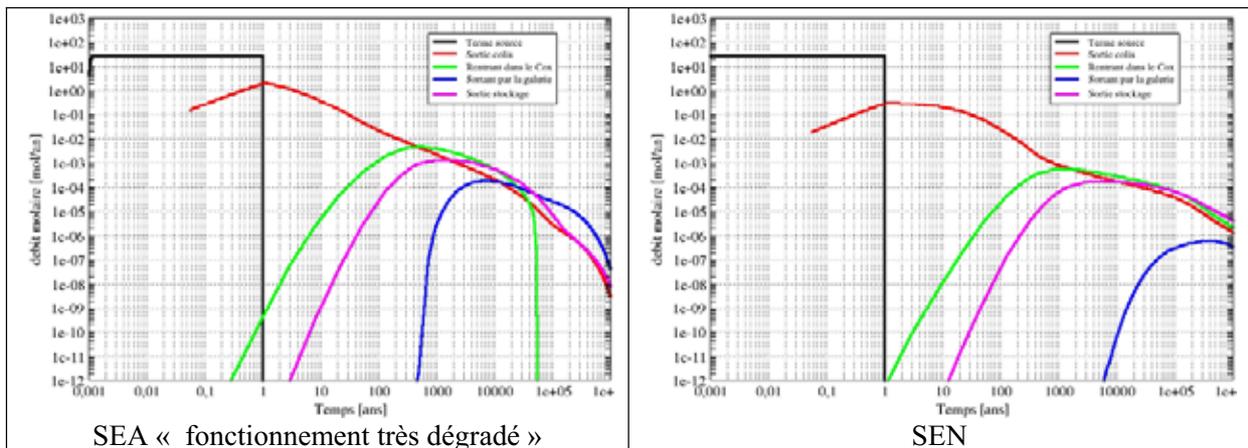


Figure 7.5-5 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type B1x – ^{129}I – Historique de débits molaire

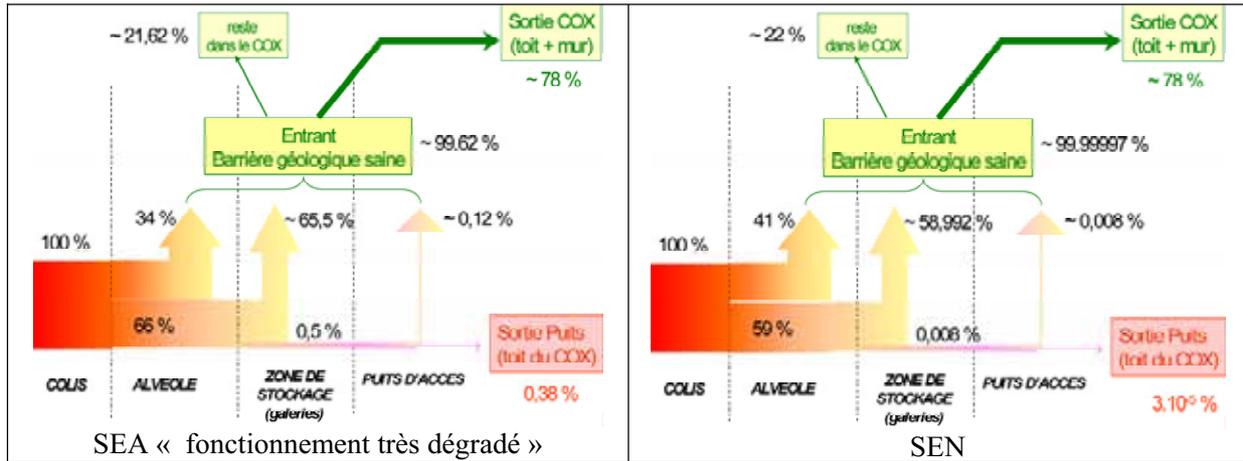


Figure 7.5-6 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Colis type CU1 - ^{129}I - Répartition des voies de transfert

Ainsi, la prise en compte de performances de transport, hydrauliques, et géochimiques de la formation hôte, de la barrière ouvragée et de l'EDZ conservatives accroît la fraction d'activité qui migre vers les galeries d'accès. En effet, la perméabilité de la formation hôte fixée de façon pénalisante à 10^{-12} m/s (pour la composante verticale et horizontale), combinée à une EDZ dégradée (ce qui équivaut à une inefficacité des ancrages de scellements), engendrent une convection significative au sein des ouvrages.

Notons que le débit molaire en sortie de puits augmente significativement par rapport au calcul de référence du SEN ; en outre il apparaît plus tôt que le maximum de débit molaire sortant de la formation hôte ; à titre d'exemple pour les combustibles usés CU1, le maximum de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien est de l'ordre de 10^{-1} mol/an à 200 000 ans alors qu'il est de l'ordre de 10^{-3} mol/an à 50 000 ans, en sortie de puits. Néanmoins, la masse sortant du puits sur la durée totale de l'analyse reste faible par rapport à celle empruntant la formation hôte ; en effet elle ne représente que 0,38 % de l'inventaire total, l'autre fraction de la masse empruntant la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien.

7.5.3.2 Voie de transfert par la formation hôte

En ce qui concerne la voie de transfert par la formation hôte, les résultats de calculs sont similaires à ceux déjà constatés lors de l'étude de sensibilité du SEN portant sur ses paramètres de transfert et de rétention (voir paragraphe 5.4.6.1) ; les débits molaires sont fournis à titre d'exemple pour l' ^{129}I des combustibles usés CU1 (voir Figure 7.5-7). Le maximum de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien apparaît significativement plus tôt qu'en SEN (temps de percée de l'ordre de 90 000 ans). Rappelons que, compte tenu de la prise en compte d'une limite de solubilité plus élevée, le ^{79}Se est moins immobilisé dans ce calcul (voir Figure 7.5-8). Il bénéficie également moins de la décroissance radioactive, compte tenu du temps de transfert plus court. Pour les déchets où il est en quantité importante, il devient le principal contributeur à l'impact.

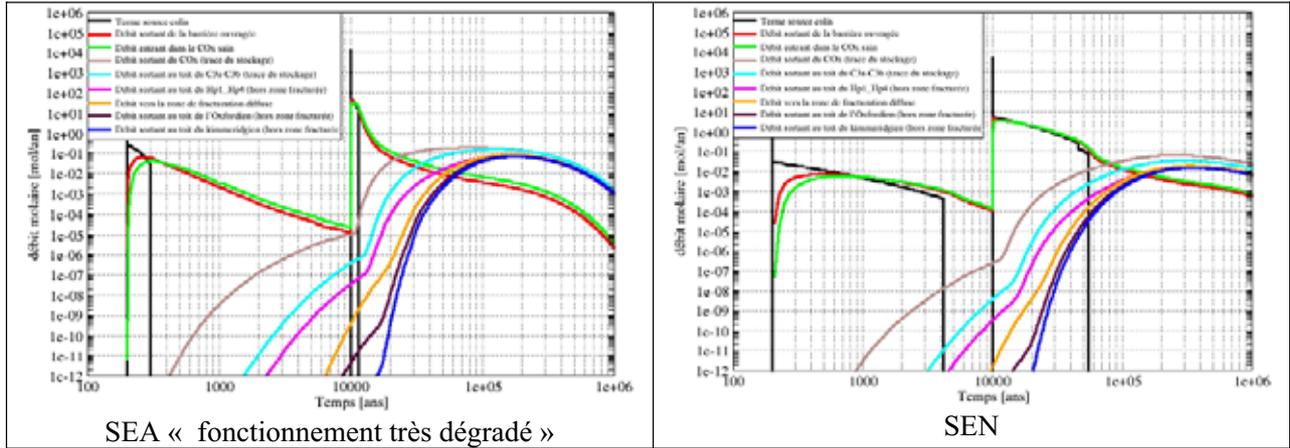


Figure 7.5-7 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CUI – ¹²⁹I – Historiques des débits molaires – voie de transfert « barrière géologique »

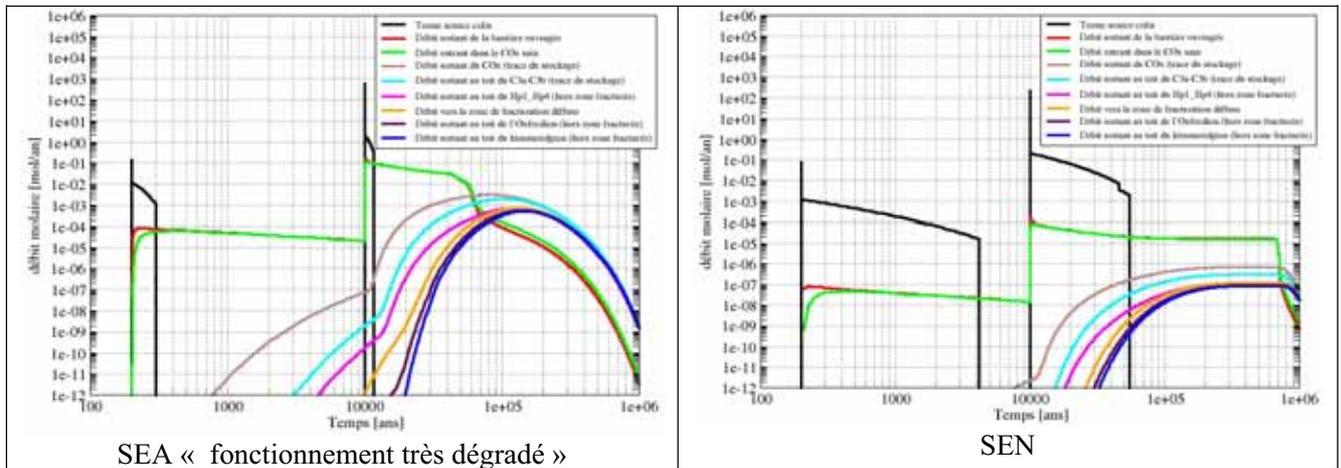


Figure 7.5-8 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CUI – ⁷⁹Se – Historiques des débits molaires – voie de transfert « barrière géologique »

7.5.4 Evaluation de l'impact

Les résultats de l'impact confirment que la dose due à la voie de transfert par la barrière géologique saine est largement supérieure à la dose due à la voie de transfert par les ouvrages (voir Figure 7.5-9).

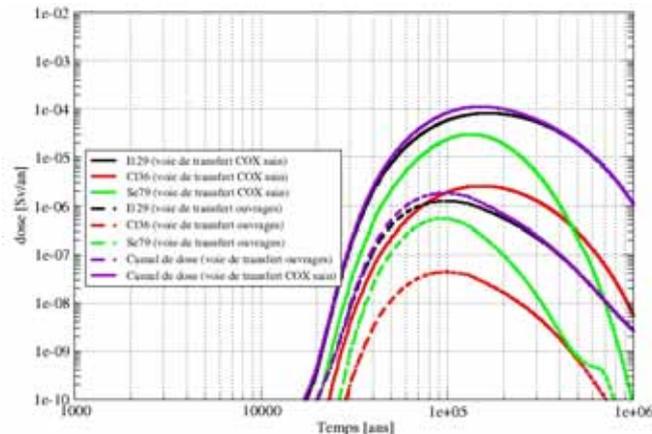


Figure 7.5-9

SEA fonctionnement très dégradé – Comparaison des doses à l'exutoire de référence Saulx du colis type CU1 pour les voies de transfert ouvrages (modèle à l'actuel) et barrière géologique saine (modèle à 1 million d'années)

Pour les combustibles usés CU1, le maximum de dose vaut 0,11 mSv/an à 150 000 ans. L'iode 129 et le sélénium 79 co-dominent la dose. Pour les déchets C vitrifiés, la contribution du sélénium 79 est d'autant plus marquée qu'il est en quantité plus importante (50 %) et que la quantité d'iode 129 est moindre. Le maximum de dose, piloté par le sélénium, est dans ce cas de 0,0055 mSv/an vers 170 000 ans. Au-delà de 500 000 ans, l'iode, le chlore et le sélénium co-dominent l'impact (le sélénium commençant à bénéficier de la décroissance radioactive) mais à des niveaux de dose très faibles d'au maximum 0,001 mSv/an.

Pour les déchets B, la contribution de la fraction d'activité qui sort par les ouvrages est plus significative car l'alvéole de stockage est directement reliée aux galeries de liaison principales, ce qui réduit les temps de transfert moyen des radionucléides dans les ouvrages jusqu'au puits et donc limite les échanges avec le Callovo-Oxfordien. La dose la plus élevée reste néanmoins associée à la fraction d'activité migrant par la barrière géologique avec un maximum de dose (pour les déchets stockés dans les alvéoles de type B1x et B2) de l'ordre de 0,003 mSv/an vers 160 000 ans.

On donne dans le Tableau 7.5-2 les doses à l'exutoire Saulx du modèle à un million d'années pour la fraction d'activité qui migre par la barrière géologique. Comme vu précédemment, ces doses dominent celles associées à la fraction d'activité qui migre par les ouvrages.

Colis-types	Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs
Exutoire « Saulx » (le plus pénalisant)			
B1x – (colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène gazeux)	0,0023	160 000	³⁶ Cl (¹²⁹ I dans une moindre mesure)
B2 – (boues bitumées)	0,00022	170 000	¹²⁹ I ; ³⁶ Cl ; ⁷⁹ Se
Total des déchets B1x/B2 (scénario S1b)	0,0025	vers 160 000	³⁶ Cl (¹²⁹ I dans une moindre mesure)
Verres C1 et C2 (Scénario S1b)	0,03	170 000	⁷⁹ Se (¹²⁹ I ; ³⁶ Cl à très long terme)
Verres C3 et C4 (Scénario S1a)	0,024	170 000	⁷⁹ Se (¹²⁹ I ; ³⁶ Cl à très long terme)
Total déchets C	0,054	170 000	⁷⁹ Se (¹²⁹ I ; ³⁶ Cl à très long terme)
Combustibles usés CU1	0,11	150 000	¹²⁹ I ; ⁷⁹ Se
Combustibles usés CU2	0,0089	160 000	¹²⁹ I ; ⁷⁹ Se
Total des combustibles usés CU1/CU2	0,12	vers 150 000	¹²⁹ I

Tableau 7.5-2 *SEA fonctionnement très dégradé - Dose totale – dates des maxima de dose et principaux contributeurs à l'exutoires Saulx de l'Oxfordien (cas le plus pénalisant) – modèle à 1 million d'années – tous déchets*

De la Figure 7.5-10 à la Figure 7.5-16, on présente les doses pour les radionucléides transitant par les ouvrages et les doses résultant du transfert des radionucléides par la barrière géologique.

● Combustibles usés CU1

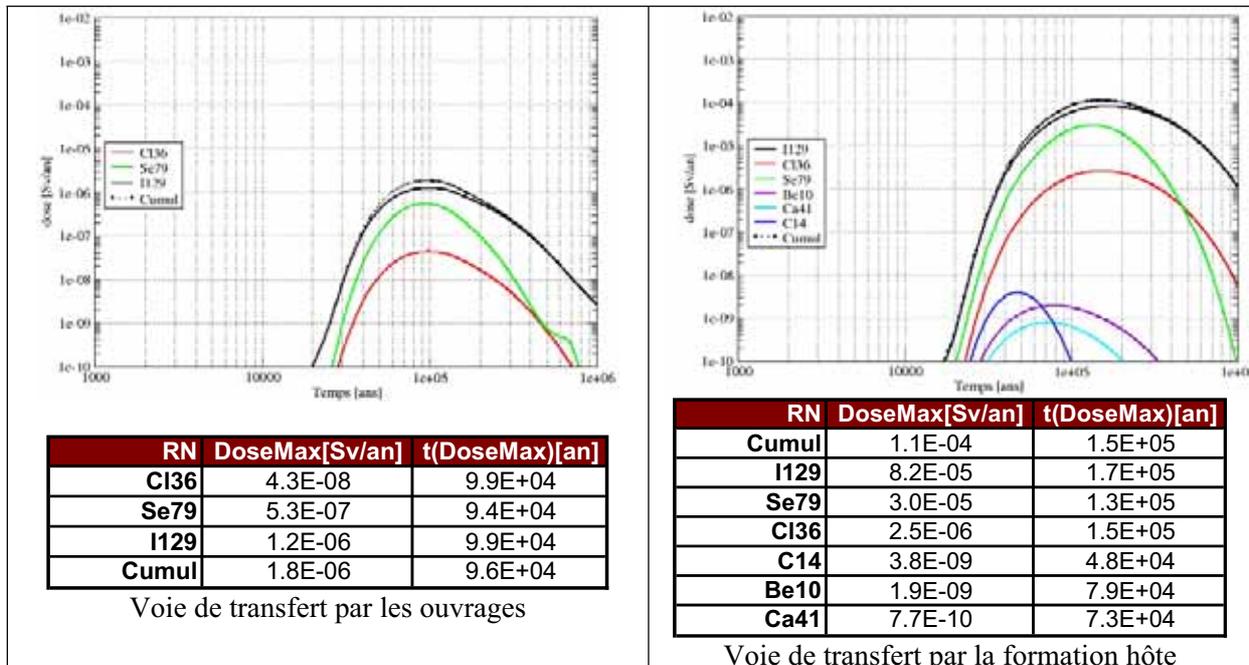


Figure 7.5-10 *Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types de combustibles usés CU1*

● **Combustibles usés CU2**

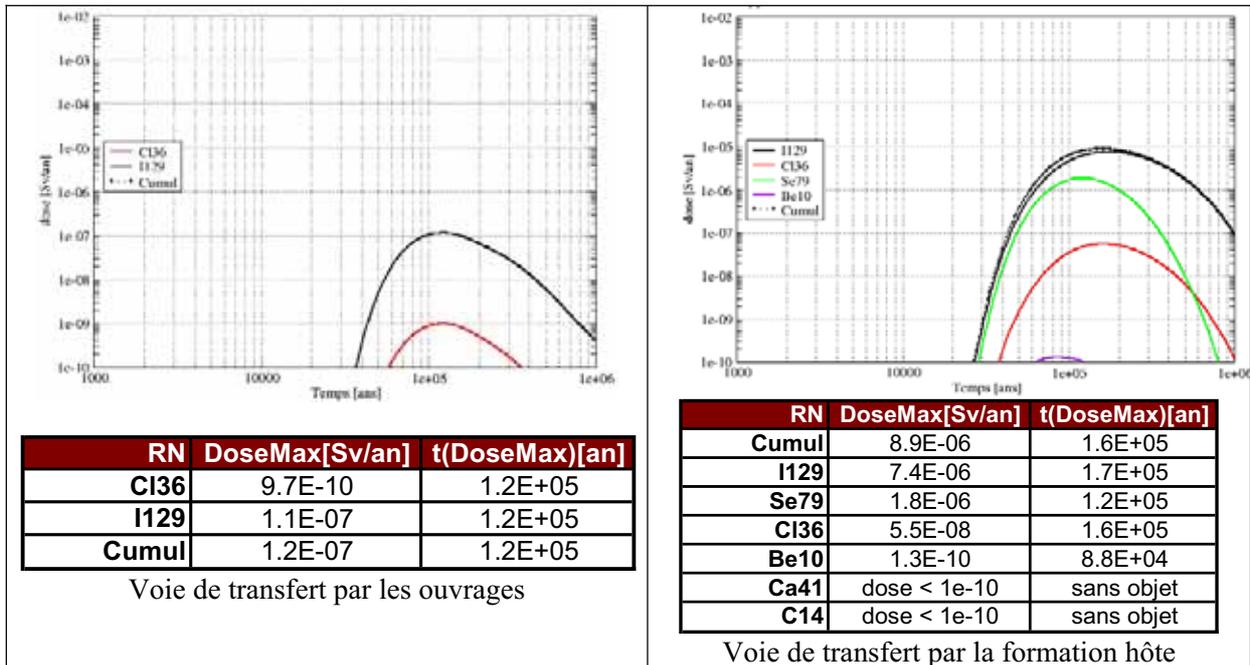


Figure 7.5-11 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types de combustibles usés CU2

● **Déchets vitrifiés**

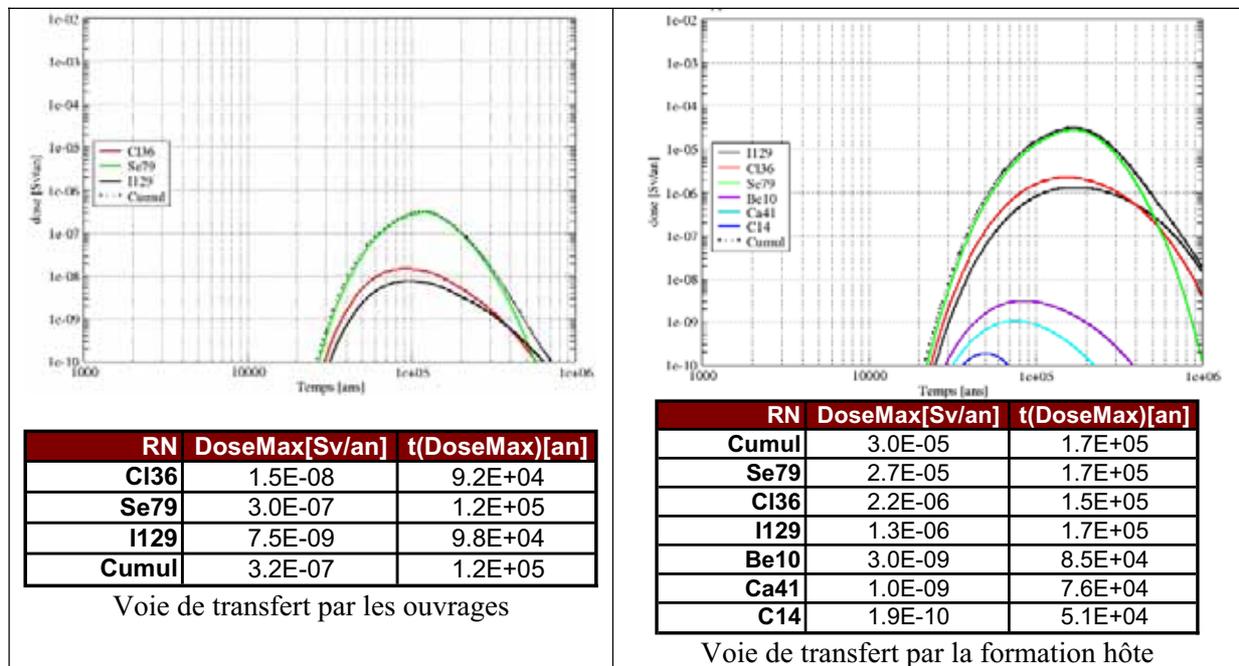


Figure 7.5-12 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types C1/C2

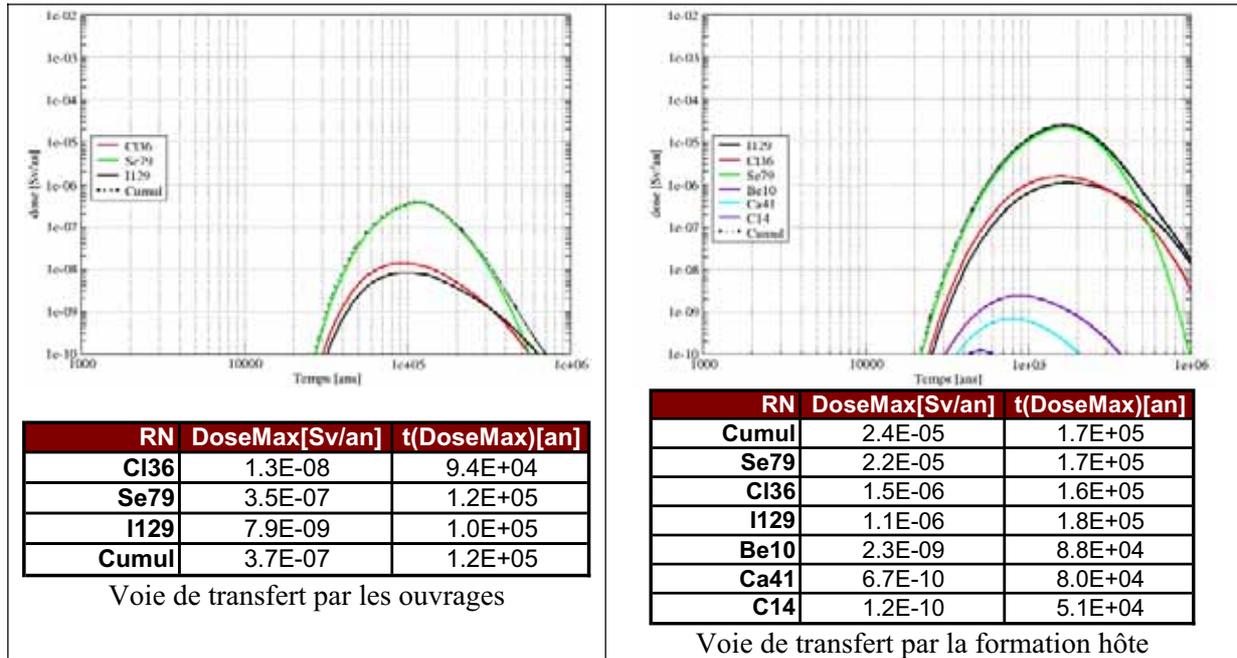


Figure 7.5-13 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types C3/C4

● **Déchets B**

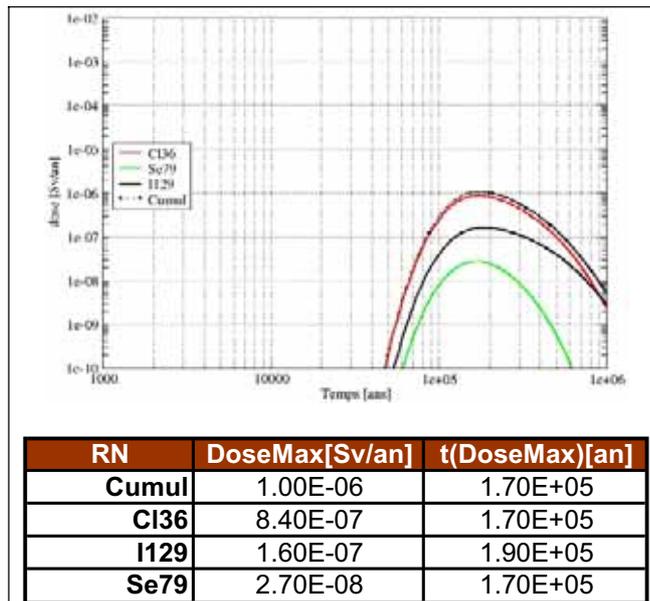


Figure 7.5-14 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Voie de transfert par les ouvrages - Colis types de déchet B1x

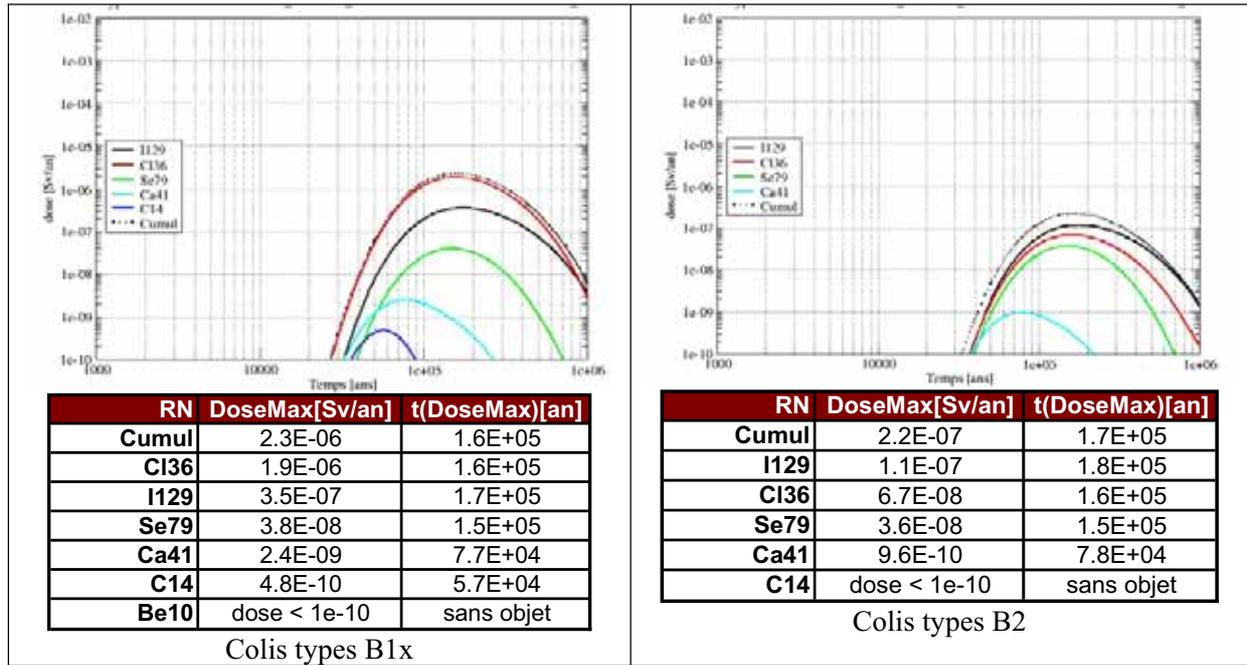


Figure 7.5-15 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Voie de transfert par les barrière géologique - Colis types de déchets B1x et B2

7.5.5 Analyses de sensibilité

On ajoute ici au SEA « fonctionnement très dégradé » la défaillance prématurée de l'ensemble des conteneurs de combustibles usés.

Après calcul, on constate que la prise en compte des conteneurs défaillants n'est pas de nature à modifier les principaux résultats, à la fois sur la répartition de la voie de transfert par les ouvrages et par le Callovo-Oxfordien sain, sur les débits molaires sortant de la formation hôte et a fortiori sur la dose maximale et le temps d'apparition de cette dose. En effet, la durée du transitoire thermique reste limitée au regard des temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien. Durant cette première période, l'épaisseur moyenne parcourue dans le Callovo-Oxfordien est faible par rapport à l'épaisseur totale de barrière géologique. Ainsi, pour les principaux radionucléides contributeurs à l'impact (^{129}I , ^{36}Cl et ^{79}Se) pour lesquels le calcul a été réalisé la diminution des temps de transfert due aux paramètres du scénario altéré « fonctionnement très dégradé », combinée à un relâchement prématuré des colis (c'est-à-dire à un transfert accéléré sous l'influence de la thermique), n'est pas suffisante pour augmenter significativement l'impact. La dose maximale est très similaire à celle du scénario « fonctionnement très dégradé » dans son cas de référence (0,12 mSv/an contre 0,11 mSv/an). Les dates de maxima sont légèrement avancées.

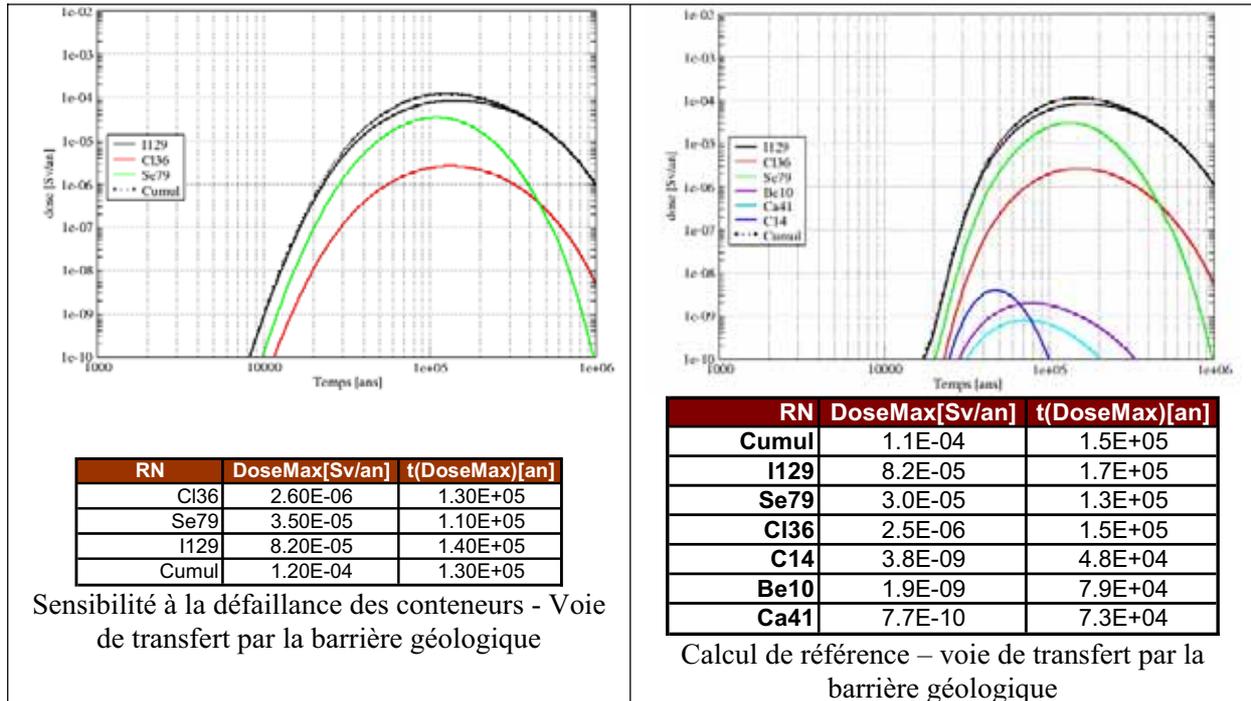


Figure 7.5-16

Scénario « Fonctionnement très dégradé » - sensibilité à la défaillance prématurée des conteneurs de combustibles usés CUI - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien

7.5.6 Enseignements du SEA de « fonctionnement très dégradé »

Ce scénario ne correspond à aucune situation mise en évidence par l'analyse de risques. Il est cependant possible d'en retirer des enseignements utiles sur la robustesse du stockage face aux incertitudes. En effet, compte tenu du cumul d'hypothèses pénalisantes prises en compte, ce scénario et ses études de sensibilité revient à n'envisager comme dispositifs efficaces que :

- la formation hôte, qui préserve une géochimie dégradée mais néanmoins apte à retenir les radionucléides dans leur migration ;
- l'architecture en « cul-de-sac » du stockage, qui malgré une perméabilité relativement forte du Callovo-Oxfordien parvient à limiter les flux. Le régime est néanmoins convectif au sein du stockage ;
- les matrices de déchets B2, C et de combustibles usés, dont les performances sont amoindries mais pas nulles (au contraire des autres déchets B).

Réduit ainsi à l'expression minimale de ses fonctions de sûreté, le stockage apparaît robuste. L'impact augmente, mais dans des proportions qui restent faibles (0,12 mSv/an au plus).

7.6 Conclusion

Les enseignements relatifs à chaque scénario d'évolution altérée ayant été exposés à la fin des paragraphes du présent chapitre, la conclusion se propose simplement de revenir sur certains points qui apparaissent comme les plus significatifs.

Dans l'ensemble des scénarios calculés, y compris le forage, le Callovo-Oxfordien ressort comme un composant important au regard de la maîtrise de l'impact, complémentaire ou redondant selon les cas par rapport aux autres. En effet, la faible perméabilité en grand de la roche permet de maîtriser les apports d'eau, y compris dans les situations de perte de scellements, de dégradation de la zone endommagée, ou de forage. Les propriétés géochimiques de la roche limitent la progression des radionucléides sorbés, ce qui permet, dans la plupart des situations, de limiter l'impact aux seuls éléments qui sont insensibles à ces propriétés (iode, chlore). On notera que les architectures contribuent à mobiliser les propriétés favorables de la roche : en particulier, le choix d'une disposition des ouvrages en « cul-de-sac » permet de limiter les circulations d'eau de manière efficace.

Pour autant, on note que les scellements sont des composants dont le rôle pour la sûreté est sensible. En cas de forage, ils contribuent au fractionnement qui limite l'influence hydraulique et les pertes de charge. Ils permettent d'immobiliser des éléments éventuellement très solubles qui pourraient, sans leur présence, migrer au travers des galeries.

La barrière ouvragée en bentonite autour des colis de combustibles usés n'apparaît pas comme une « barrière » au sens classique du terme. Elle ne joue pas de rôle dans la limitation des transferts de radionucléides, puisque même en situation de forage le milieu géologique peu se substituer à elle. Elle n'apparaît pas non plus cruciale pour maintenir un régime diffusif dans les alvéoles. Le régime hydraulique est contrôlé par les scellements de puits et de galerie. En définitive, le rôle de la barrière ouvragée renvoie surtout à la prise en compte des incertitudes sur les effets de la thermique, essentiellement les effets thermomécaniques, dans les alvéoles.

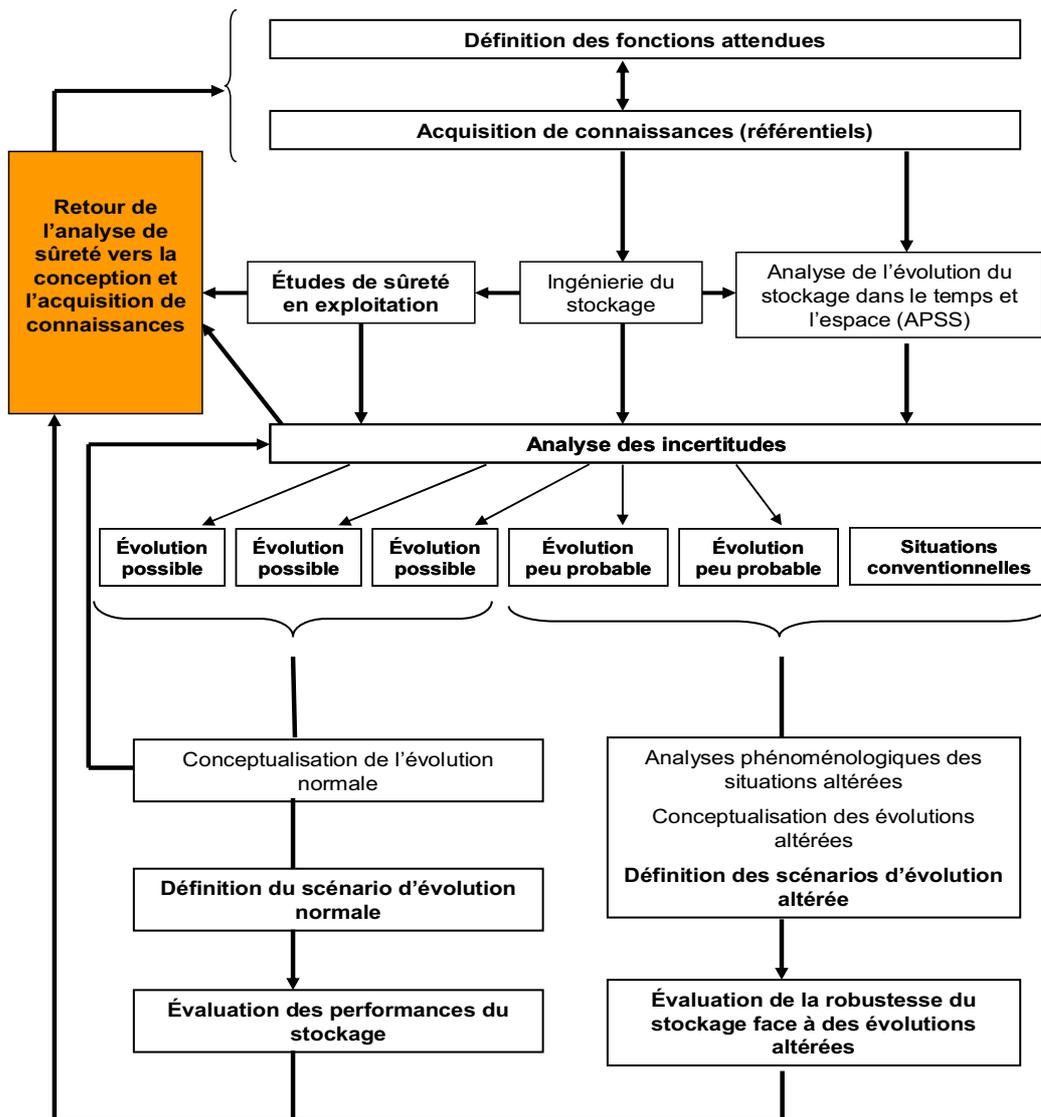
Les colis de déchets ont un rôle qualitativement important, mais qui ne se traduit pas dans le calcul d'impact lui-même, les maxima de doses étant peu sensibles à leurs performances. On note cependant qu'ils permettent de retarder le relâchement des déchets vitrifiés, sensibles à la température. Les matrices de conditionnement constituent une barrière efficace dans des situations telles que le forage, pour peu que l'on puisse mobiliser leurs performances.

Du point de vue de l'impact, on note que celui-ci reste maîtrisé, y compris dans des situations du type du scénario « de fonctionnement très dégradé », dans lesquelles les fonctions de sûreté du stockage ont soit des performances minimales (pour le milieu géologique, pour les éléments ouvragés en bentonite) soit pas de performances du tout (pour les colis). Ce résultat souligne la robustesse du système de stockage. Les doses en transfert par l'eau sont au plus de 0,12 mSv/an dans le cas du scénario de « fonctionnement très dégradé » supposant une perméabilité amoindrie de la roche, un court-circuit des scellements, une défaillance de l'ensemble des éléments de colisage et des performances médiocres ou nulles de l'ensemble des matrices de déchets.

8

Conclusions

8.1	Les enseignements de l'analyse de sûreté	617
8.2	Les pistes de progrès possibles.....	620
8.3	Conclusion générale.....	622



THEME ABORDE EN TANT QUE DE BESOIN DANS LE PRESENT CHAPITRE



THEME TRAITÉ SPECIFIQUEMENT DANS LE PRESENT CHAPITRE

Synoptique 8-1

Représentation de l'enchaînement des différentes étapes de l'analyse (voir Synoptique 1-1) Thème : Conclusions

Les conclusions du tome « évaluation de sûreté » se placent dans une double perspective. Il s'agit d'une part de résumer et de synthétiser les résultats des différentes étapes de l'analyse, afin de porter une appréciation globale sur la sûreté du concept de stockage proposé. Cette appréciation est étayée par les analyses de sûreté en phase d'exploitation – observation (chapitre 4) et postérieurement à la fermeture (chapitre 5 et suivant). Elle se fonde aussi bien sur les calculs de performances (chapitres 5 et 7) que sur les analyses plus qualitatives, portant tant sur la manière dont le concept est défini pour répondre aux objectifs de sûreté (chapitre 3) que sur l'analyse de sa robustesse face aux incertitudes (chapitre 6).

D'autre part, un deuxième objectif est de retirer des enseignements pour les étapes ultérieures du programme. Sur ce dernier point, il importe de souligner que les conclusions n'entendent pas préjuger des décisions qui pourront être prises à l'issue du débat parlementaire qui doit se dérouler en 2006. Elles dessinent des perspectives pour un futur programme de recherche, en identifiant quelques thématiques importantes pour la sûreté.

8.1 Les enseignements de l'analyse de sûreté

La faisabilité de principe du stockage semble acquise avec un degré de confiance raisonnable. En particulier, l'évaluation de sûreté montre que les objectifs de protection radiologique sont respectés. De plus, la sûreté du stockage repose sur un concept multi-fonctions, faisant intervenir de manière complémentaire le site, les dispositions de conception (aussi bien l'ajout de composants ouvragés que l'organisation générale du stockage, fractionné et disposé en cul-de-sac), et les colis primaires. Cela confère une bonne robustesse au stockage. Les situations d'évolution altérée qui ressortent de l'analyse sont peu nombreuses et relèvent d'un nombre limité de scénarios bien identifiés. Ceux-ci n'induisent pas un impact radiologique significativement supérieur à celui du scénario d'évolution normale.

8.1.1 La formation hôte

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

- à la fonction « s'opposer à la circulation d'eau », du fait de sa perméabilité réduite. Celle-ci conditionne non seulement la prédominance du régime diffusif en situation normale mais elle s'avère un paramètre essentiel en cas de situation altérée, telle qu'un défaut de scellements ou un forage. Elle permet en effet de limiter les apports en eau vers toute voie de circulation court-circuitant la roche, qu'il s'agisse des voies d'accès au stockage ou d'une voie créée par une intrusion humaine, ou d'une hétérogénéité non détectée. On notera en complément que la disposition du stockage proposée, en cul-de-sac topologique, contribue à mobiliser ces propriétés favorables ;
- à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », en imposant des conditions physico-chimiques favorables. La roche contribue à imposer un pH proche de la neutralité et de conditions réductrices qui sont propices à la maîtrise des relâchements, notamment pour les déchets vitrifiés. La solubilité de nombreux éléments y est réduite. Sa faible porosité contribue également à limiter les risques de transport colloïdal ;
- à la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » : les faibles vitesses de diffusion, ainsi que les capacités de sorption élevées des argilites, sont les principaux déterminants des performances de cette fonction. En effet, dans la mesure où les ouvrages d'accès au stockage ne constituent pas une voie de circulation privilégiée pour les radionucléides, la roche hôte contrôle la très grande majorité des flux. Elle permet de ralentir et d'atténuer totalement l'ensemble de l'inventaire en radionucléides, à la seule exception de quatre radionucléides en situation d'évolution normale.

Les propriétés de la roche sont désormais bien connues grâce à un important programme de caractérisation en forage et dans le laboratoire ; les principales grandeurs ne présentent pas plus d'un

facteur 10 d'incertitude. De plus, les conclusions de l'analyse de sûreté sont peu sensibles aux incertitudes résiduelles. La prise en compte, en scénario d'évolution altérée « défaut de scellements » de gradients plus forts que ceux mesurés, la prise en compte d'une perméabilité significativement plus forte en scénario d'évolution altérée « fonctionnement très dégradé », la création d'un court-circuit en scénario d'évolution altérée « forage », ne conduisent dans aucun cas à un impact inacceptable.

Toutes les dispositions ont été prises dans le dossier pour minimiser le rôle des formations encaissantes. Celles-ci n'ont pas de fonction de sûreté, et constituent uniquement des voies de transfert pour les radionucléides. Par ailleurs, les choix de modèles tendent systématiquement à minimiser l'importance des temps et des conditions de transfert dans ces formations : choix d'exutoires situés à proximité du site et en amont des exutoires naturels, adoption d'un modèle conduisant à « rabattre » la masse des radionucléides sortis du stockage vers l'exutoire. Malgré ces choix conservatifs, le calcul d'impact ne conduit pas à des doses significatives.

8.1.2 Les scellements et les barrières ouvragées

Le dossier 2001 avait identifié la problématique de la zone endommagée et du fonctionnement des scellements comme un sujet dont l'importance au regard de la sûreté devait faire l'objet d'un effort significatif en vue du dossier 2005. L'ensemble des travaux accomplis, et notamment la définition plus précise de la conception de ces ouvrages (mise en œuvre de coupures hydrauliques, définition plus précise des conditions de mise en place) donne aujourd'hui une bonne confiance dans la capacité à obtenir de ces composants les performances requises. L'évaluation de sûreté a été conduite de manière prudente, et n'a retenu que des performances réduites pour ces composants. Les perspectives issues des études d'ingénierie laissent envisager des propriétés bien meilleures.

L'évaluation du scénario d'évolution normale montre que les scellements reconstituent efficacement la continuité hydraulique du milieu, les ouvrages d'accès ne constituant pas des voies de transfert privilégiées. Dans des situations hypothétiques d'intrusion humaine, le fractionnement du stockage par des scellements contribue à empêcher que l'influence hydraulique du forage ne se propage.

Le défaut de scellements n'apparaît pas, pour autant, comme un événement très dommageable pour la sûreté du stockage. Les longueurs de galeries à parcourir, les faibles gradients, la faible quantité d'eau apportée par le milieu géologique, la disposition en cul-de-sac et le rôle de « barrière absorbante » rempli par la roche le long du trajet des radionucléides dans les ouvrages, contribuent tous ensemble à limiter l'impact d'une telle situation. Aussi importants que soient les dispositifs de scellements, il ne conditionnent pas à eux seuls la sûreté du stockage.

La barrière ouvragée a été retenue dans les concepts d'alvéoles de combustibles usés afin de couvrir les incertitudes sur les effets thermiques pendant des durées plurimillénaires. Elle n'apporte pas de bénéfice au regard des transferts de radionucléides, dans aucun des scénarios envisagés.

8.1.3 Les éléments de colisage

Les compléments de colisage de déchets B sont définis de manière à être aussi durables que possible, à la fois dans un objectif de réversibilité du stockage, mais également dans l'optique de favoriser la sûreté à long terme.

L'analyse les fait apparaître comme des dispositifs intéressants sur le plan qualitatif : la présence de transitoires hydrauliques sur les premiers millénaires après la fermeture du stockage rend plus complexe l'évaluation de la sûreté, et il pourrait s'avérer utile à terme de disposer d'une barrière garantissant que les radionucléides sont confinés pendant cette période. Les compléments de colisage apportent également une protection au plus près des déchets primaires, dans l'esprit des recommandations de la RFS III.2.f. Sur le plan quantitatif, en revanche, la durabilité des colis n'apporte pas de bénéfice visible, du fait des temps de transfert longs dans le milieu géologique.

Les conteneurs métalliques sont définis vis-à-vis de la phase thermique. Leur défaillance n'apparaît pas cruciale au regard de l'impact, car la formation hôte garde de bonnes propriétés même dans des

conditions dégradées. Cette appréciation repose cependant sur l'évaluation des propriétés de transfert dans les argilites en température, travail de recherche qui nécessite d'être poursuivi. Le conteneur reste par conséquent une mesure prudente face aux incertitudes.

Le conteneur permet également, dans le cas des déchets vitrifiés, de limiter significativement les relâchements, qui sont moins rapides en conditions de température modérées. Cet effet est suffisamment important pour être « visible » à l'échelle des durées caractéristiques du calcul de sûreté.

8.1.4 Les déchets primaires

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

Pour les déchets B, seuls les déchets métalliques présentent une durée de vie suffisante pour que leur performance puisse intervenir dans le calcul. Pour les autres déchets, dans l'état actuel des connaissances, la marge est plus qualitative. Dans la situation la plus pessimiste, des déchets intégralement labiles n'induiraient cependant pas un impact beaucoup plus élevé qu'en situation normale.

Pour les déchets vitrifiés, les durées de vie issues des modèles (quelques centaines de milliers d'années) sont d'un ordre de grandeur équivalent aux temps de transfert dans la barrière géologique. Ces matrices remplissent donc une fonction complémentaire du milieu géologique. Ce constat valide l'intérêt de prendre des mesures pour favoriser un relâchement lent par les verres (garantir un régime diffusif dans les alvéoles, éloigner les sources de perturbation du pH).

Pour les combustibles usés, les modèles retenus dans le calcul de performance (retenant la dissolution radiolytique et majorant les effets de la diffusion accélérée par auto-irradiation alpha - D3AI) conduisent à des relâchements plus importants que pour les autres types de déchets, et de ce fait à un impact supérieur d'un ordre de grandeur, bien que toujours dans les limites des contraintes de radioprotection.

8.2 Les pistes de progrès possibles

La poursuite de la caractérisation du milieu géologique pourrait permettre de préciser le modèle conceptuel à l'échelle de la zone de transposition, selon les directions qui ont déjà été évoquées en conclusion du chapitre 6. En particulier, des investigations complémentaires permettraient d'établir de manière plus détaillée les directions d'écoulements dans le Dogger, de préciser le rôle des failles régionales et de leur environnement dans le modèle hydrogéologique. Ceci permettrait de revoir les conditions de calcul de l'impact du stockage et certains choix conservatifs, notamment les exutoires retenus à ce jour en amont de la « zone de fracturation diffuse ».

Le dossier 2005 marque par ailleurs un progrès par rapport aux dossiers précédents de l'Andra, en envisageant pour la première fois de manière explicite l'influence des changements climatiques sur le modèle hydrogéologique et sur la biosphère. Les résultats obtenus se sont traduits par deux variantes du modèle de calcul, représentant les écoulements sur le site dans les conditions actuelles et dans celles anticipées d'ici un million d'années, pour offrir un encadrement de situations possibles. Une biosphère tempérée a par ailleurs été retenue pour le calcul, après qu'on s'est assuré qu'une biosphère correspondant à un climat froid ne risquait pas de conduire à des doses supérieures. Une appréciation plus fine de l'enchaînement des climats pourrait permettre de préciser ces évaluations. Il convient toutefois de souligner que tout effort dans ce domaine doit être mis en regard des incertitudes qui pèsent sur l'évolution de l'environnement de surface, qui incitent à retenir des approches très robustes et en partie stylisées.

Une étude plus détaillée des propriétés que présentent les horizons au mur de l'Oxfordien, et notamment C3a, ainsi qu'éventuellement le Kimméridgien, pourrait conduire à leur attribuer des propriétés de rétention qui offriraient une marge supplémentaire, et permettrait si cela s'avérait pertinent de leur attribuer une fonction de sûreté complétant les performances du seul Callovo-Oxfordien.

La caractérisation des propriétés de transport de la zone endommagée, immédiatement après creusement, puis leur évolution sous l'effet des contraintes mécaniques, voire thermomécaniques dans les alvéoles concernées, demeure un sujet important pour lequel le laboratoire souterrain a déjà commencé, et continuera, à apporter des informations importantes. L'évaluation de l'EDZ est aujourd'hui effectuée par modélisation ; les données acquises au fur et à mesure des expérimentations permettront de préciser le comportement mécanique de la roche dans un objectif d'optimisation des concepts.

La modélisation des phases transitoires nécessite également de poursuivre les travaux sur la représentation des phénomènes couplés. Le dossier 2005 a déjà pu tirer parti de calculs couplés transport-chimie qui ont permis de préciser l'extension des phénomènes. La compréhension détaillée des phases de vie les plus précoces du stockage passe par une poursuite des travaux de modélisation sur les couplages, incluant ceux induits par la thermique (comportement thermomécanique de l'EDZ, poursuite des travaux sur le couplage thermique-transport). La représentation des couplages dus aux transitoires hydrauliques permettra également d'affiner la maîtrise et la compréhension des premiers siècles d'évolution du stockage.

La poursuite des études sur les conditions dans lesquelles se déroule la corrosion au sein du stockage permettra de préciser les vitesses applicables, et très probablement de revoir à la baisse les évaluations de montée en pression des gaz de corrosion, et à travers elle leur influence sur le transitoire hydraulique. Par ailleurs, l'étude des différentes voies de migration de l'hydrogène permettra de préciser le schéma d'évolution globale.

Enfin, on notera que l'analyse qualitative de sûreté a permis de dresser une première liste de processus dont le déroulement, pendant la phase d'exploitation, pourrait contraindre la durée de celle-ci. Aucun n'est apparu à ce stade déterminant, au sens où il conduirait à contraindre drastiquement la durée des phases de réversibilité afin de préserver l'évolution à long terme du stockage. La démarche de conception adoptée par l'Andra, privilégiant un traitement conjoint et homogène des questions de

sûreté et de réversibilité, conduit ainsi à des architectures dans lesquelles ces deux notions n'apparaissent pas comme concurrentes l'une de l'autre.

Du point de vue des modèles de relâchement, on a déjà eu l'occasion d'évoquer le comportement du combustible usé. S'il est décidé de continuer à investiguer la possibilité de gérer en stockage tout ou partie des combustibles usés du parc REP, la poursuite des efforts pour caractériser mieux le comportement à long terme, et profiter des bénéfices importants qu'apporterait un relâchement dominé par la dissolution classique et non par la dissolution radiolytique, s'impose. Les gains attendus sont mis en évidence par les analyses du chapitre 5 : les combustibles usés pourraient avoir un niveau de relâchement comparable à celui des autres types de déchets.

Pour les déchets vitrifiés, le passage d'un modèle de dissolution uniquement piloté par la vitesse initiale vers un modèle de type « $V_0.S \rightarrow V_r$ » apporte un gain appréciable et quantifiable en termes de réduction et de décalage dans le temps de l'impact. La compréhension plus fine des mécanismes sous-jacents, ainsi que l'extension éventuelle du domaine de validité de ce modèle à un plus grand nombre de types de déchets ou à des conditions physico-chimiques plus larges, apporteraient une plus grande robustesse à l'analyse de sûreté.

8.3 Conclusion générale

Les évaluations de sûreté ne constituent pas un domaine autonome de l'étude de faisabilité du stockage. Elles forment un ensemble indissociable avec les études d'ingénierie et la recherche sur l'évolution phénoménologique du stockage. Chacun de ces trois domaines fait l'objet d'un tome distinct au sein du dossier 2005. La structure documentaire, conduisant nécessairement à un découpage par discipline, ne doit pas pour autant masquer les liens étroits qui unissent ces trois modes d'approche. On a vu notamment que certains passages du présent document étaient communs avec le tome « architecture et gestion du stockage géologique » ou avec le tome « évolution phénoménologique du stockage géologique ». D'autres reprennent les mêmes informations en les présentant dans une perspective différente. L'appréciation de la sûreté du stockage se nourrit de ces trois sources.

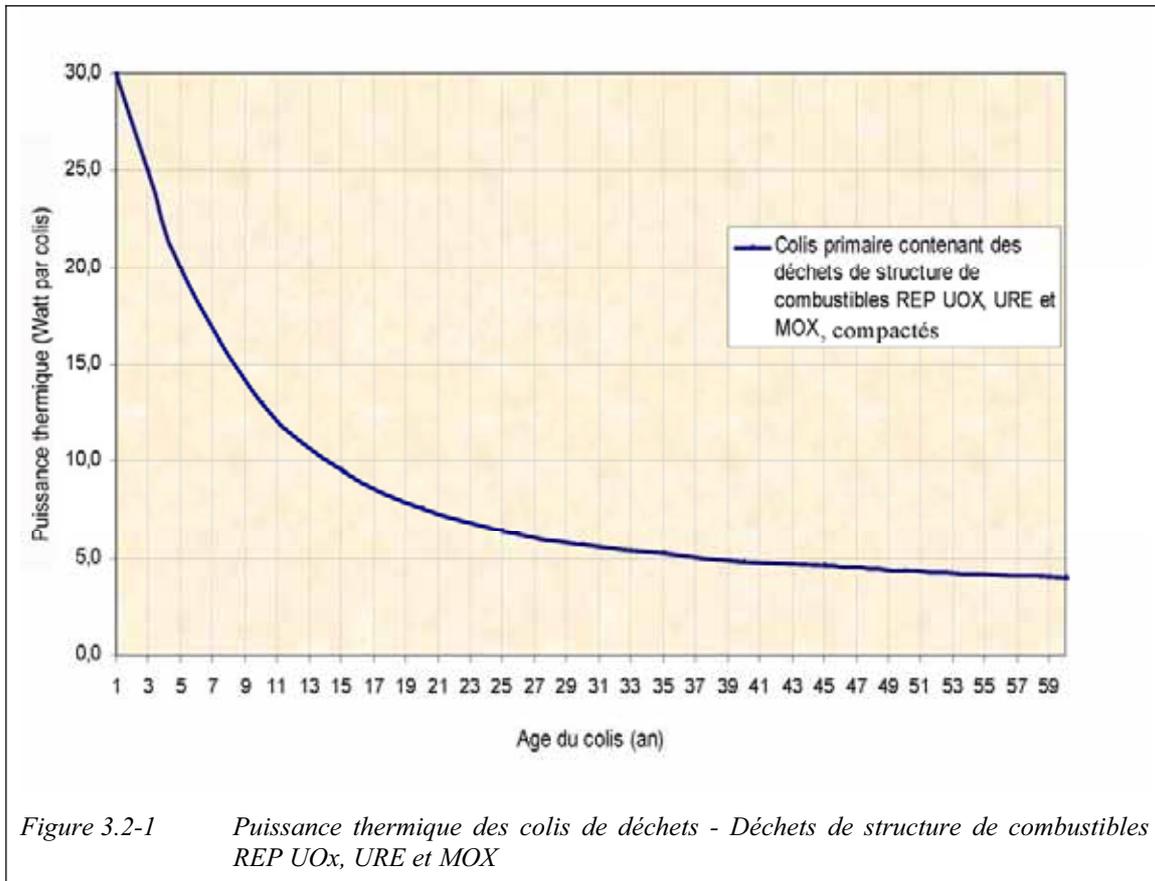
Pour autant, on a veillé à faire du tome « évaluation de sûreté » un ensemble cohérent et pouvant être lu seul, présentant le déroulement de la démarche de sûreté qui a guidé les études d'ingénierie, le programme de recherche, les évaluations de performances et la gestion des incertitudes. Cette démarche permet de conclure une première étape, celle de la faisabilité de principe du stockage. L'impact du stockage apparaît en effet maîtrisé et conforme aux objectifs malgré des conditions d'évaluation prudentes. Il est robuste face aux incertitudes.

Les enseignements des analyses qualitatives et des calculs de sûreté permettent également d'esquisser les grandes lignes d'un futur programme de recherche destiné à préciser les architectures et réduire les incertitudes qui subsistent, s'il devait être décidé de donner suite aux travaux sur le stockage profond. Les conclusions du présent tome, ainsi que celles de l'ensemble des autres travaux présentés dans le dossier 2005, constituent un socle de connaissances solide sur lequel peut se fonder un programme de recherche et d'études d'ingénierie postérieur à 2005, dans le cadre de la même démarche itérative qui a conduit à la production de ce dossier.

Annexe de présentation des courbes

Pour faciliter la lecture des résultats, certaines courbes ont été présentées dans le corps du présent tome sous forme de petites vignettes permettant de ne pas interrompre trop fréquemment le texte.

Cette annexe reprend chacune de ces petites vignettes dans un format plus grand afin que le lecteur puisse, s'il le souhaite, étudier plus en détail telle ou telle courbe.



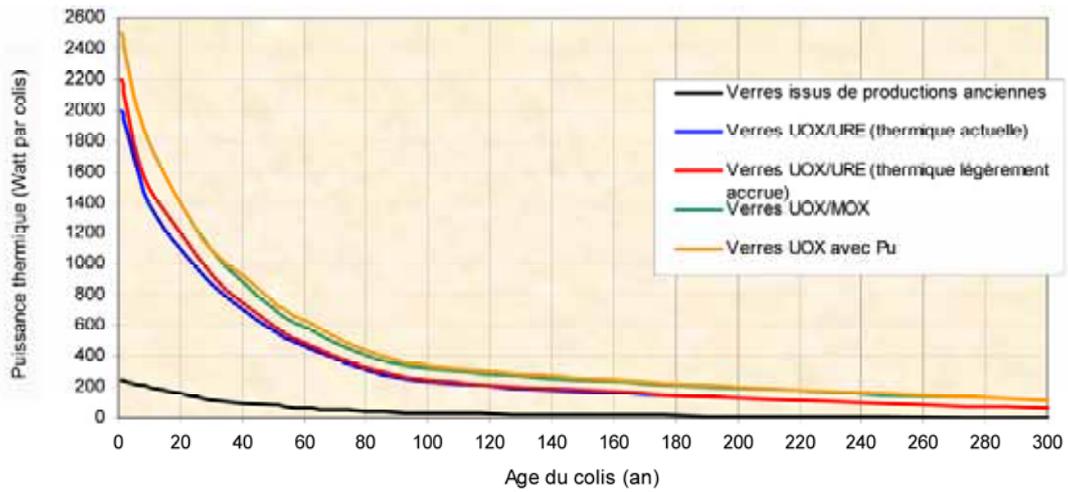


Figure 3.2-1 Puissance thermique des colis de déchets – Déchets vitrifiés

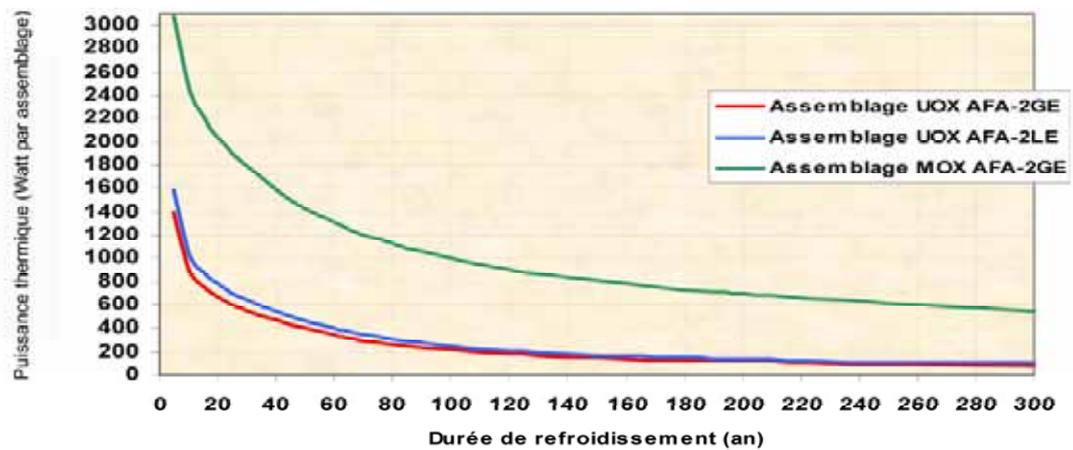


Figure 3.2-1 Puissance thermique des colis de déchets – Assemblages combustibles UOx et MOX

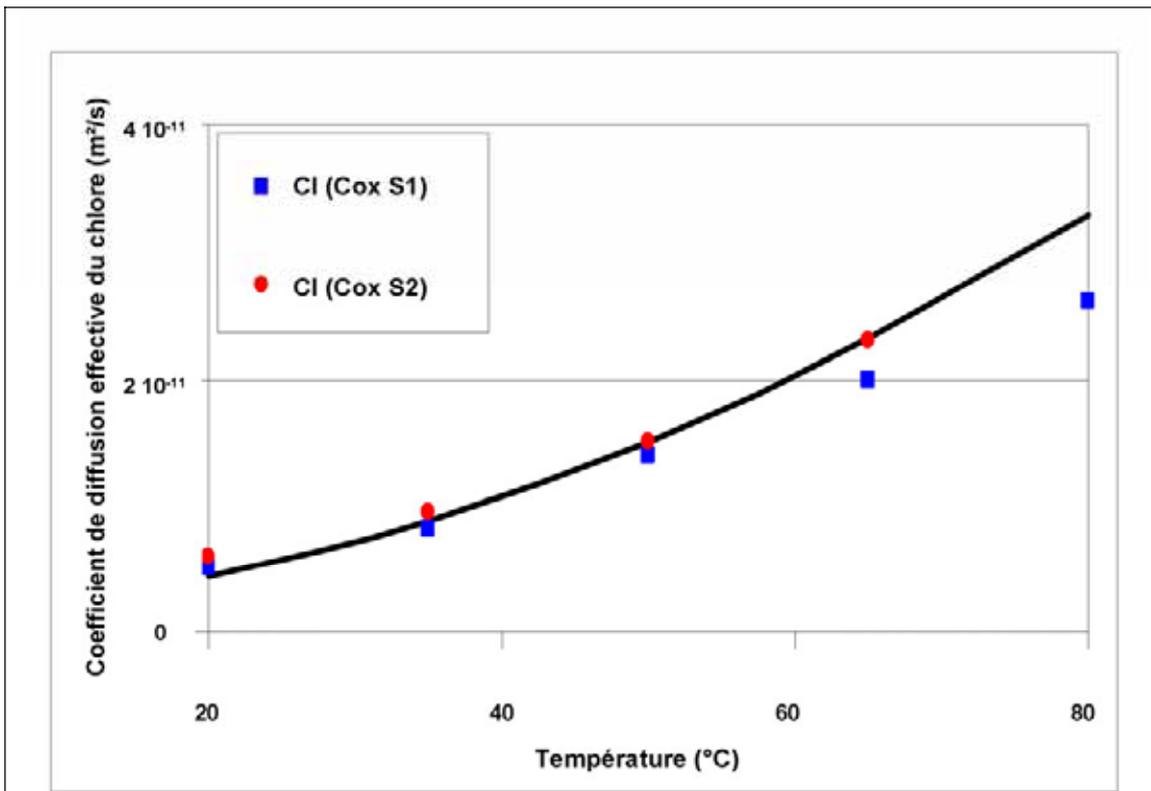


Figure 3.7-13 Résultats expérimentaux d'évolution du coefficient de diffusion effective pour le chlorure en fonction de la température pour deux échantillons d'argilite (COx S1, COx S2)

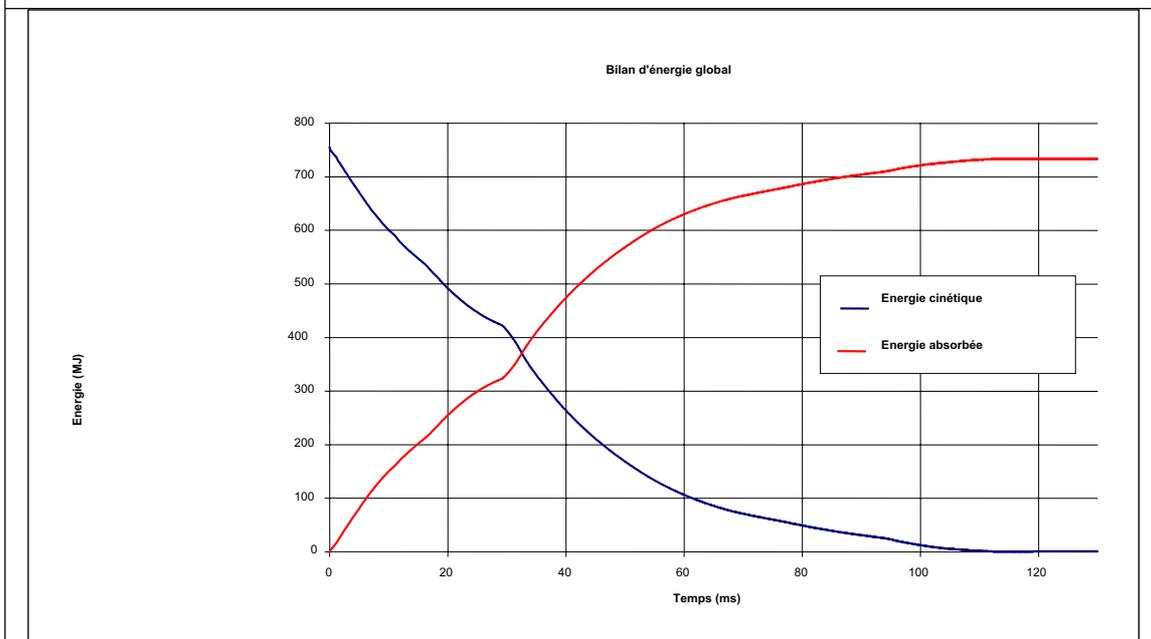


Figure 4.7-2 Bilan énergétique d'une chute en puits d'une cage transportant une hotte avec déchets C

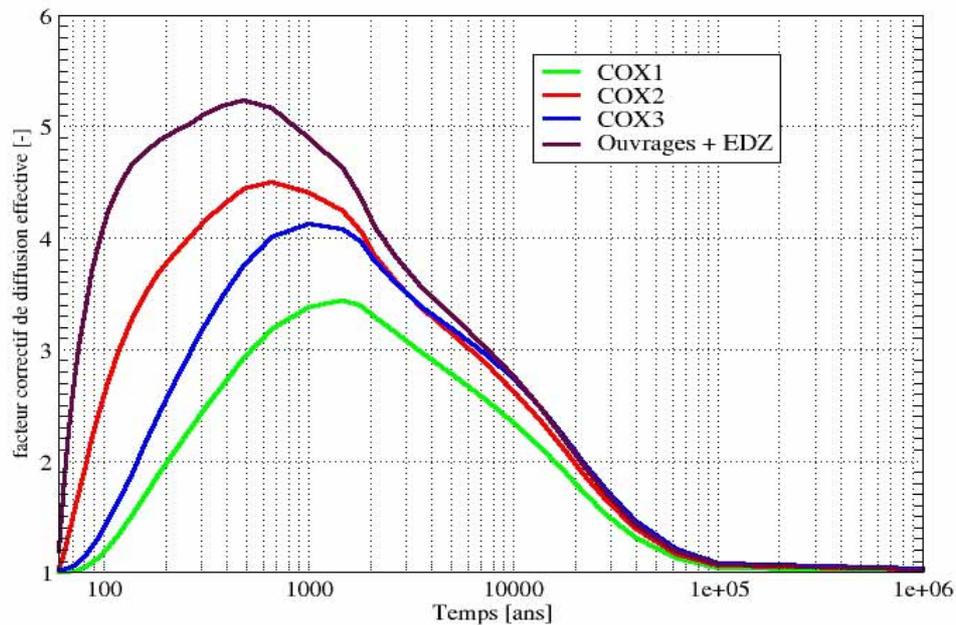


Figure 5.3-12 Facteur correctif appliqué au coefficient de diffusion effective à 20 °C pour la prise en compte de la température – combustibles usés CU1 (COX = Callovo-Oxfordien)

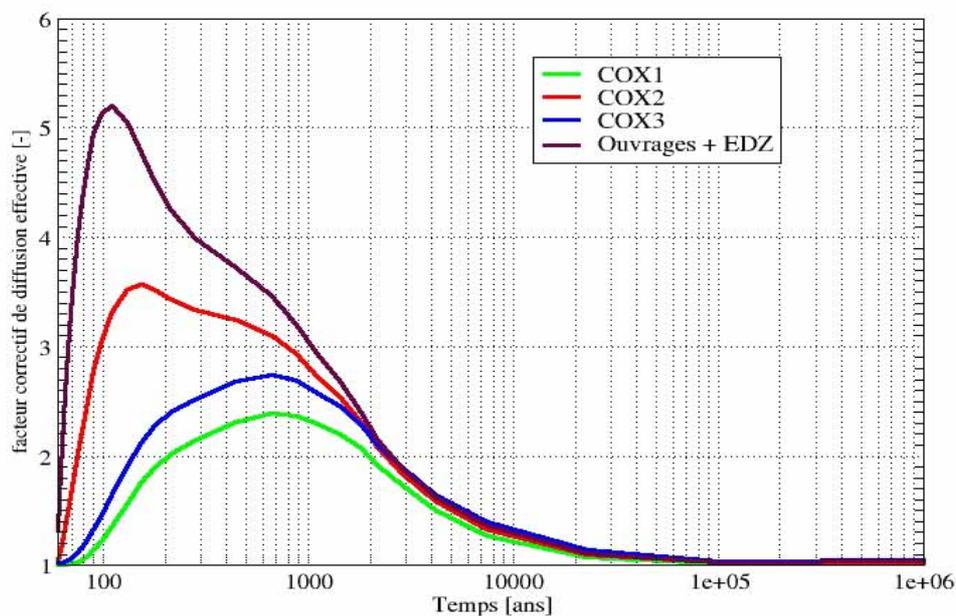


Figure 5.3-13 Facteur correctif appliqué au coefficient de diffusion effective à 20 °C pour la prise en compte de la température – combustibles usés CU2 et déchets C vitrifiés – Colis types C1 + C2

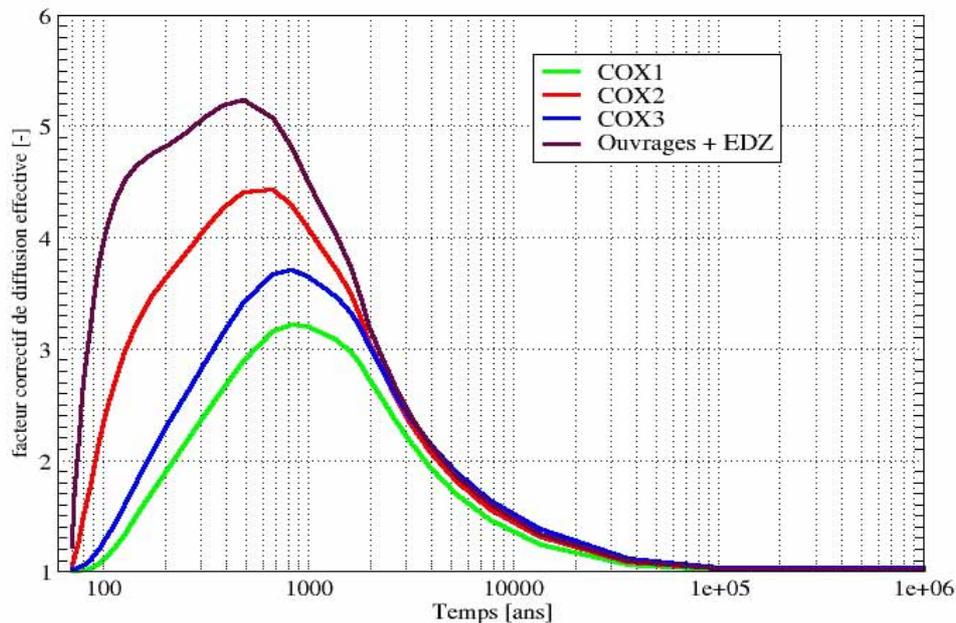


Figure 5.3-13 Facteur correctif appliqué au coefficient de diffusion effective à 20 °C pour la prise en compte de la température – combustibles usés CU2 et déchets C vitrifiés - Colis types C3 + C4

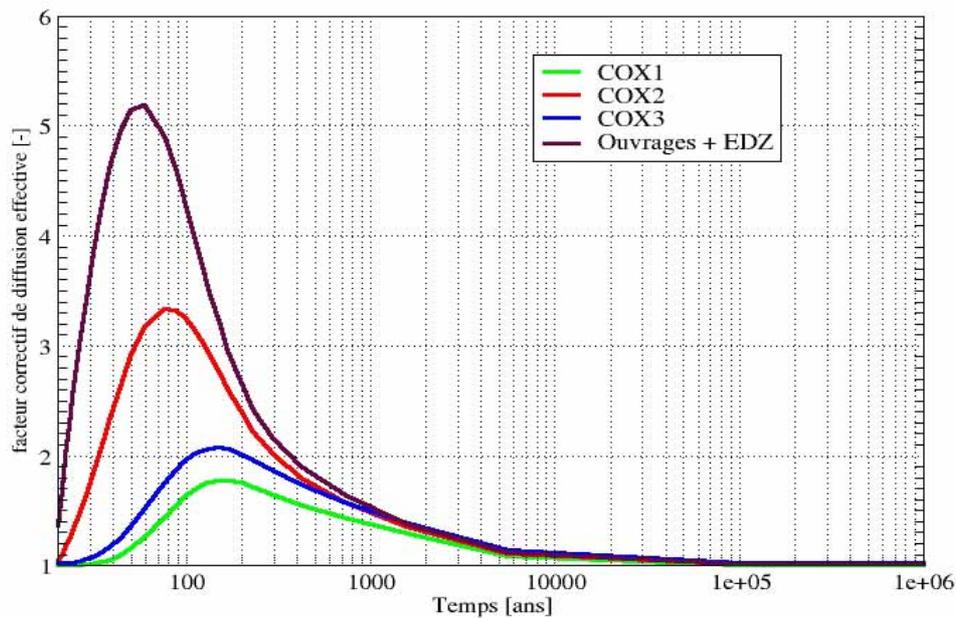


Figure 5.3-13 Facteur correctif appliqué au coefficient de diffusion effective à 20 °C pour la prise en compte de la température – combustibles usés CU2 et déchets C vitrifiés - Colis type C0

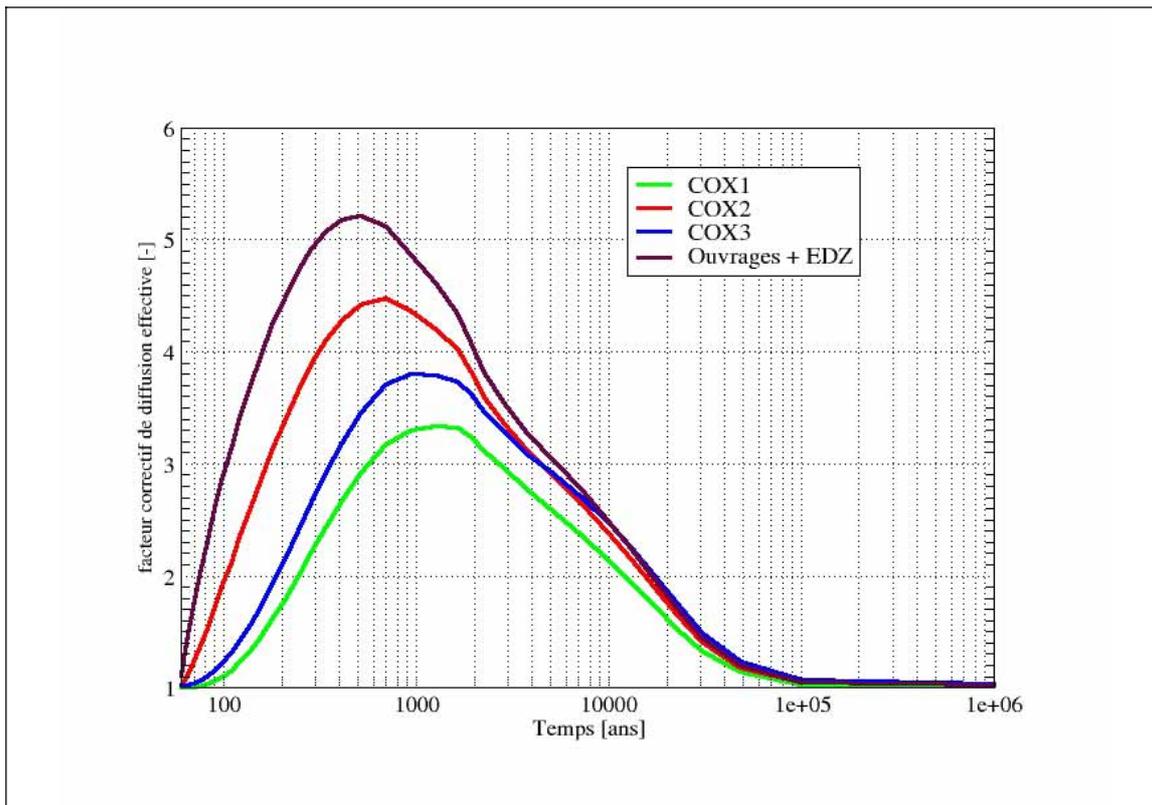


Figure 5.3-13 Facteur correctif appliqué au coefficient de diffusion effective à 20 °C pour la prise en compte de la température – combustibles usés CU2 et déchets C vitrifiés - Colis type CU2

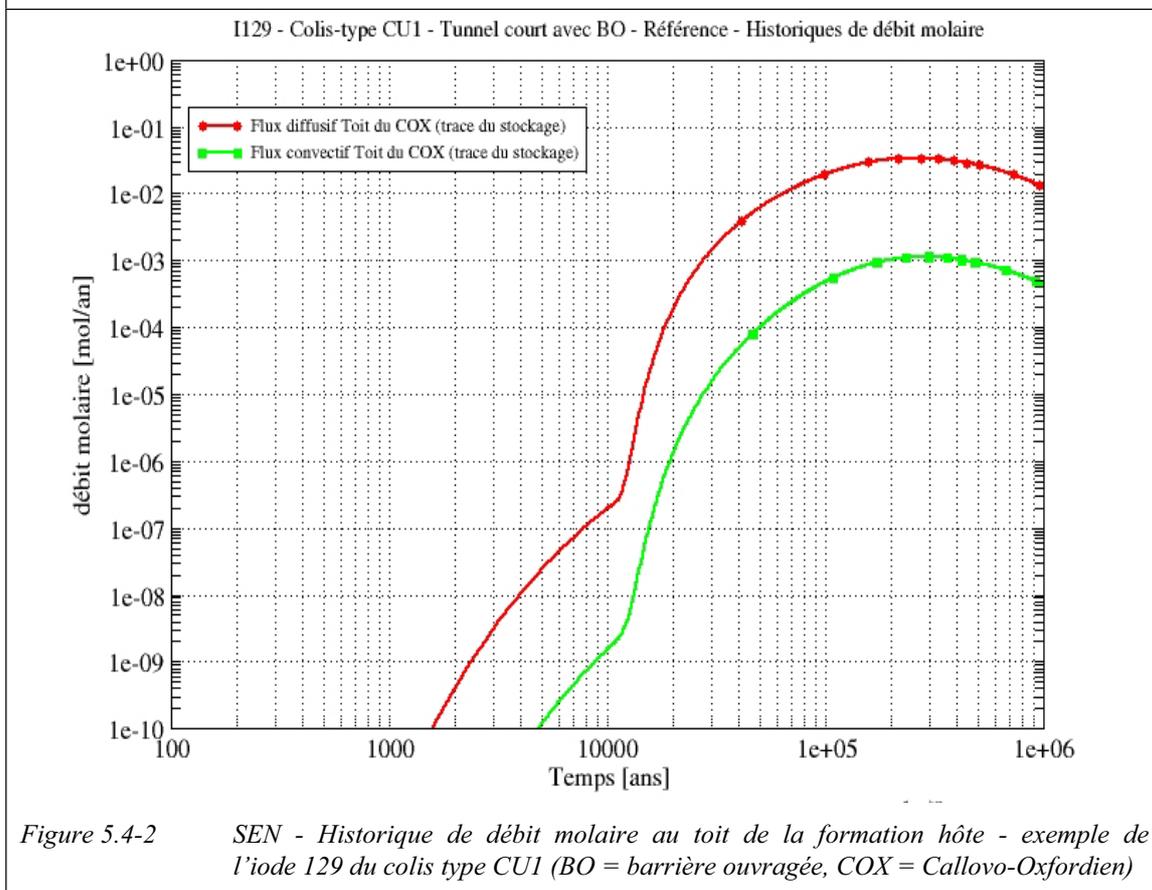


Figure 5.4-2 SEN - Historique de débit molaire au toit de la formation hôte - exemple de l'iode 129 du colis type CU1 (BO = barrière ouvragée, COX = Callovo-Oxfordien)

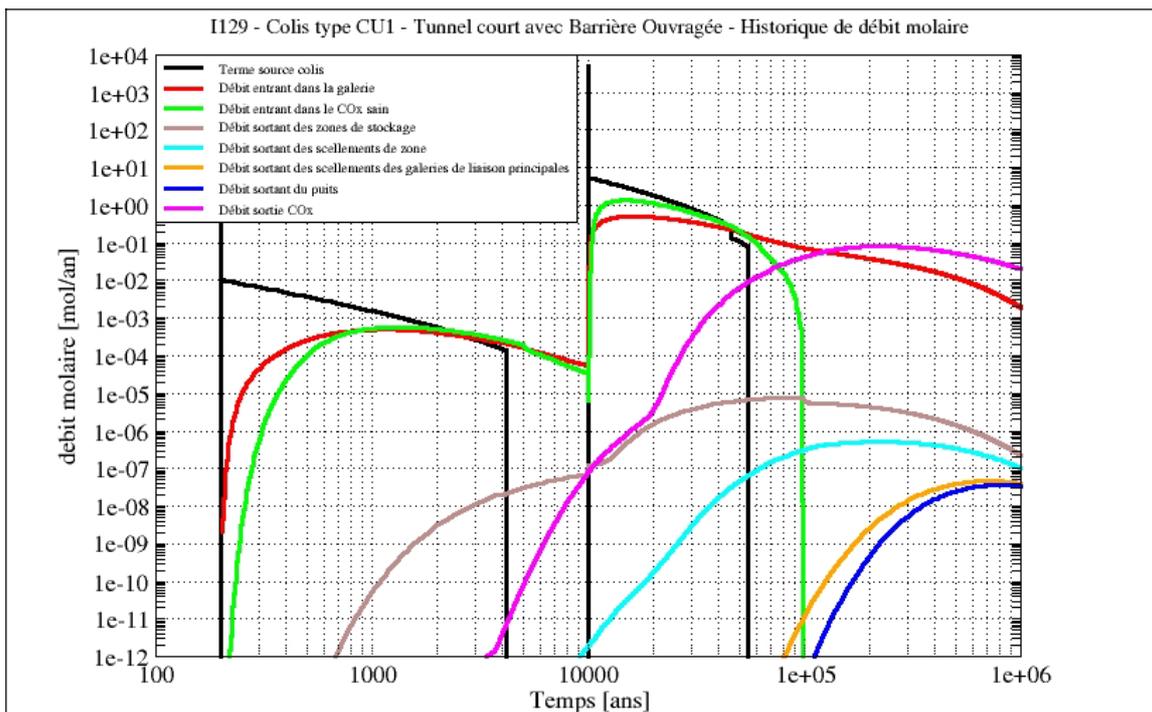


Figure 5.4-5 SEN - Evolution des débits molaire à travers le stockage - ^{129}I - CUI (Cox = Callovo-Oxfordien)

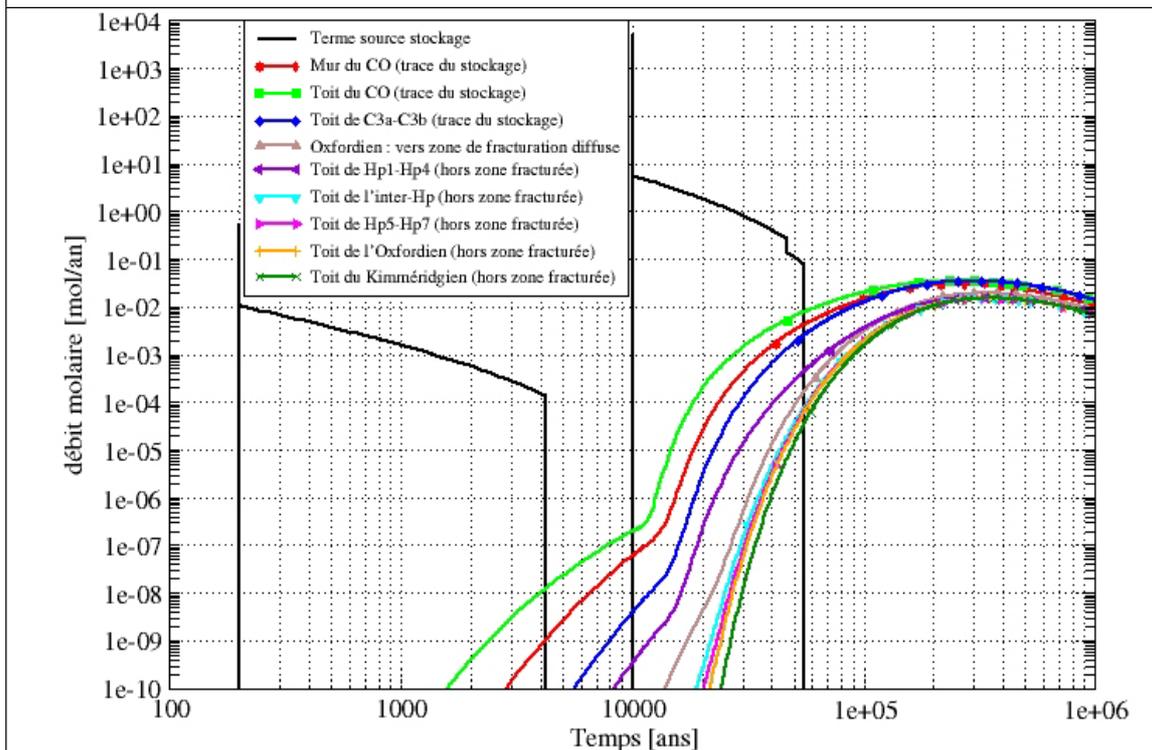


Figure 5.4-11 SEN - Colis type CUI - Historiques de débit molaire à travers différentes surfaces du milieu géologique et quantification de l'atténuation des différentes formations pour le modèle à 1 million d'années - Iode 129

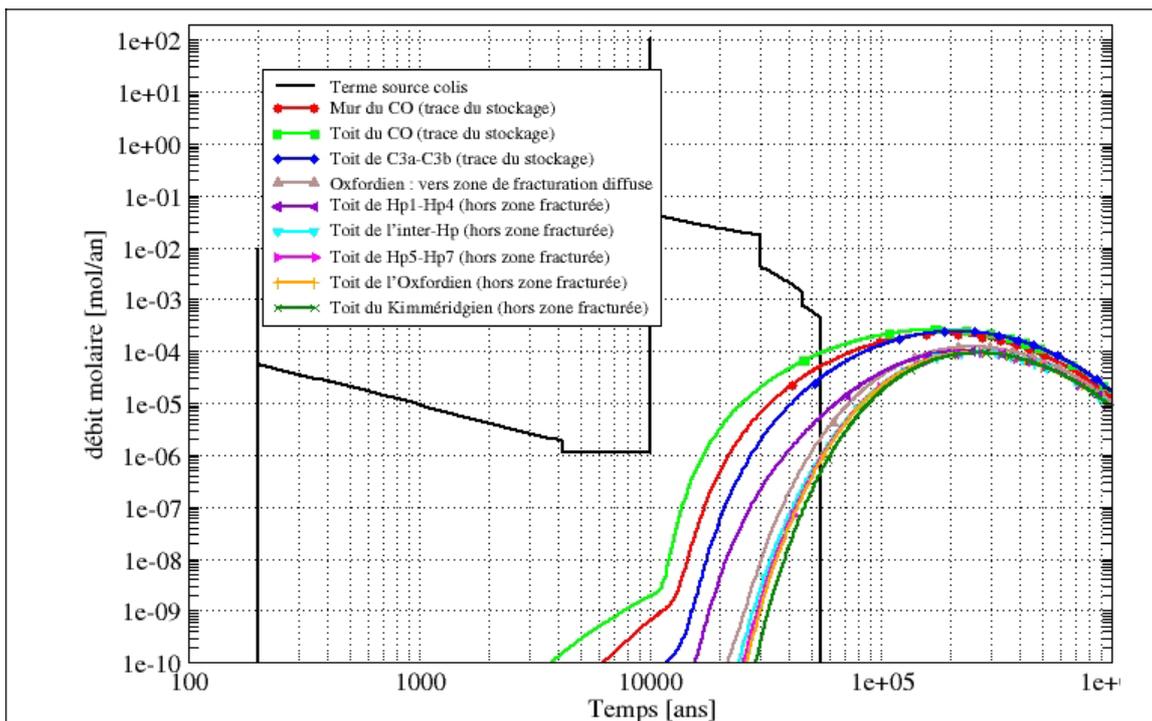


Figure 5.4-11 SEN - Colis type CUI - Historiques de débit molaire à travers différentes surfaces du milieu géologique et quantification de l'atténuation des différentes formations pour le modèle à 1 million d'années - Chlore 36

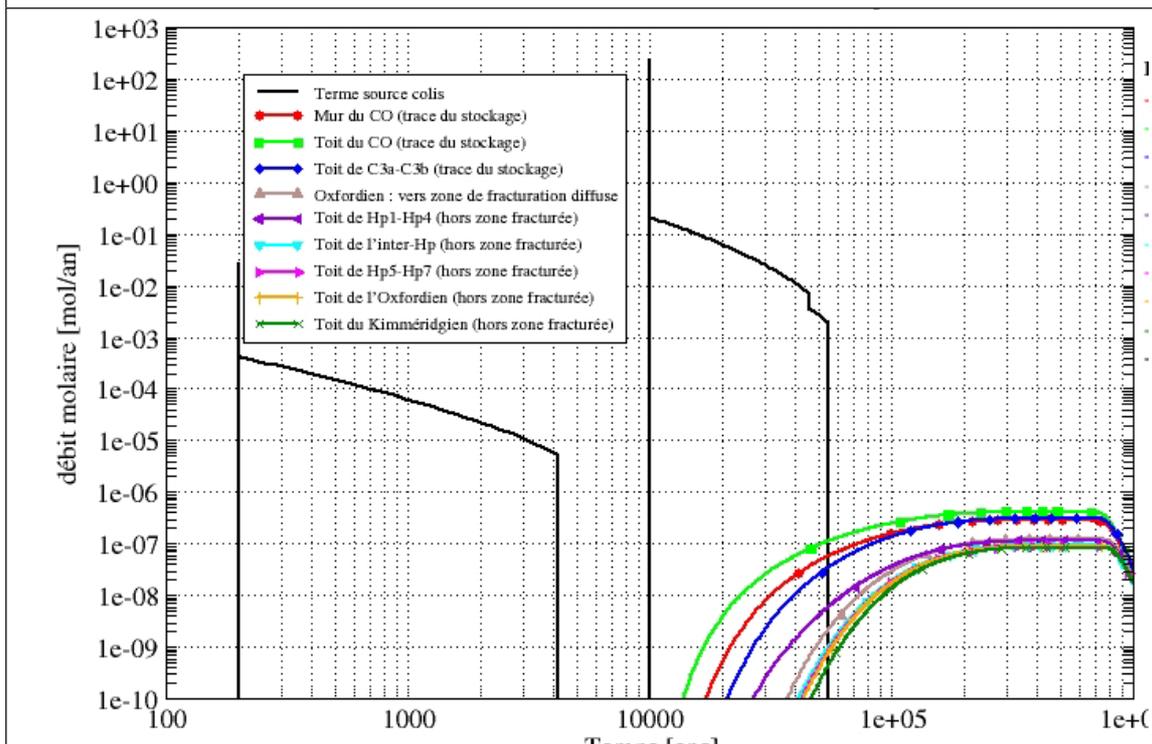


Figure 5.4-11 SEN - Colis type CUI - Historiques de débit molaire à travers différentes surfaces du milieu géologique et quantification de l'atténuation des différentes formations pour le modèle à 1 million d'années [Sélénium 79]

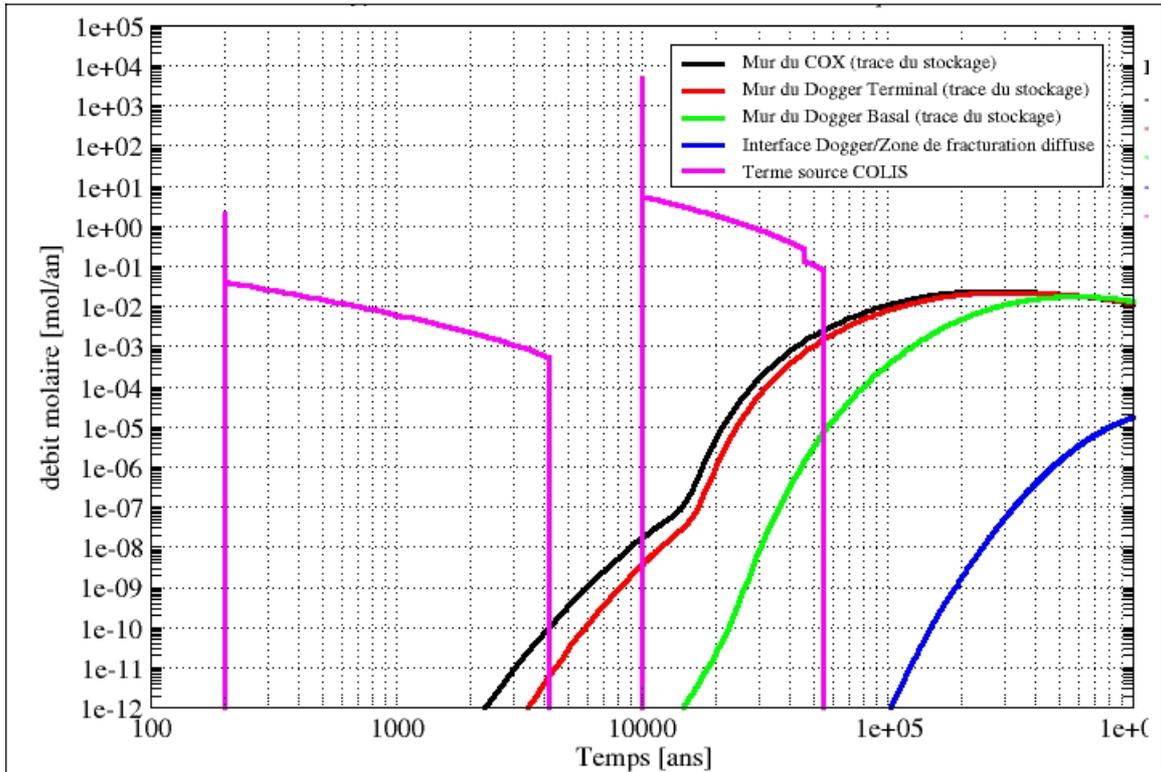


Figure 5.4-12 SEN - Panaches de concentration dans ^{les} différents horizons du Dogger (coupe verticale) à différentes dates et historiques de débit molaire à travers les différentes surfaces ^{129I} - modèle Dogger- colis- type CU1

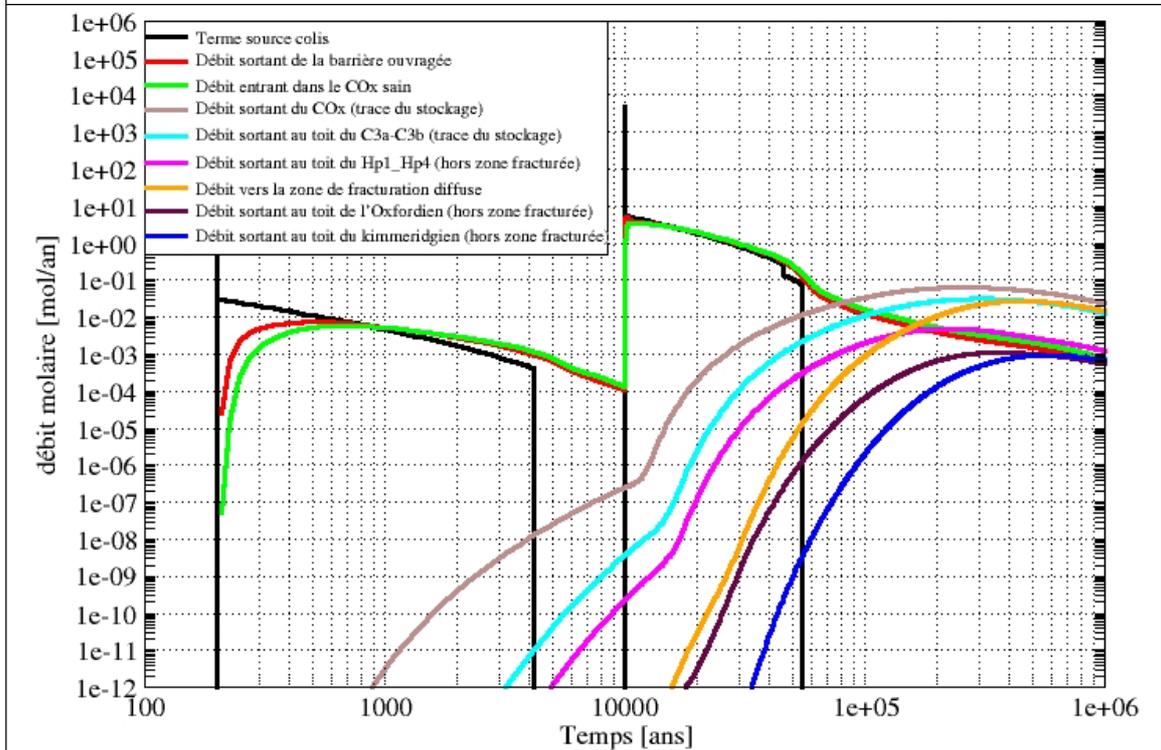


Figure 5.4-14 SEN - Colis type CU1 - ^{129I} - historique de débit molaire dans les deux configurations du modèle hydrogéologique [Modèle actuel]

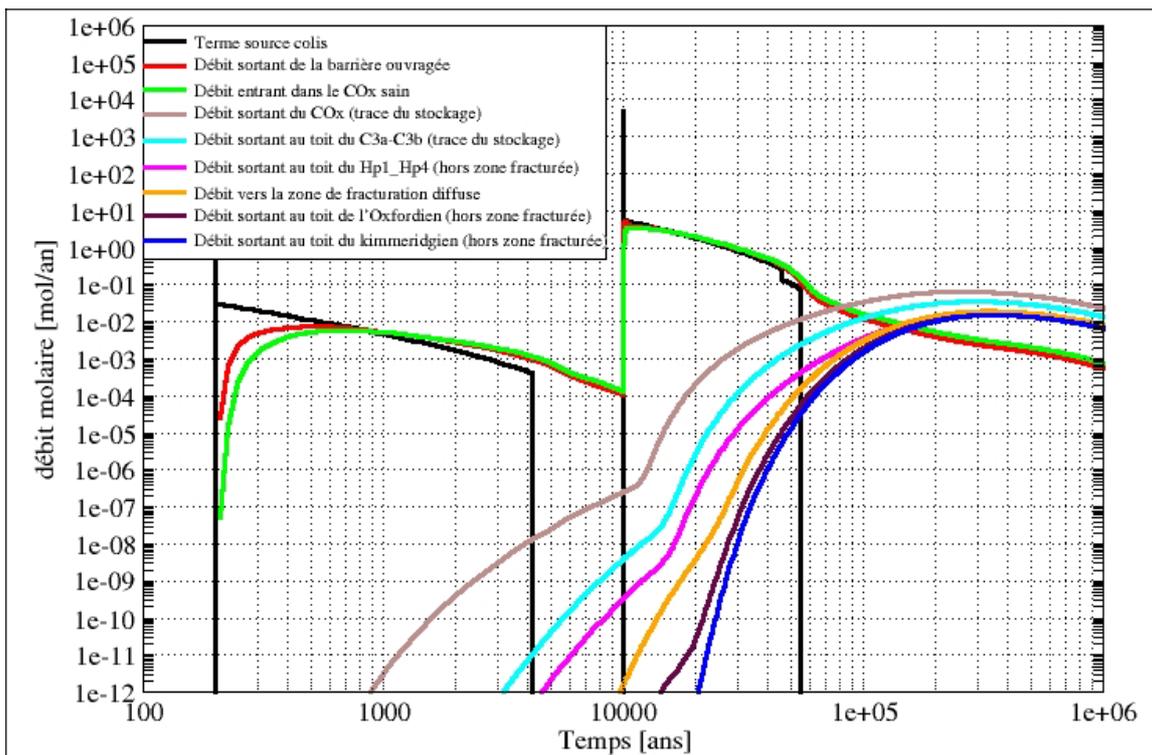


Figure 5.4-14 SEN - Colis type CU1 - ¹²⁹I - historique de débit molaire dans les deux configurations du modèle hydrogéologique [Modèle à un million d'années]

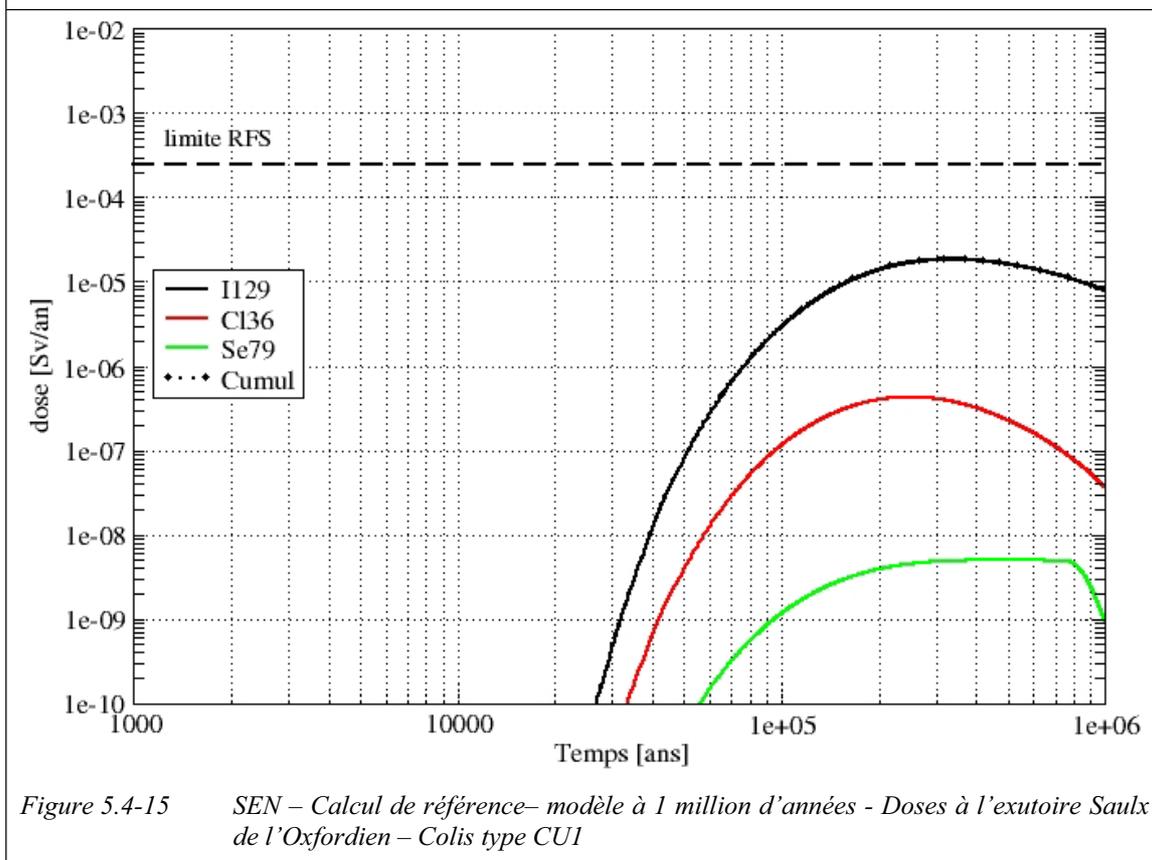


Figure 5.4-15 SEN - Calcul de référence- modèle à 1 million d'années - Doses à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis type CU1

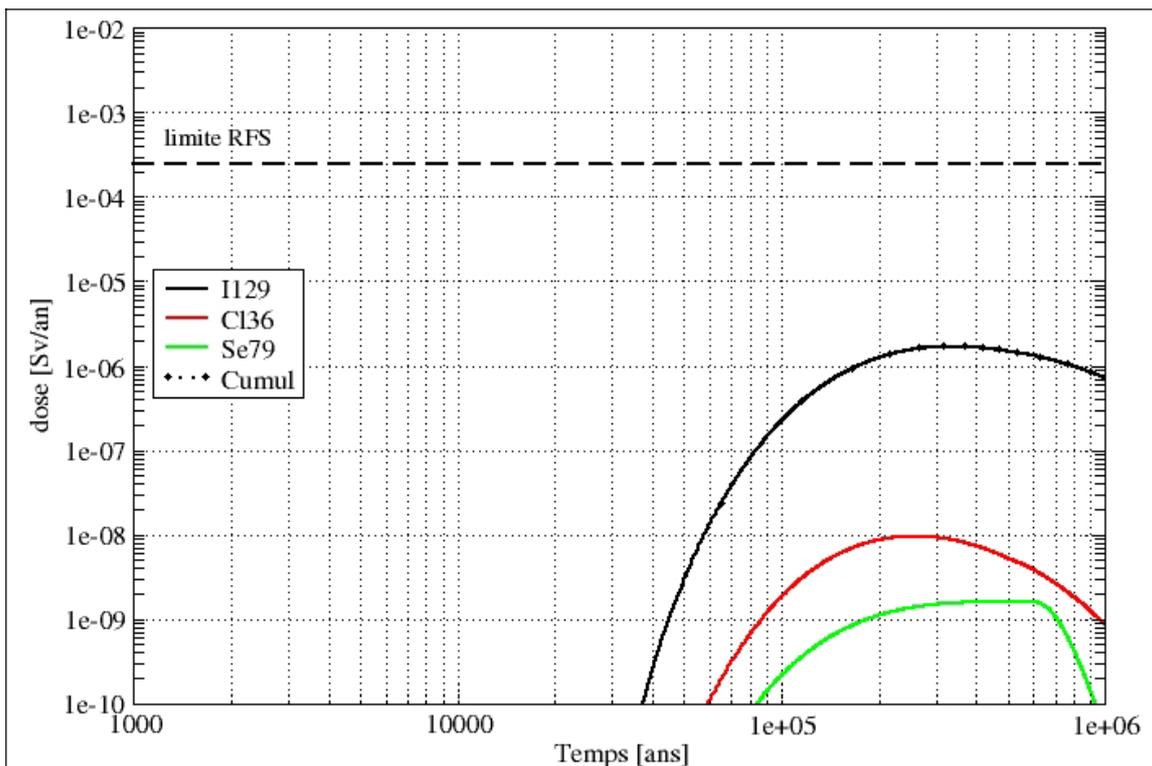


Figure 5.4-16 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – Colis type CU2

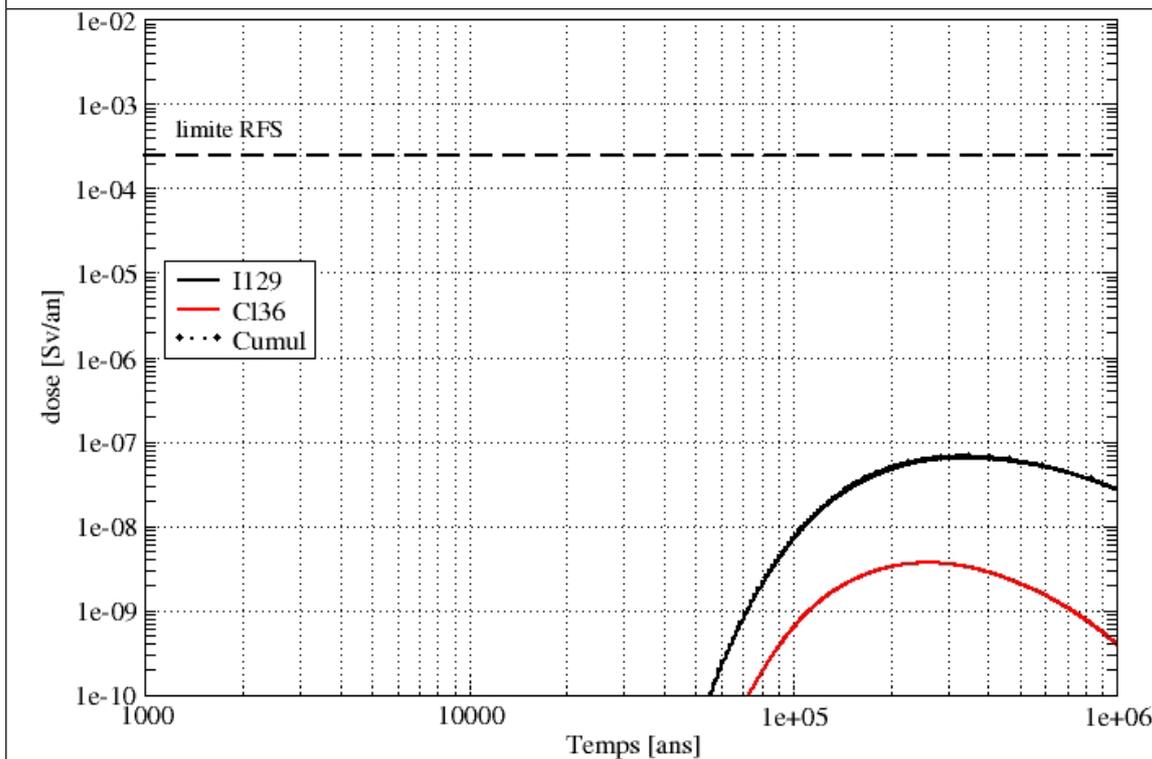


Figure 5.4-17 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – colis type CU3

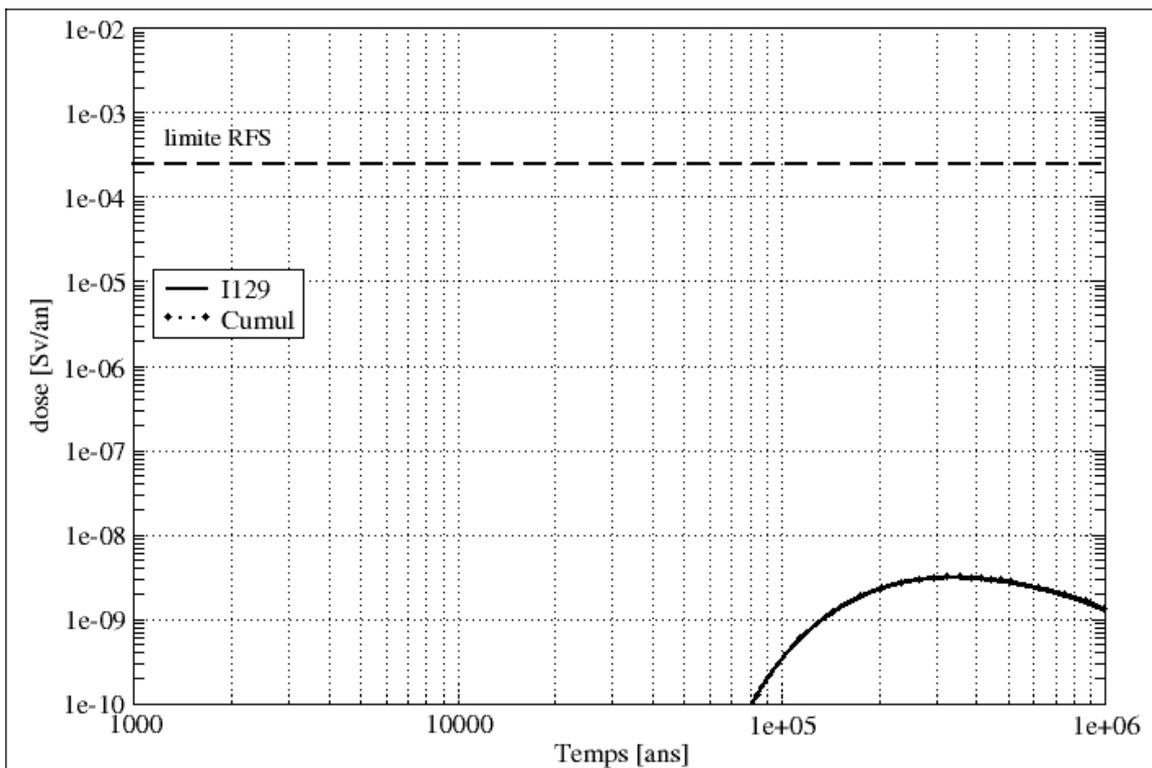


Figure 5.4-18 SEN –modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - colis types C0

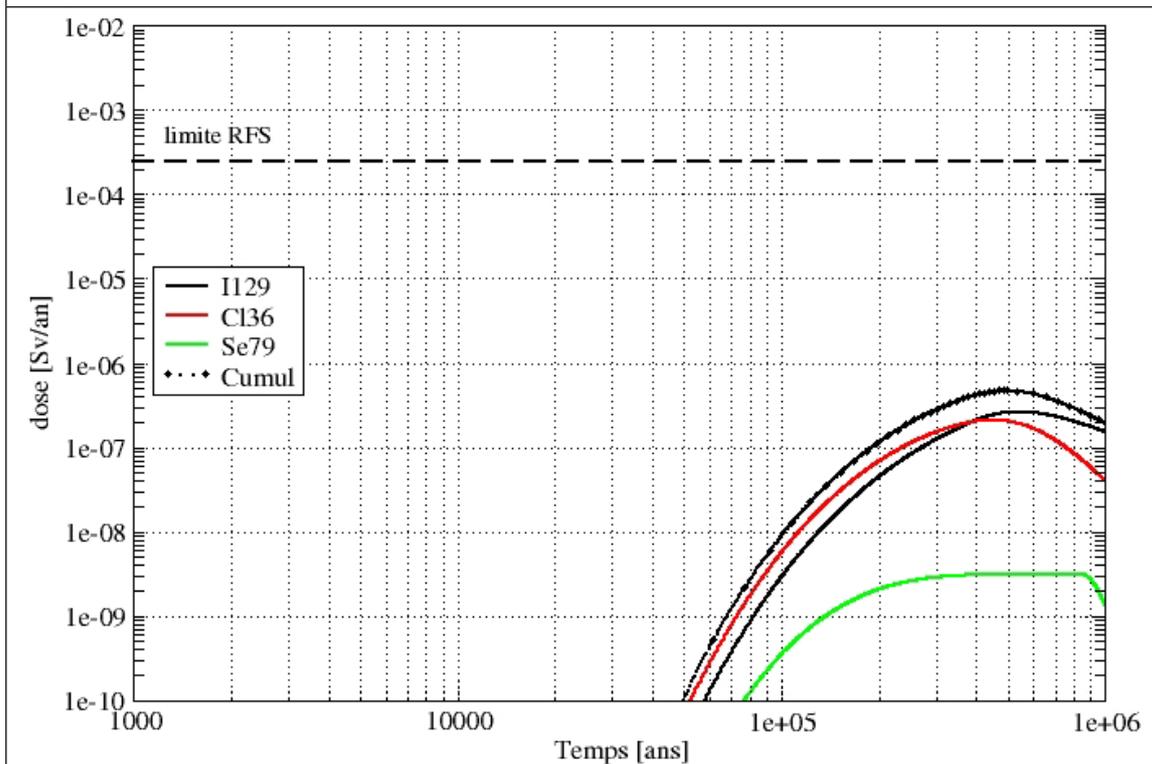


Figure 5.4-19 SEN –modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - colis types (C1+C2)

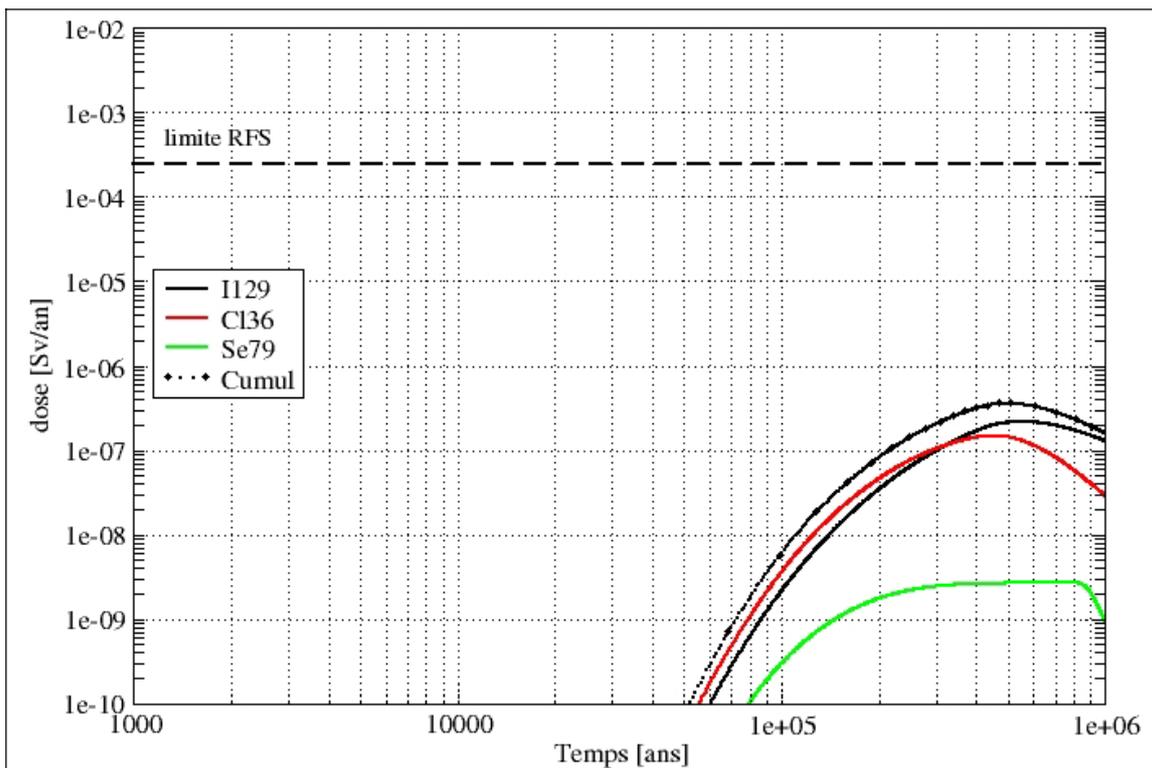


Figure 5.4-20 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - colis types (C3+C4)

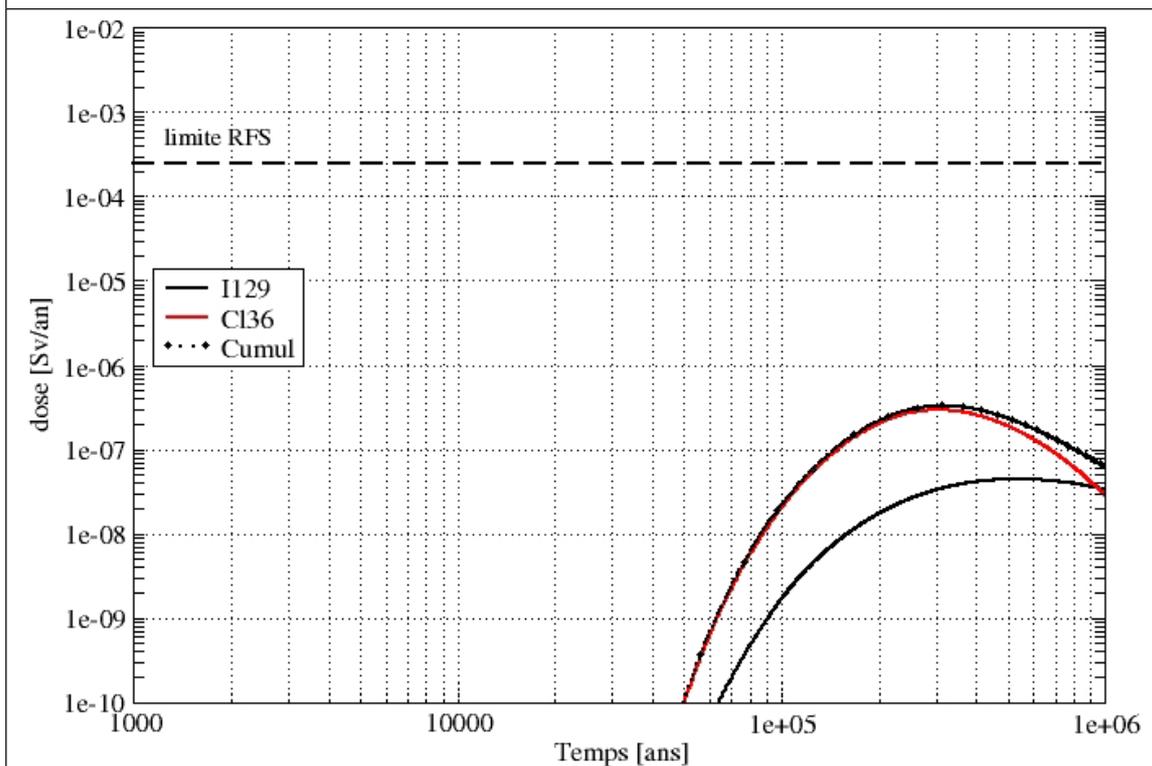


Figure 5.4-21 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - colis types (B1x)

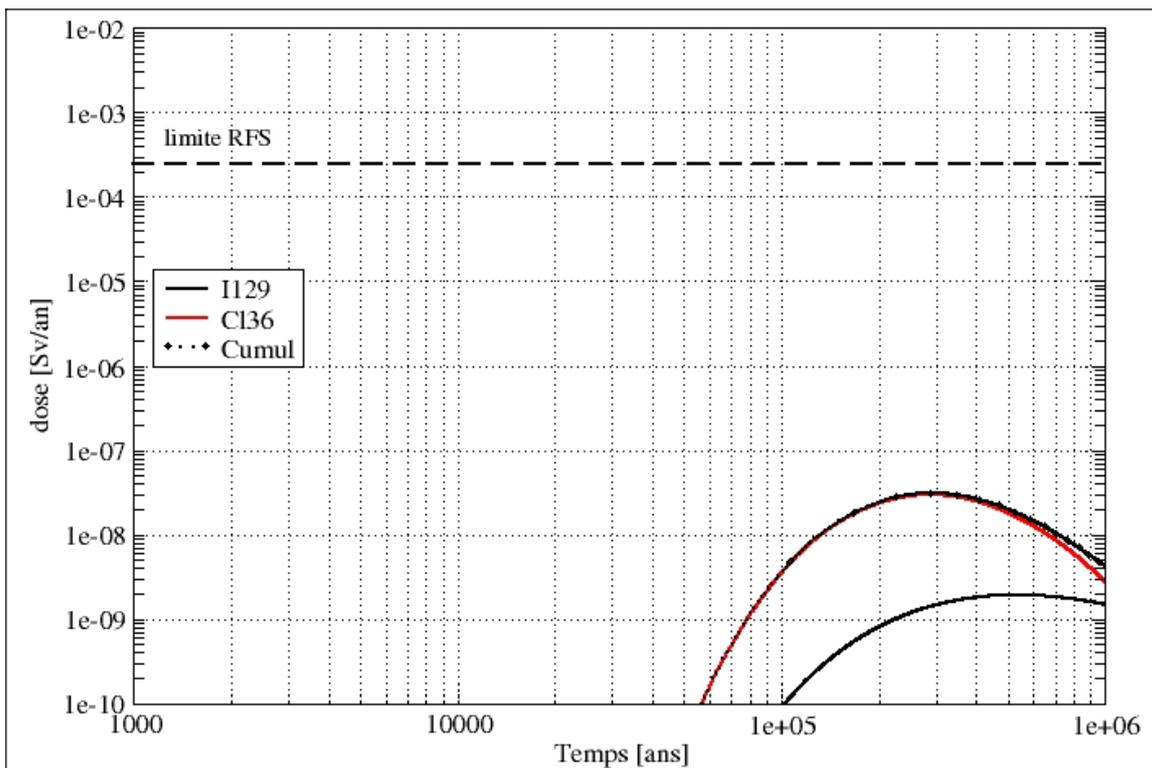


Figure 5.4-22 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien – colis types (B1h)

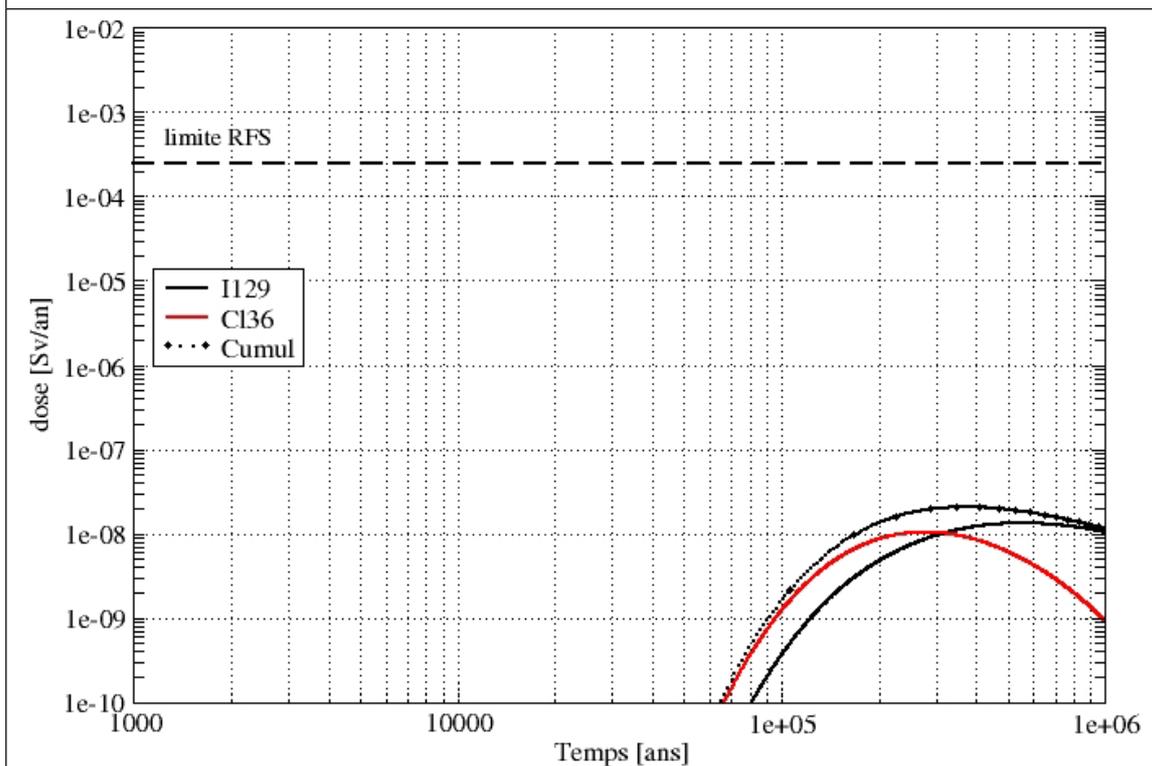


Figure 5.4-23 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - colis types B2

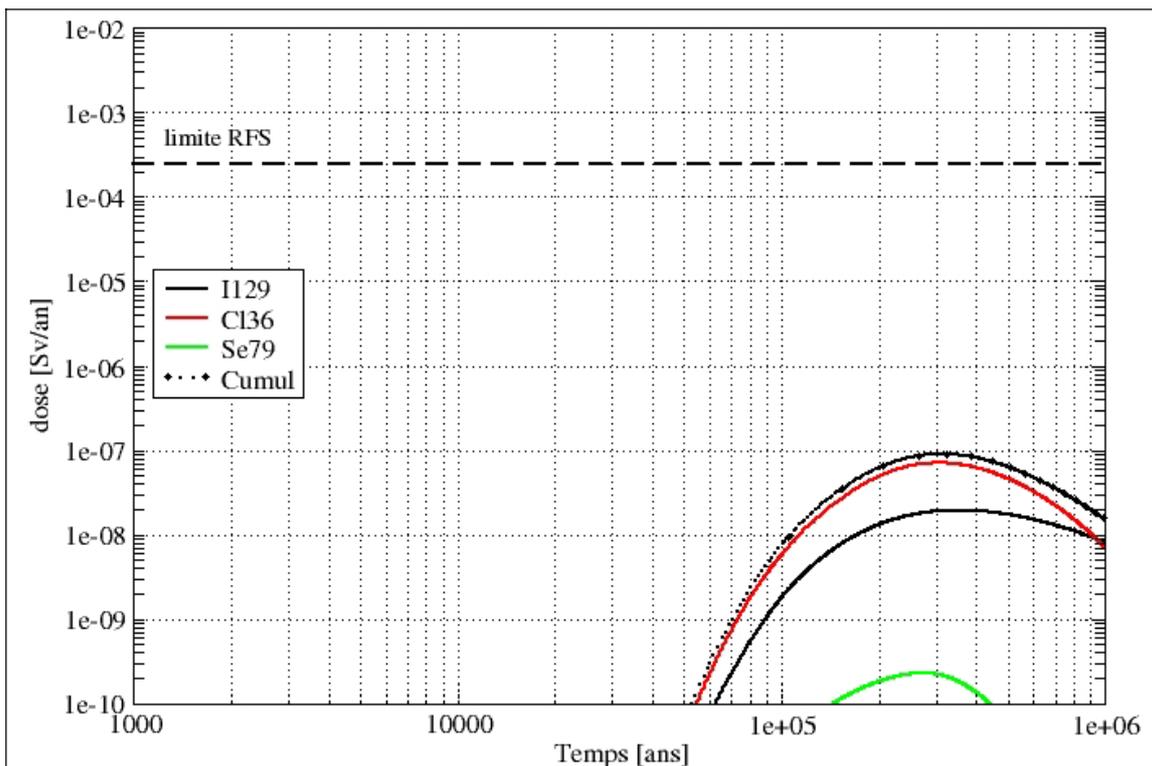


Figure 5.4-24 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années - Doses à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien - autres colis types B

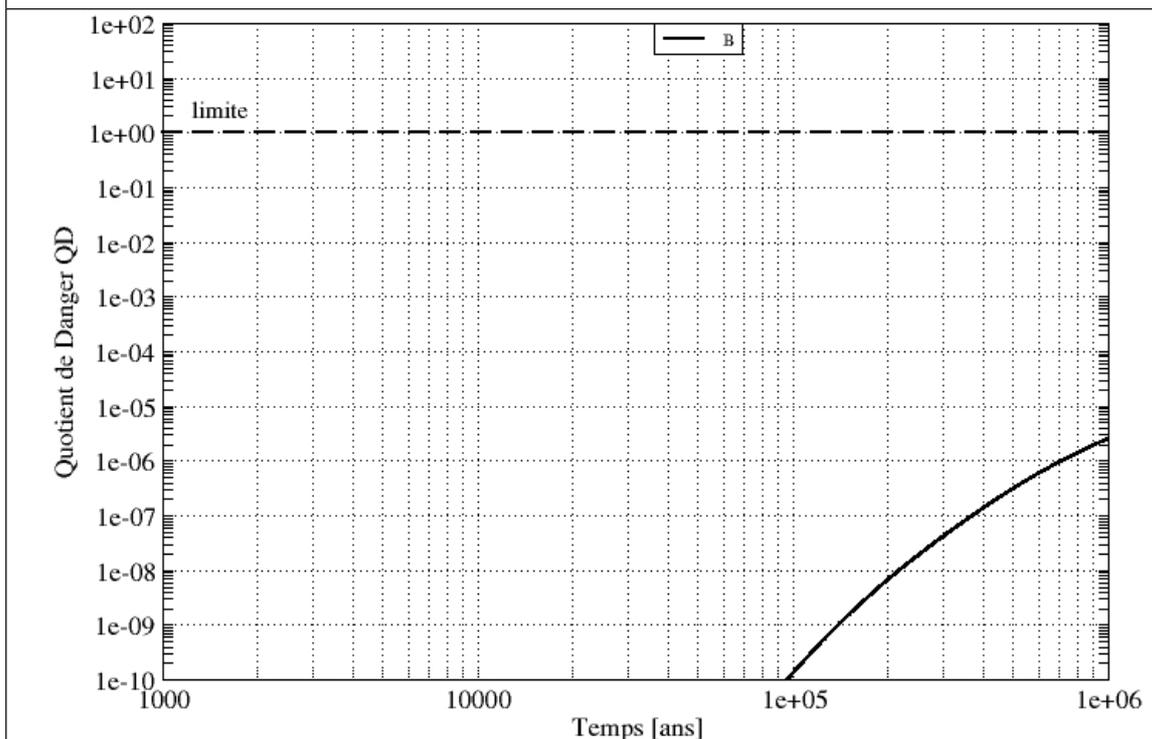


Figure 5.4-26 SEN – Calcul de référence – modèle à 1 million d’années – Colis types C1/C2 – Bore - Impact chimique à l’exutoire Saulx de l’Oxfordien lié aux effets non cancérogènes pour l’ingestion (QD)

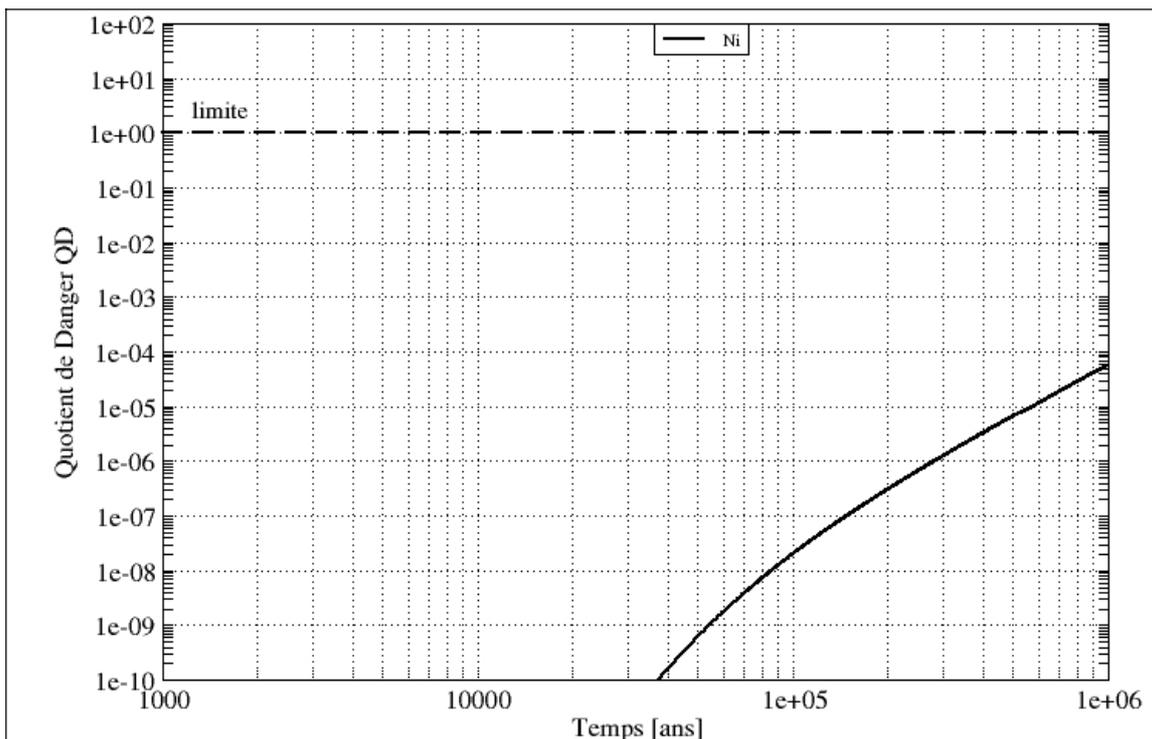


Figure 5.4-27 SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d'années – Colis types C1/C2 – Nickel - Impact chimique à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l'ingestion (QD)

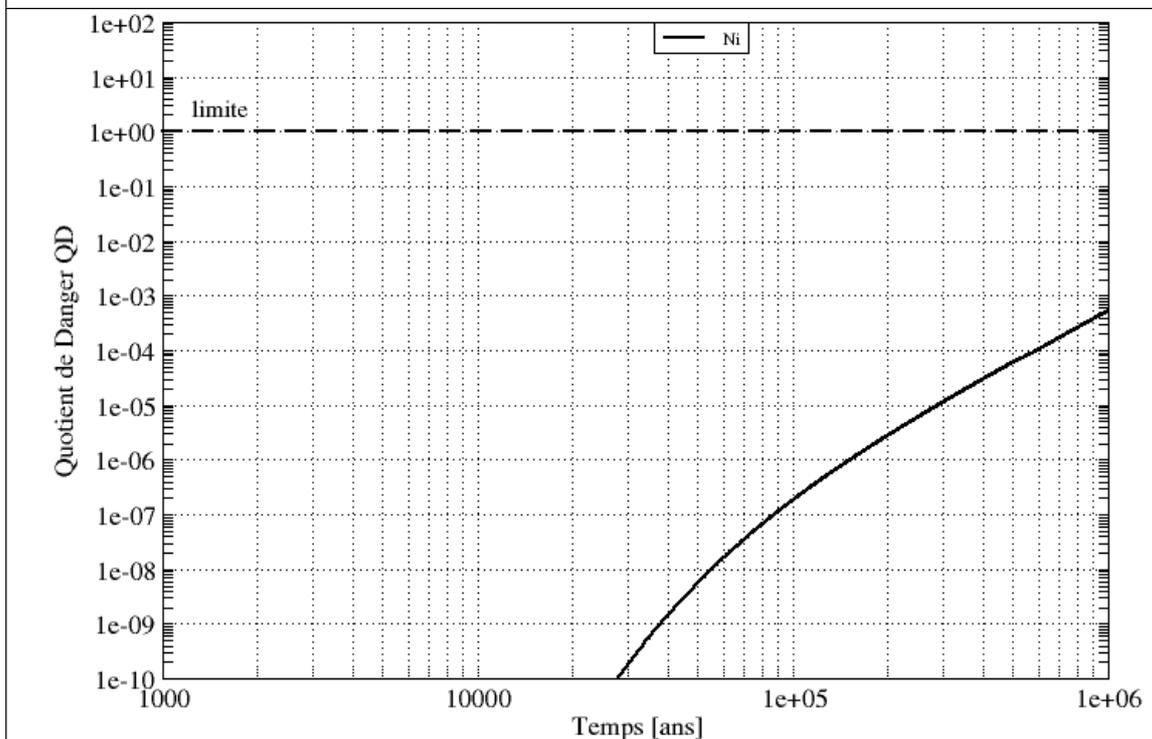


Figure 5.4-28 SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d'années – Colis types C1/C2 – Nickel - Impact chimique à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l'inhalation (QD)

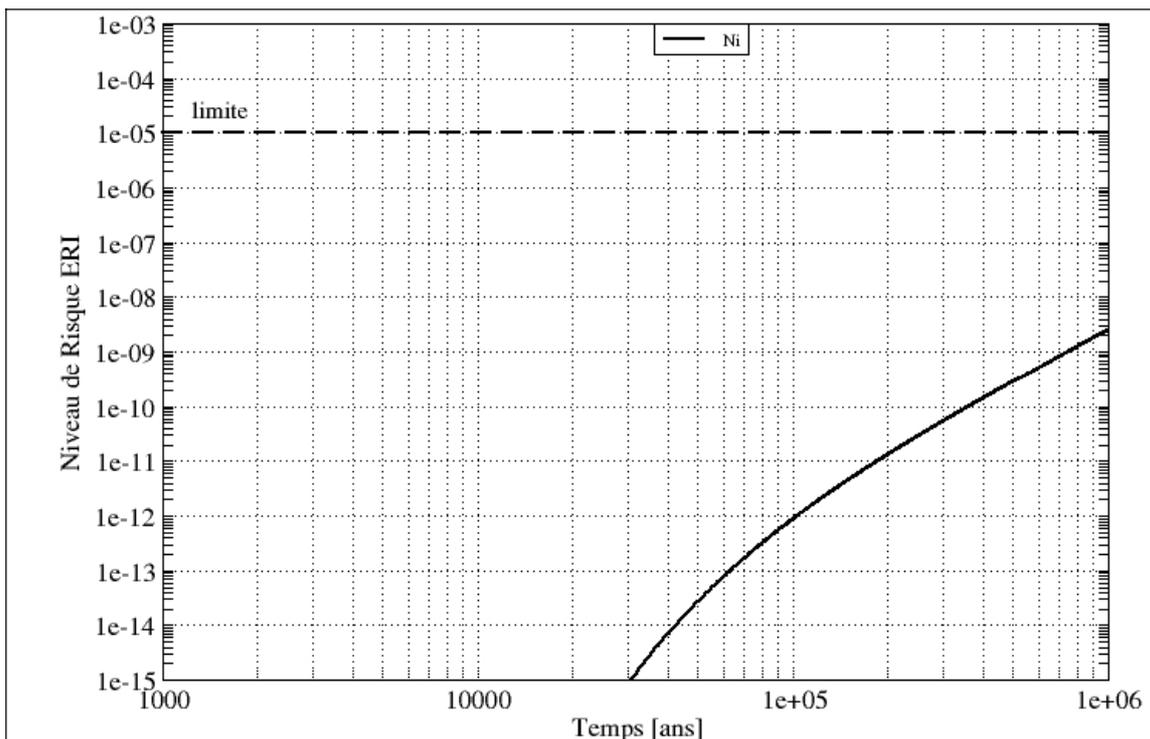


Figure 5.4-29 SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d'années – Colis types C1/C2 – Nickel - Impact chimique à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien lié aux effets cancérigènes pour l'inhalation (ERI)

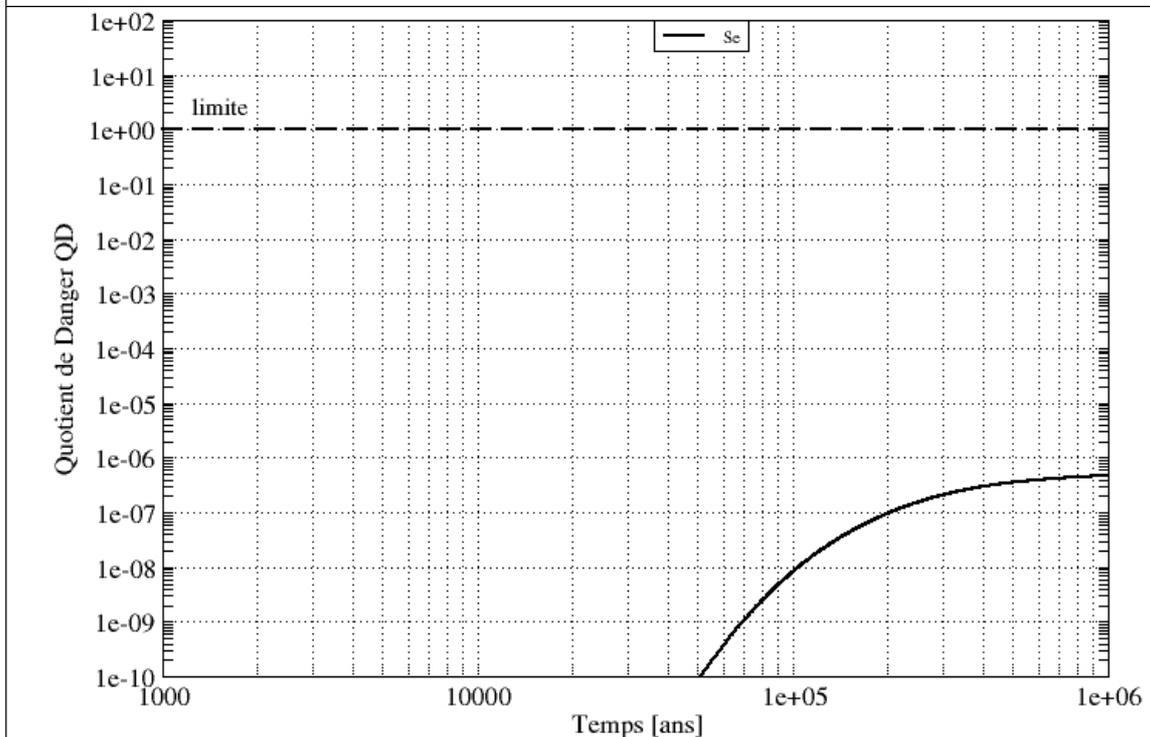


Figure 5.4-30 SEN – Calcul de référence– modèle à 1 million d'années – Colis types C1/C2 – Sélénium - Impact chimique à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien lié aux effets non cancérigènes pour l'ingestion (QD)

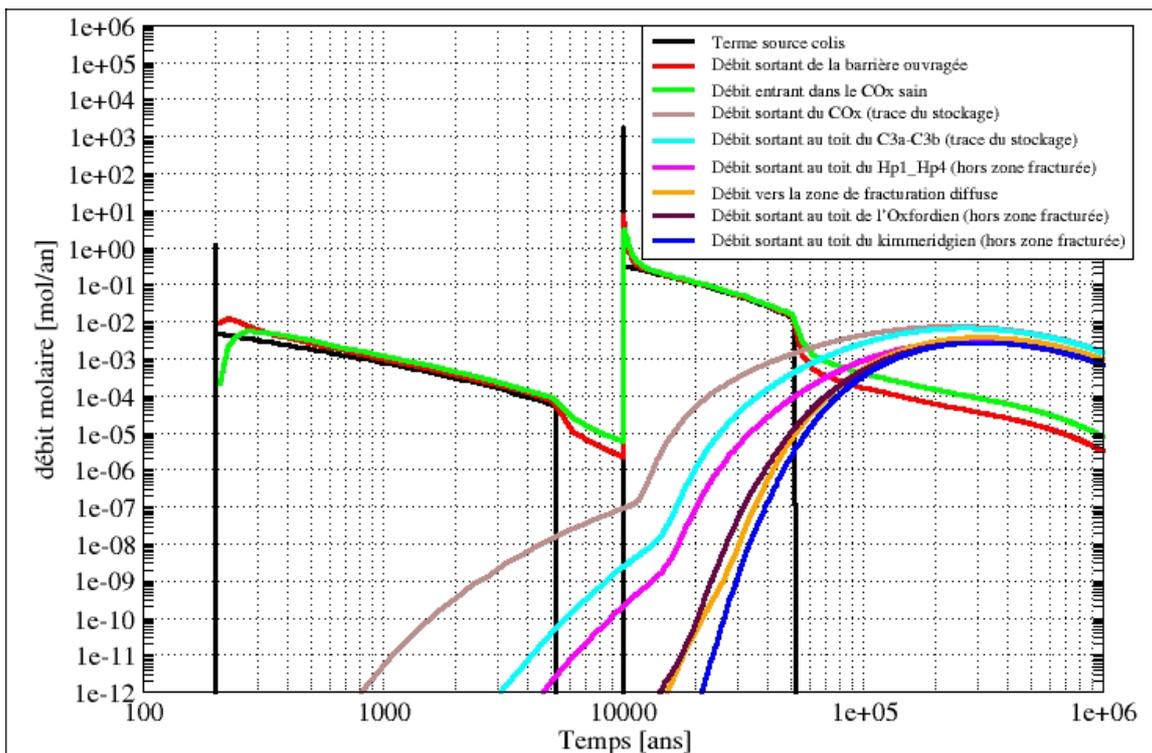


Figure 5.4-31 SEN - Sensibilité aux paramètres hydrauliques : colis type CU2 - ^{129}I – historique de débit molaire [Sensibilité aux paramètres hydrauliques - Colis type CU2 - ^{129}I]

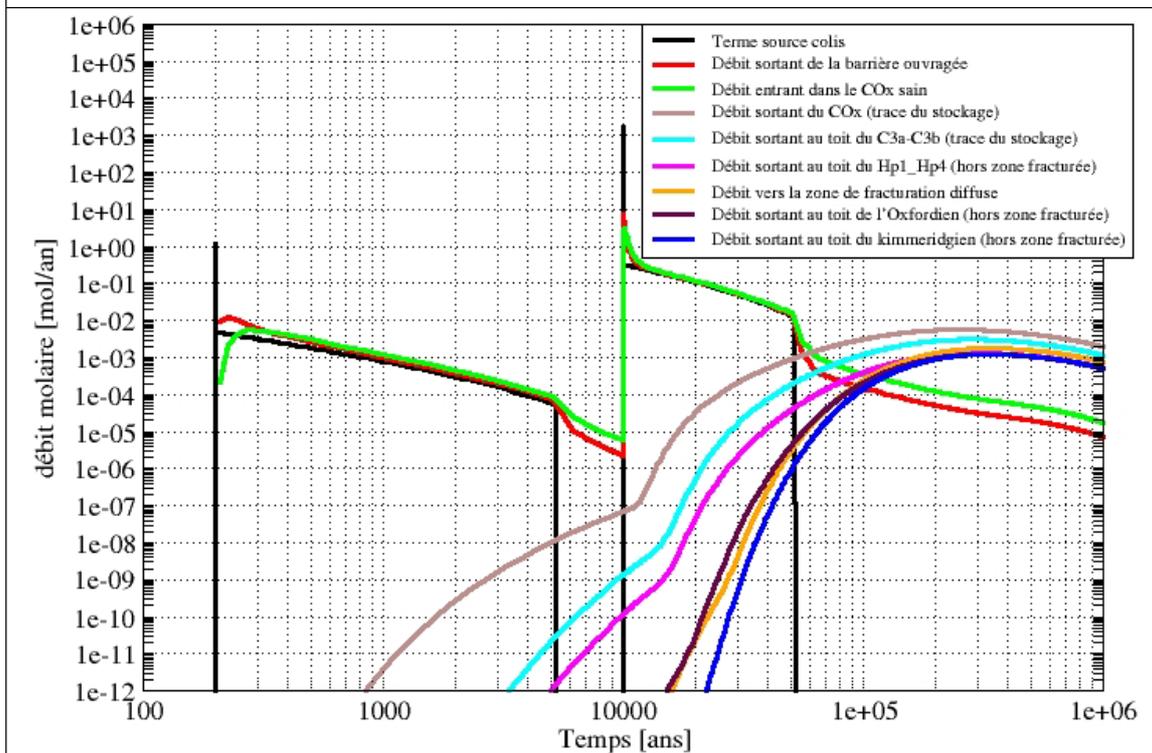


Figure 5.4-31 SEN - Sensibilité aux paramètres hydrauliques : colis type CU2 - ^{129}I – historique de débit molaire [Calcul de référence (rappel) - Colis type CU2 - ^{129}I]

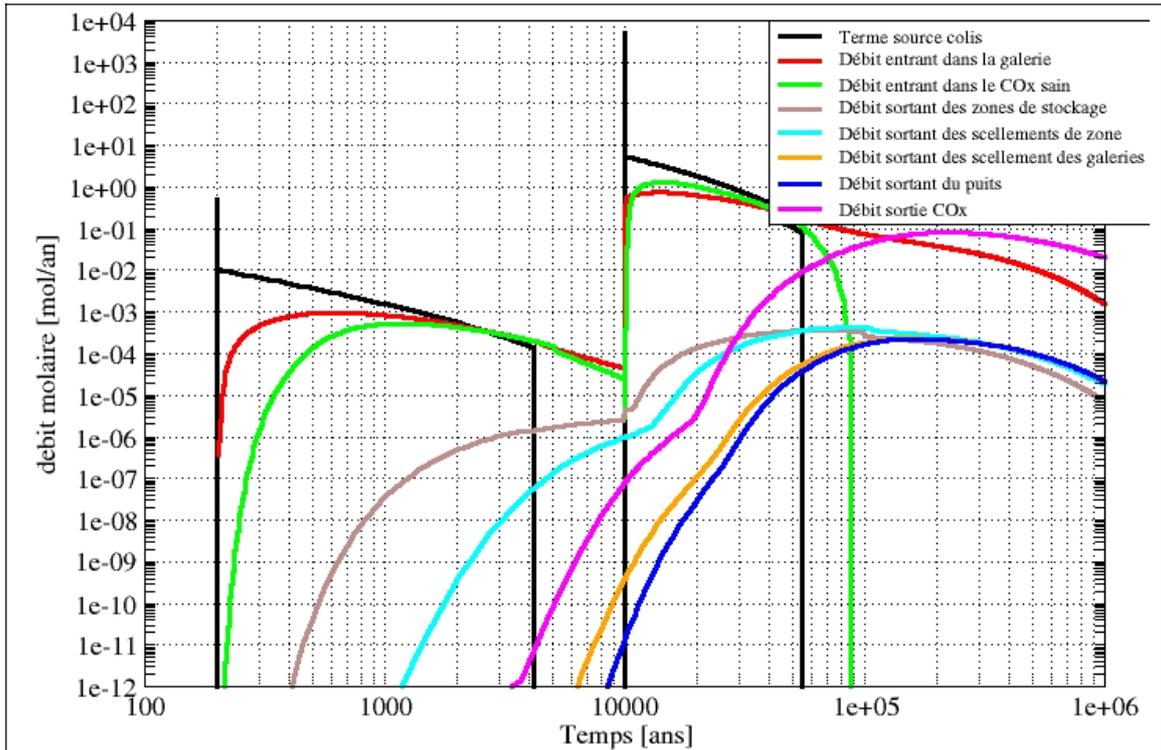


Figure 5.4-34 *SEN - Sensibilité : EDZ « dégradée » (Zone fracturée pénalisante, zone micro-fissurée conservative) - Colis type $CU1 - ^{129}I$ - Historique de débits molaire [Etude de sensibilité]*

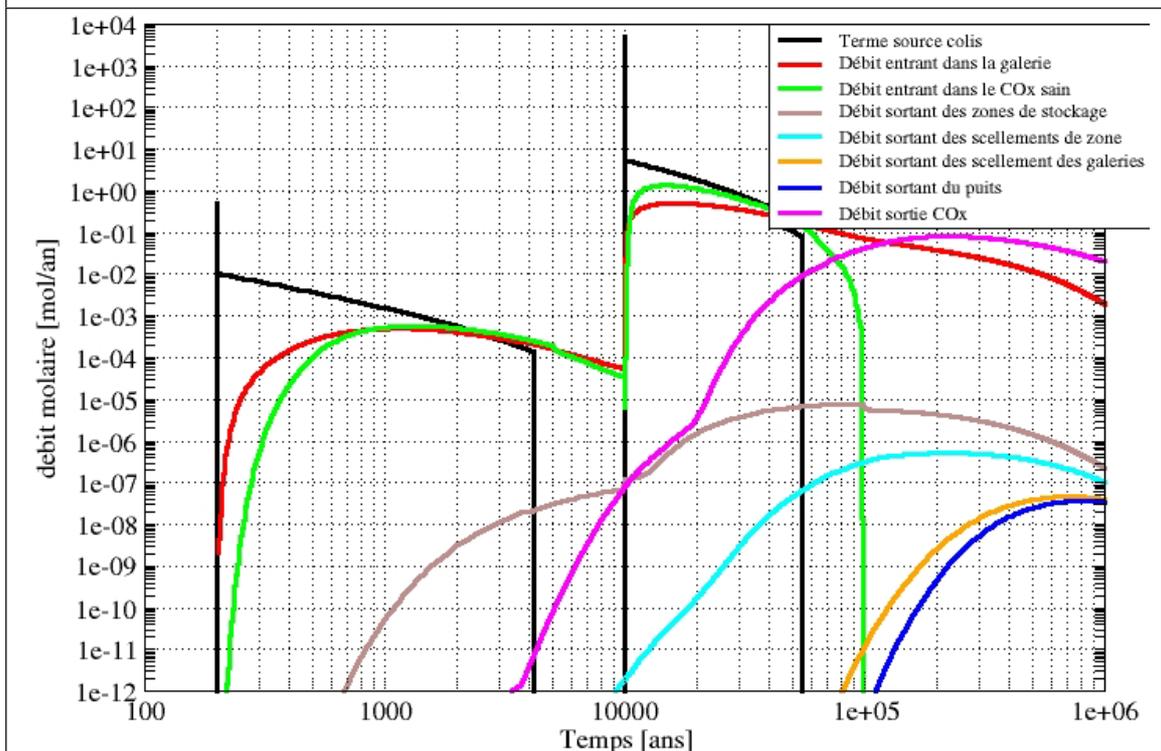


Figure 5.4-34 *SEN - Sensibilité : EDZ « dégradée » (Zone fracturée pénalisante, zone micro-fissurée conservative) - Colis type $CU1 - ^{129}I$ - Historique de débits molaire [Calcul de référence]*

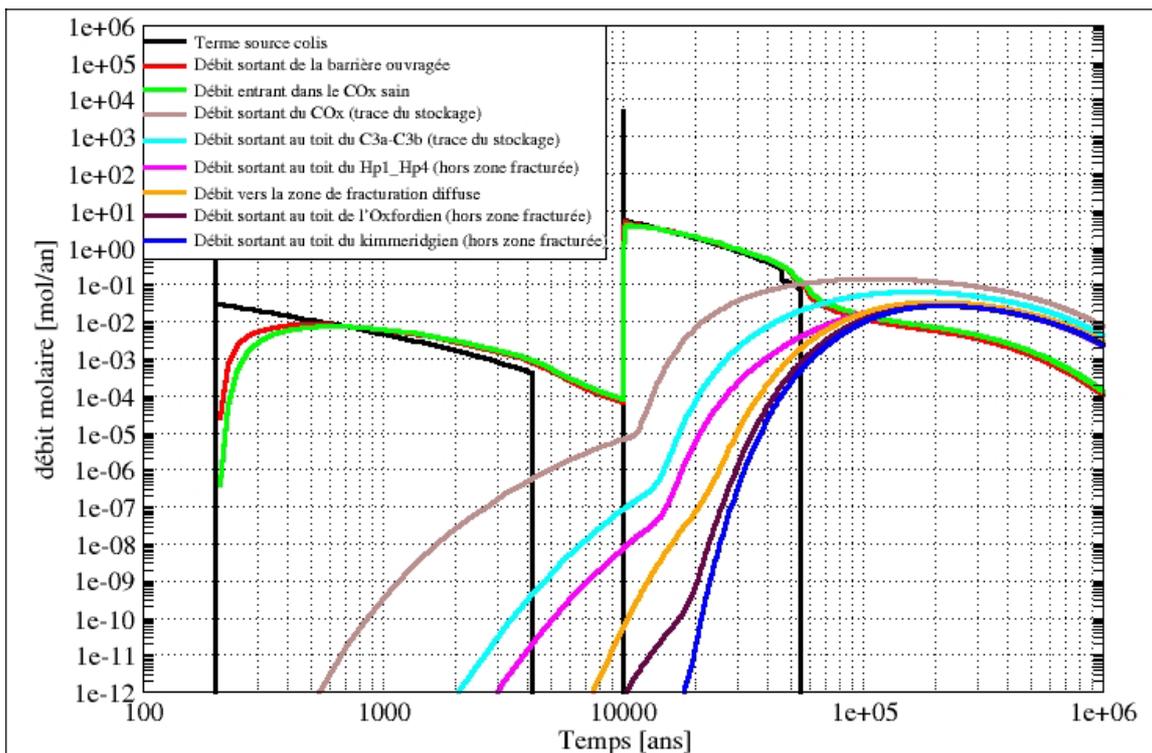


Figure 5.4-36 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI – ¹²⁹I – Historique de débit molaire [Etude de sensibilité]

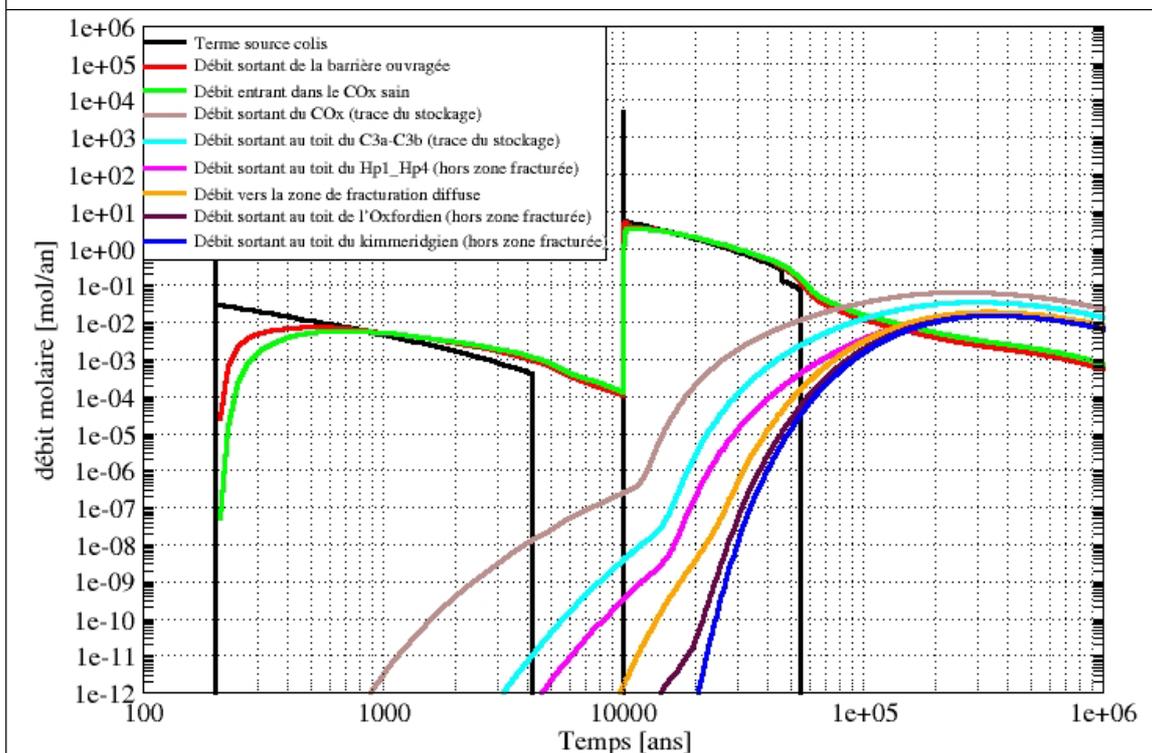


Figure 5.4-36 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI – ¹²⁹I – Historique de débit molaire [Calcul de référence]

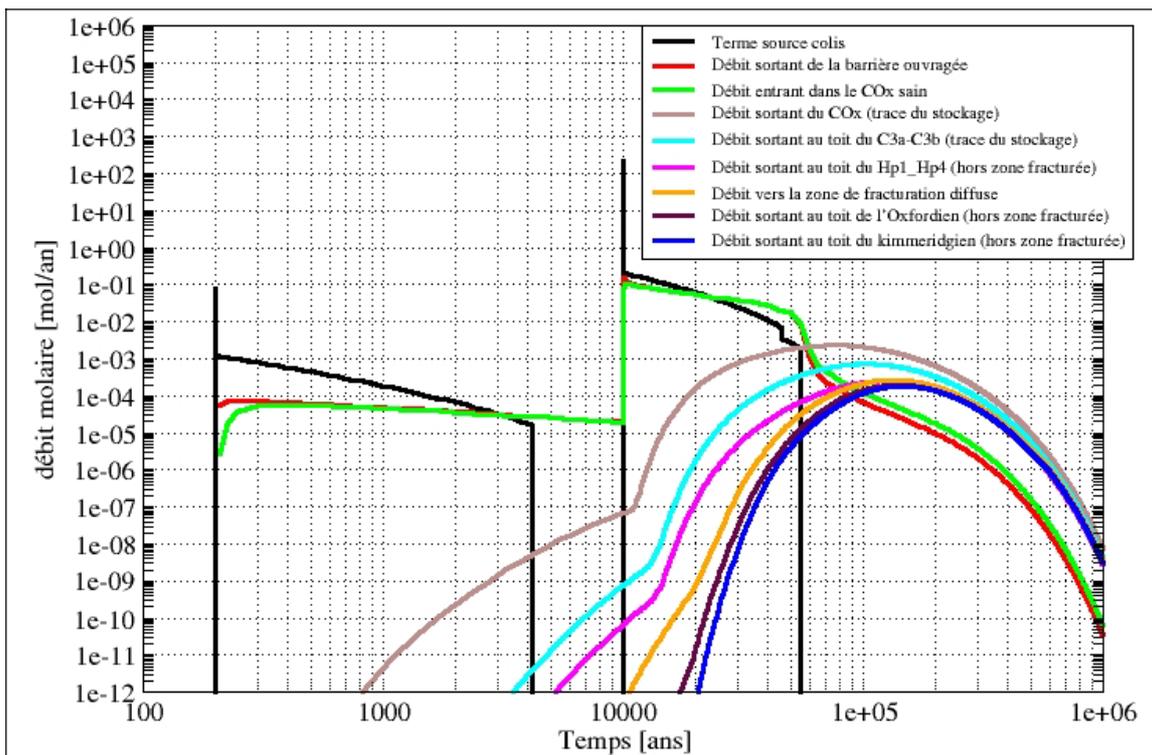


Figure 5.4-37 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI – ⁷⁹Se – Historique de débit molaire [Etude de sensibilité]

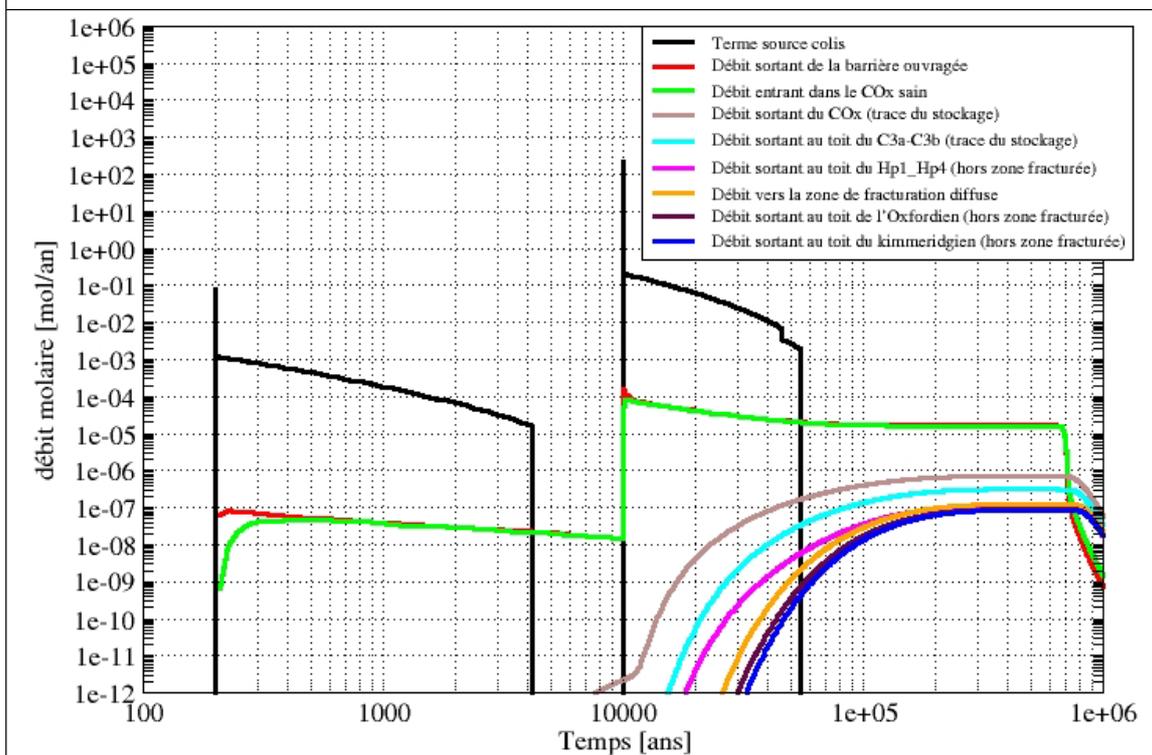


Figure 5.4-37 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI – ⁷⁹Se – Historique de débit molaire [Calcul de référence]

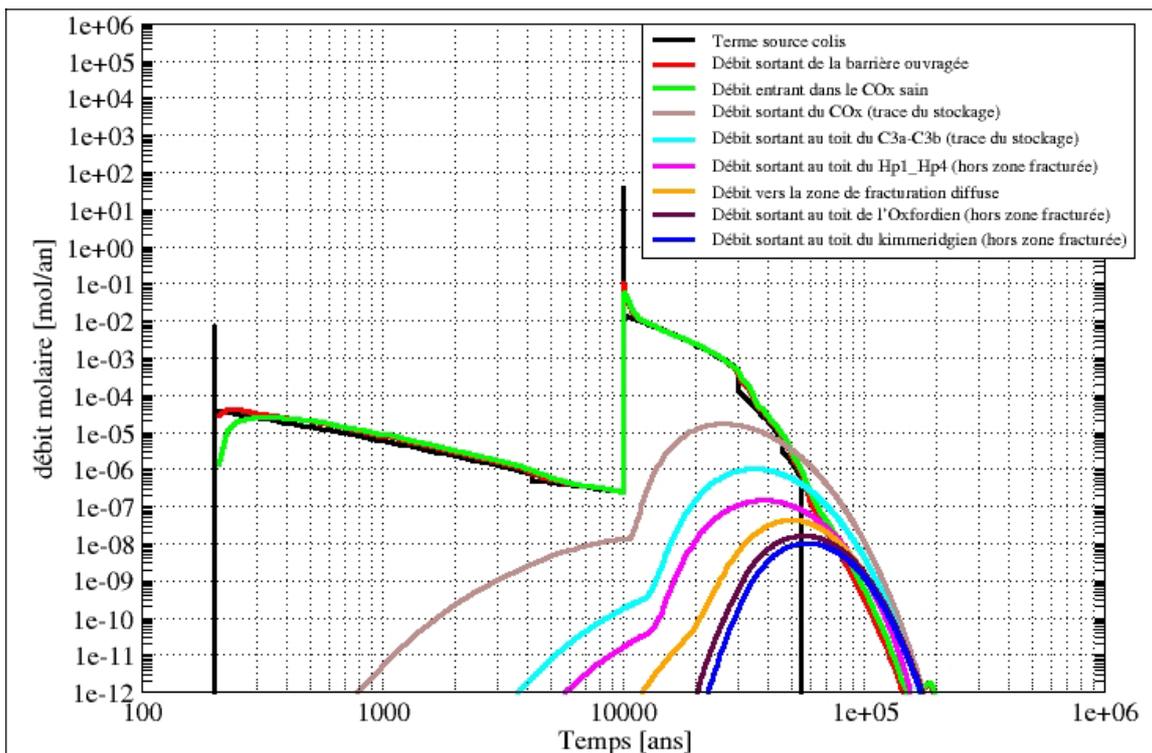


Figure 5.4-38 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI - ^{14}C - Historique de débit molaire [Etude de sensibilité]

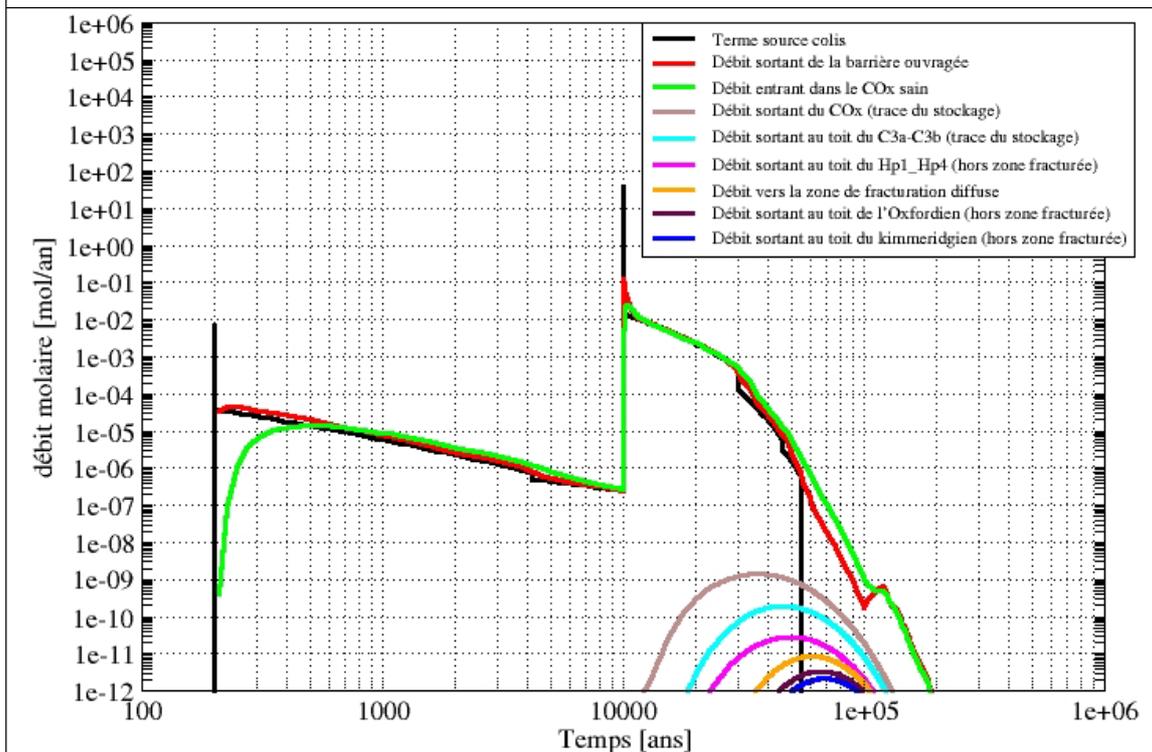


Figure 5.4-38 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CUI - ^{14}C - Historique de débit molaire [Calcul de référence]

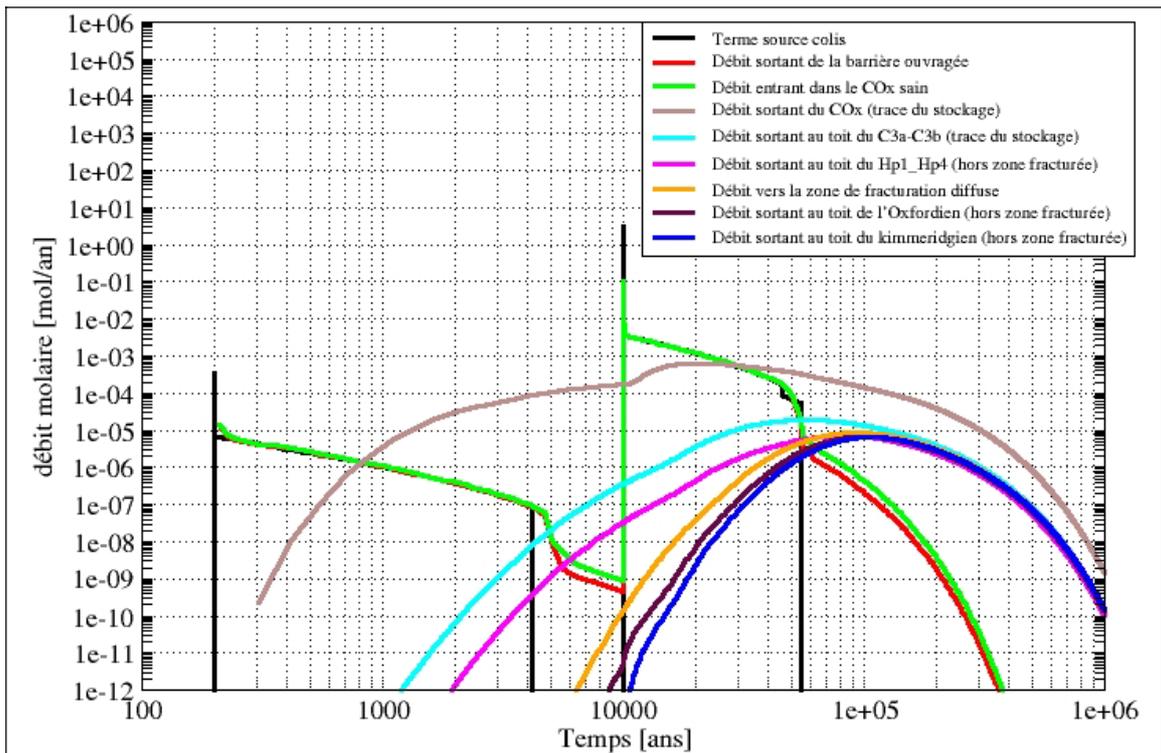


Figure 5.4-39 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CU1 – ^{10}Be – Historique de débit molaire

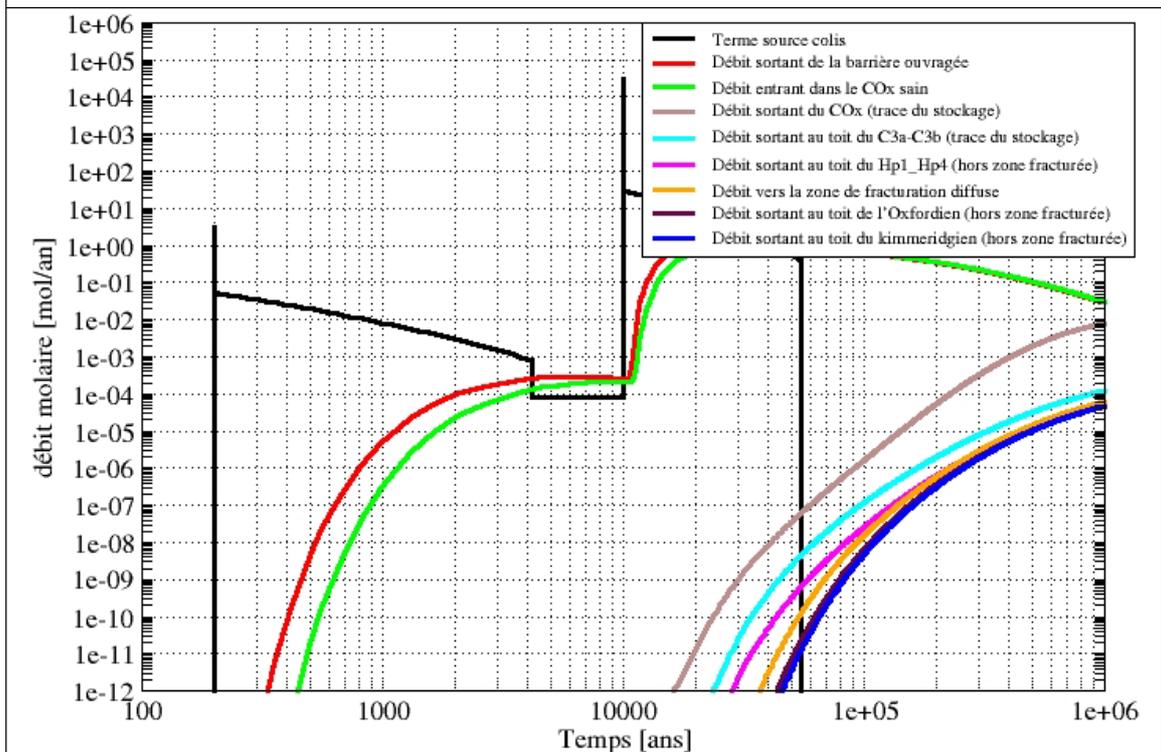


Figure 5.4-40 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention : colis type CU1 – ^{93}Zr – Historique de débit molaire

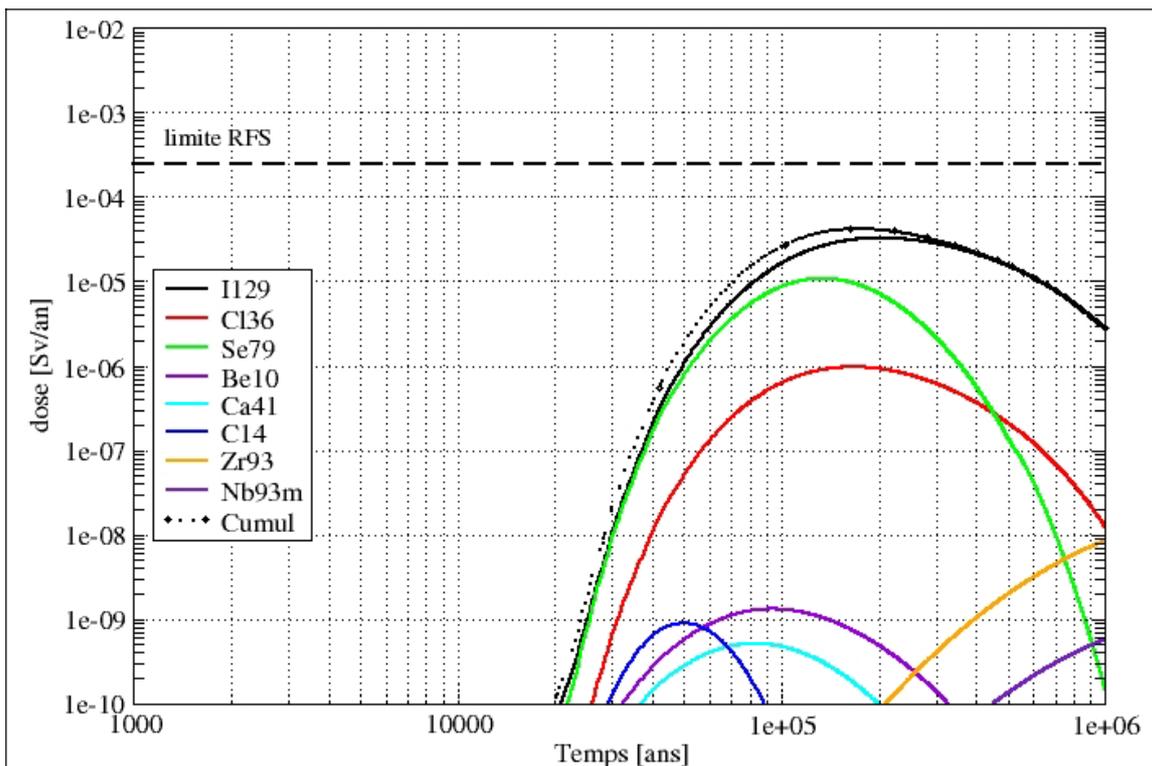


Figure 5.4-41 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis type CUI - Modèle à 1 million d'années [Etude de sensibilité]

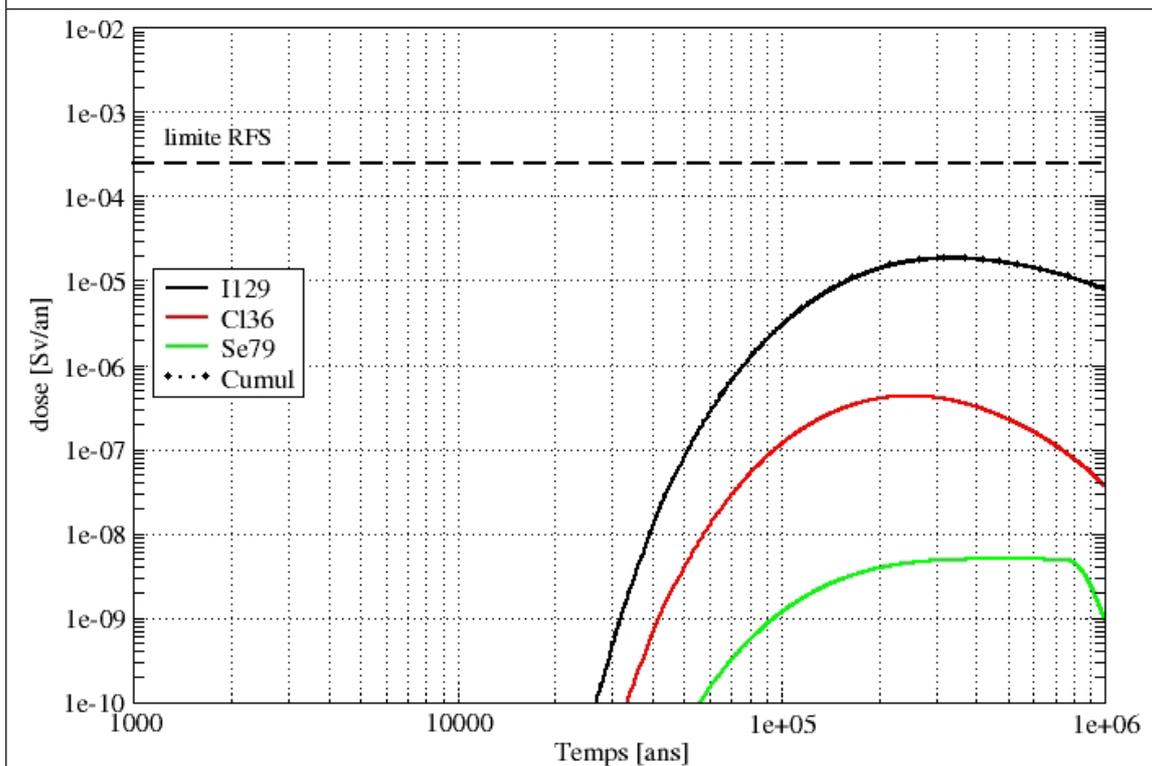


Figure 5.4-41 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis type CUI - Modèle à 1 million d'années [Calcul de référence - rappel]

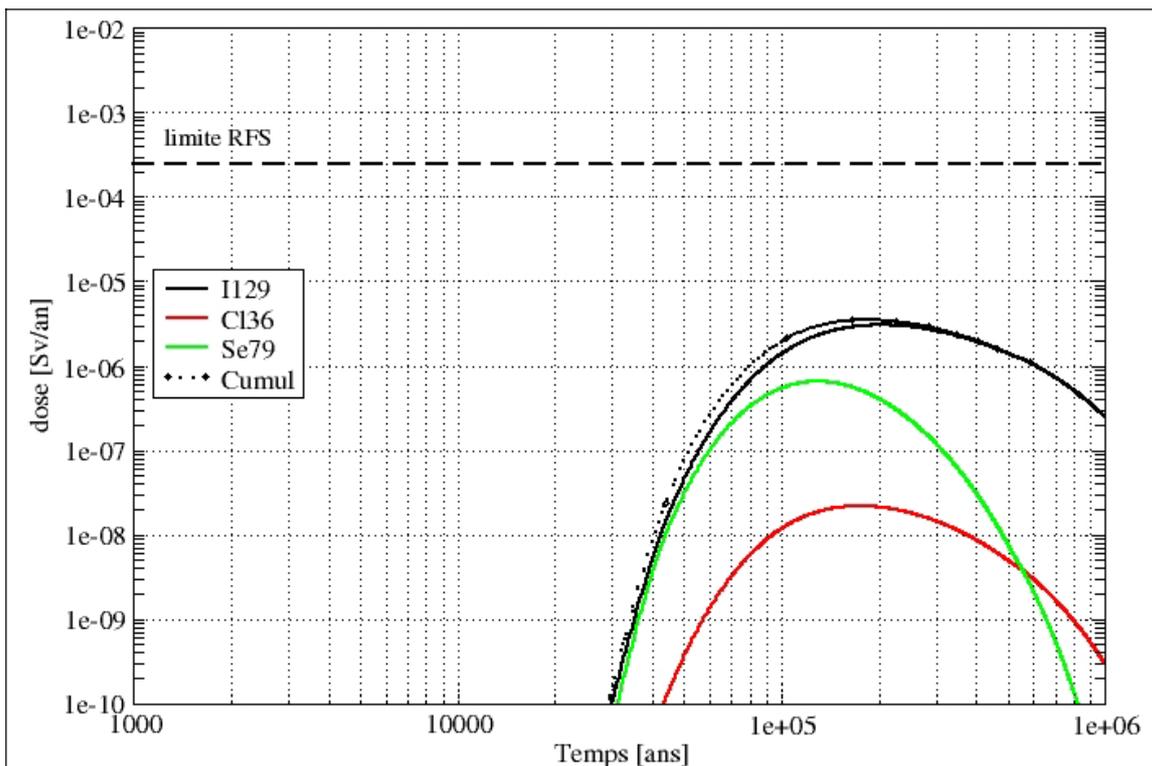


Figure 5.4-42 *SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives)*
 - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis type CU2 Modèle à 1 million d'années [Etude de sensibilité]

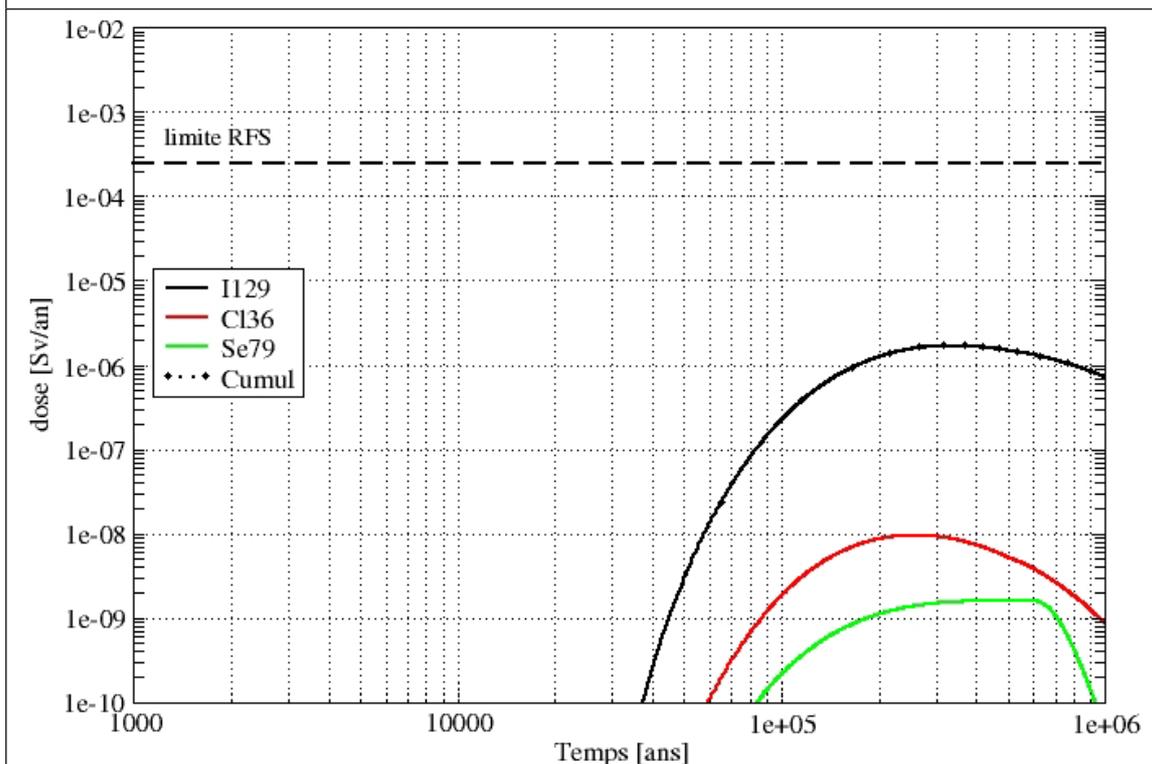


Figure 5.4-42 *SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives)*
 - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis type CU2 Modèle à 1 million d'années [Calcul de référence - rappel]

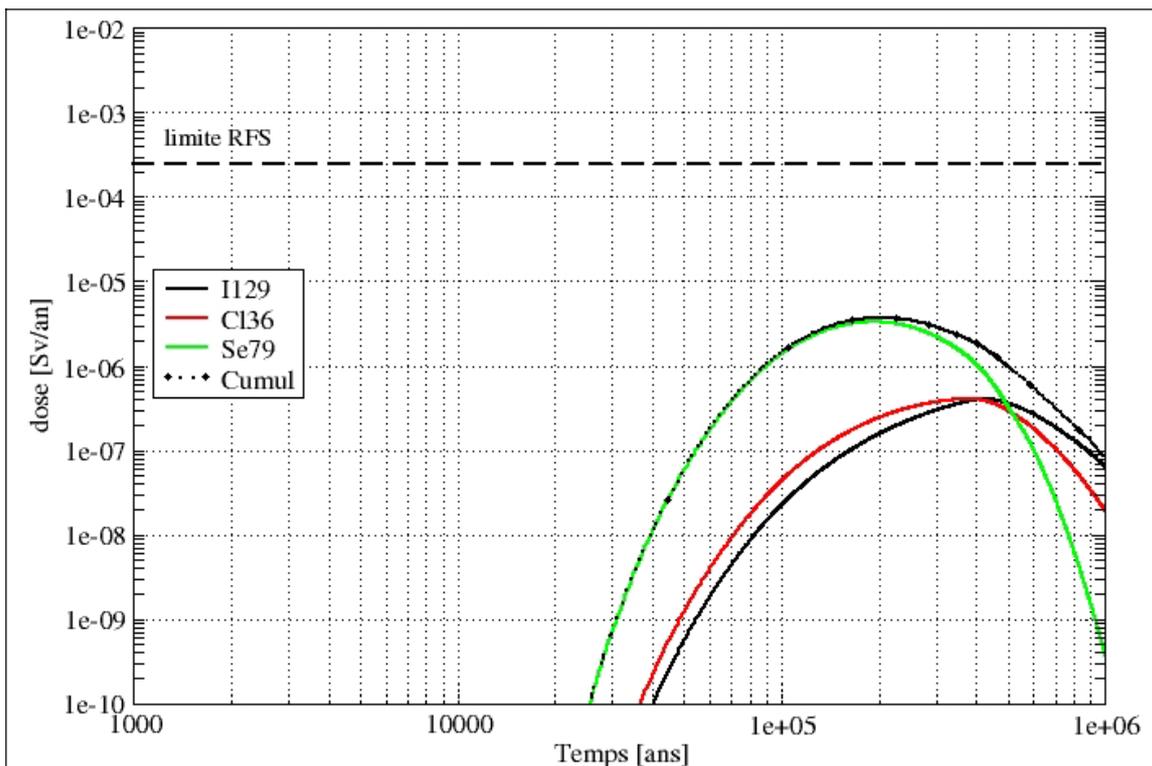


Figure 5.4-43 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis types (C1+C2) [Etude de sensibilité]

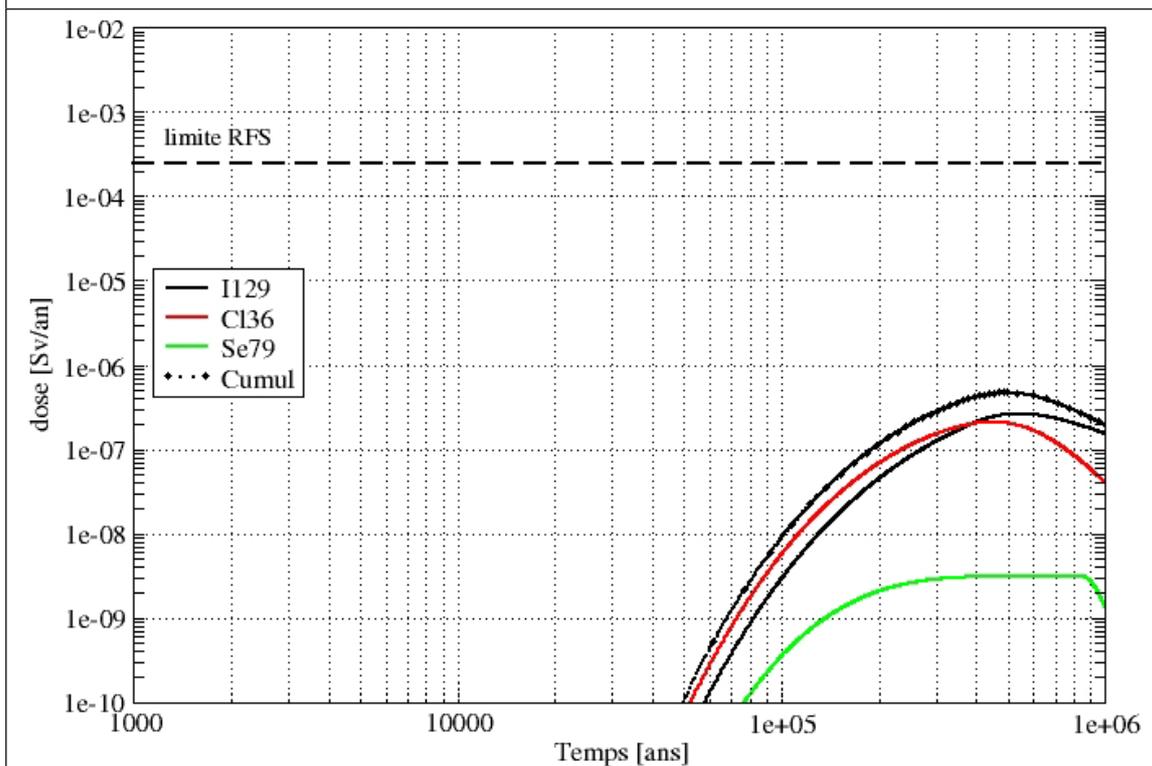


Figure 5.4-43 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis types (C1+C2) [Calcul de référence - rappel]

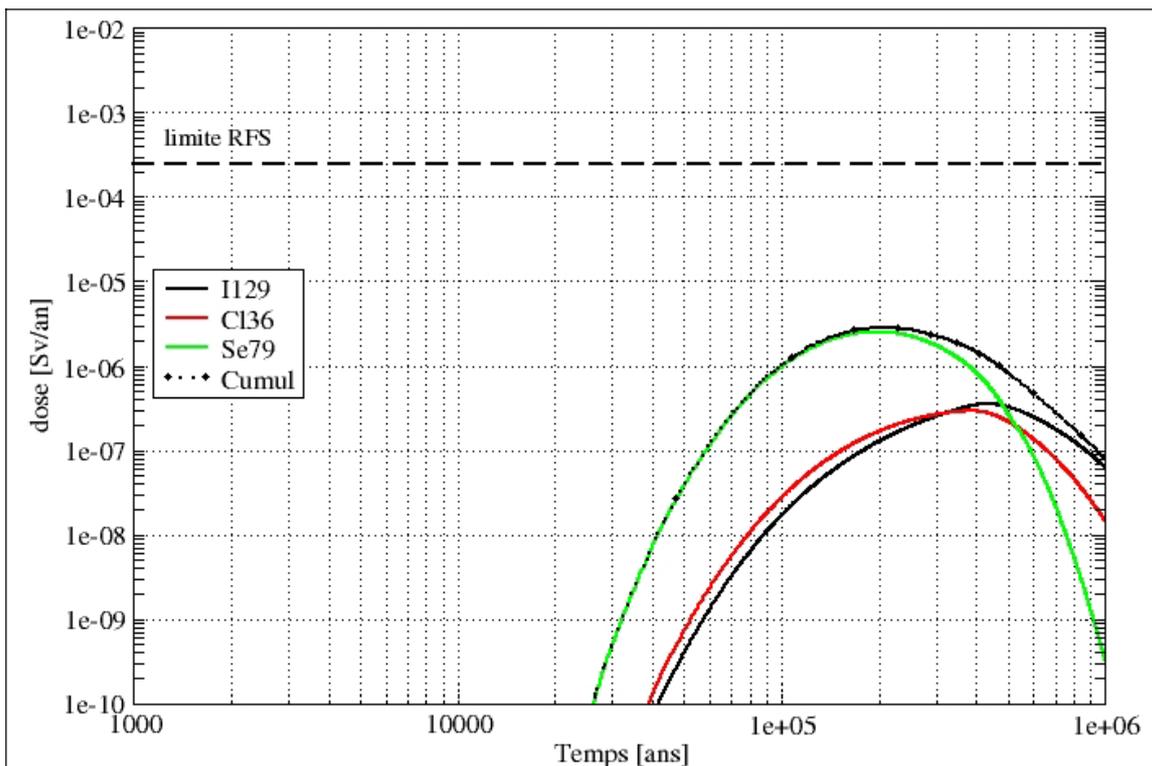


Figure 5.4-44 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis types (C3+C4) [Etude de sensibilité]

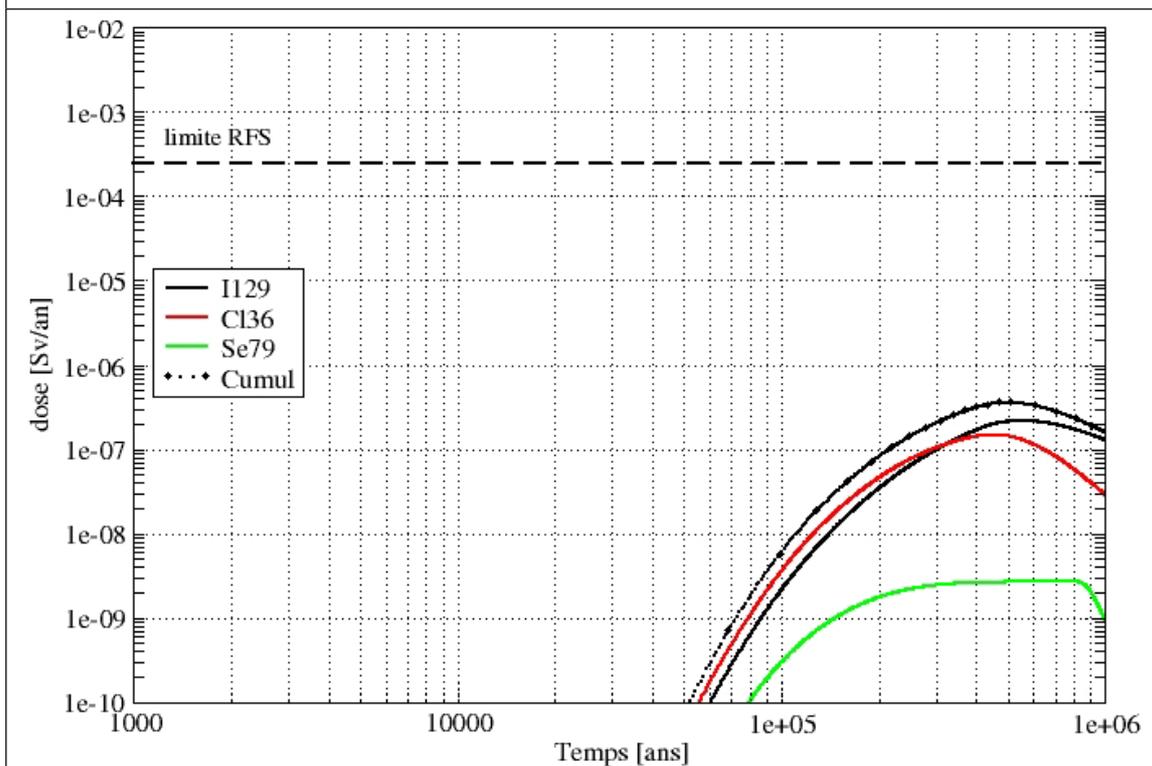


Figure 5.4-44 SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis types (C3+C4) [Calcul de référence - rappel]

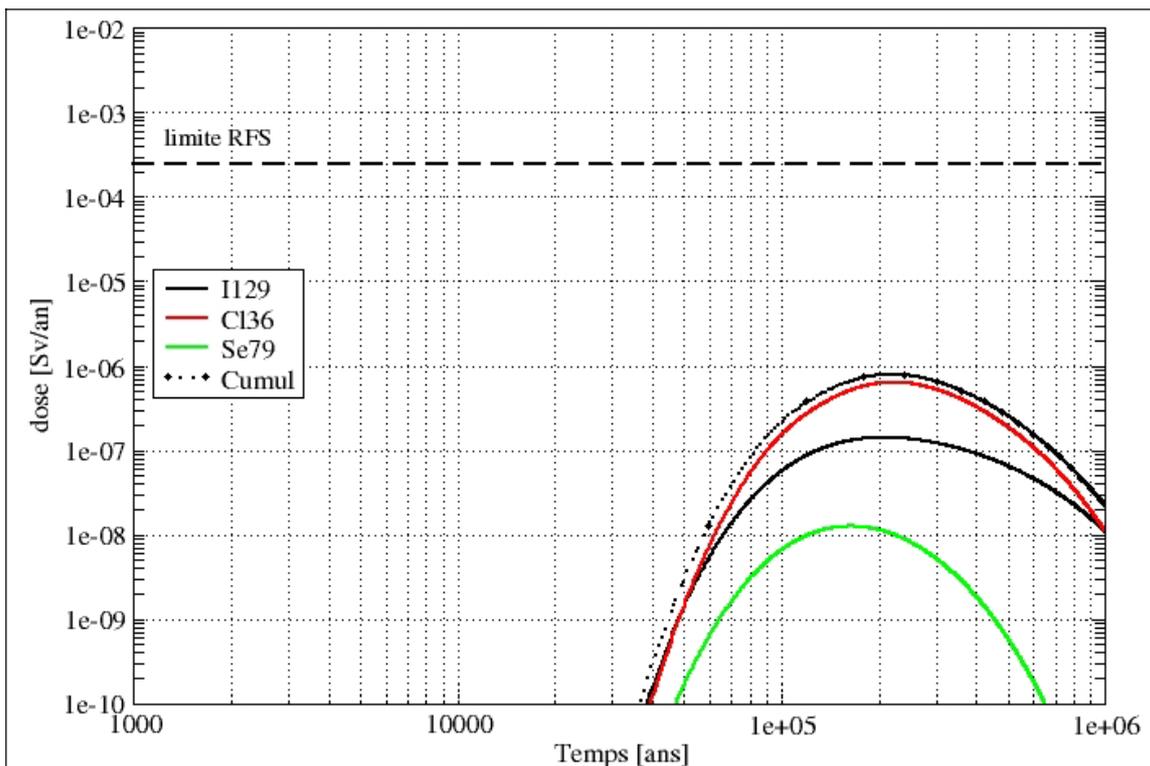


Figure 5.4-45 *SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis types de déchets B (B1x) [Etude de sensibilité]*

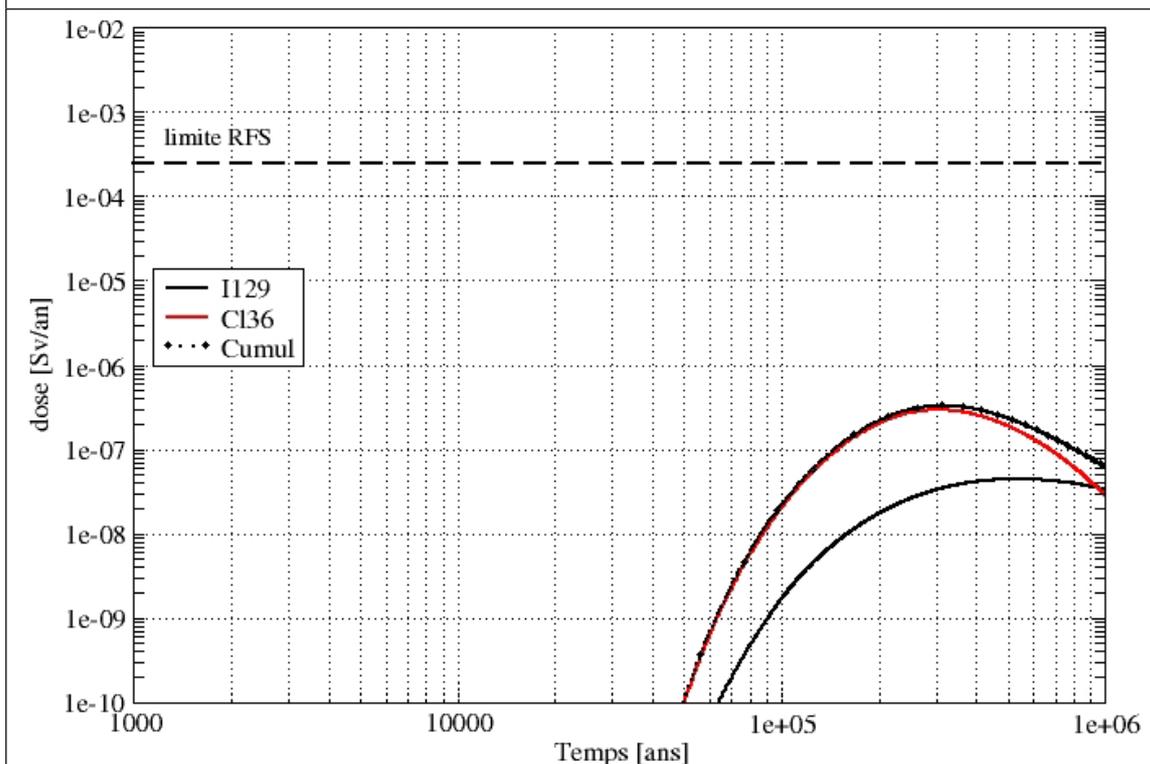


Figure 5.4-45 *SEN - Sensibilité aux paramètres de transport et de rétention (valeurs conservatives) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis types de déchets B (B1x) [Calcul de référence - rappel]*

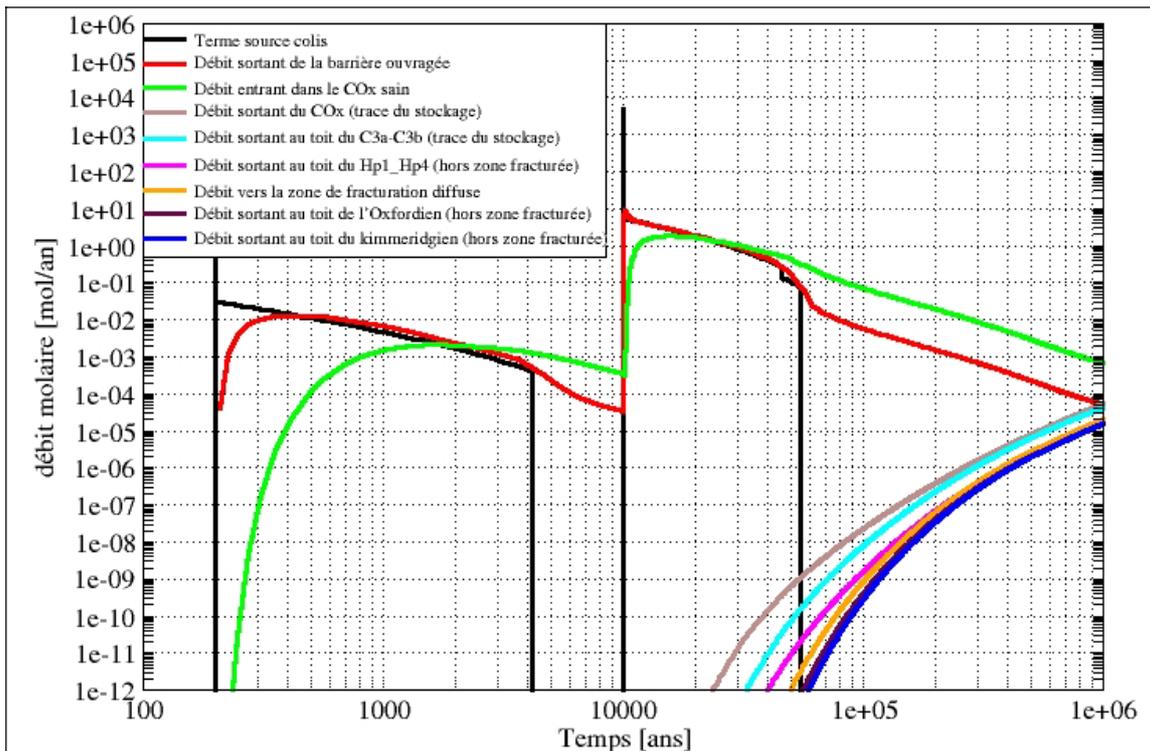


Figure 5.4-46 *SEN - Sensibilité au coefficient de retard de l'iode dans le Callovo-Oxfordien : colis type CU1 - ^{129}I - Historique de débit molaire [Etude de sensibilité ($K_d = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$)]*

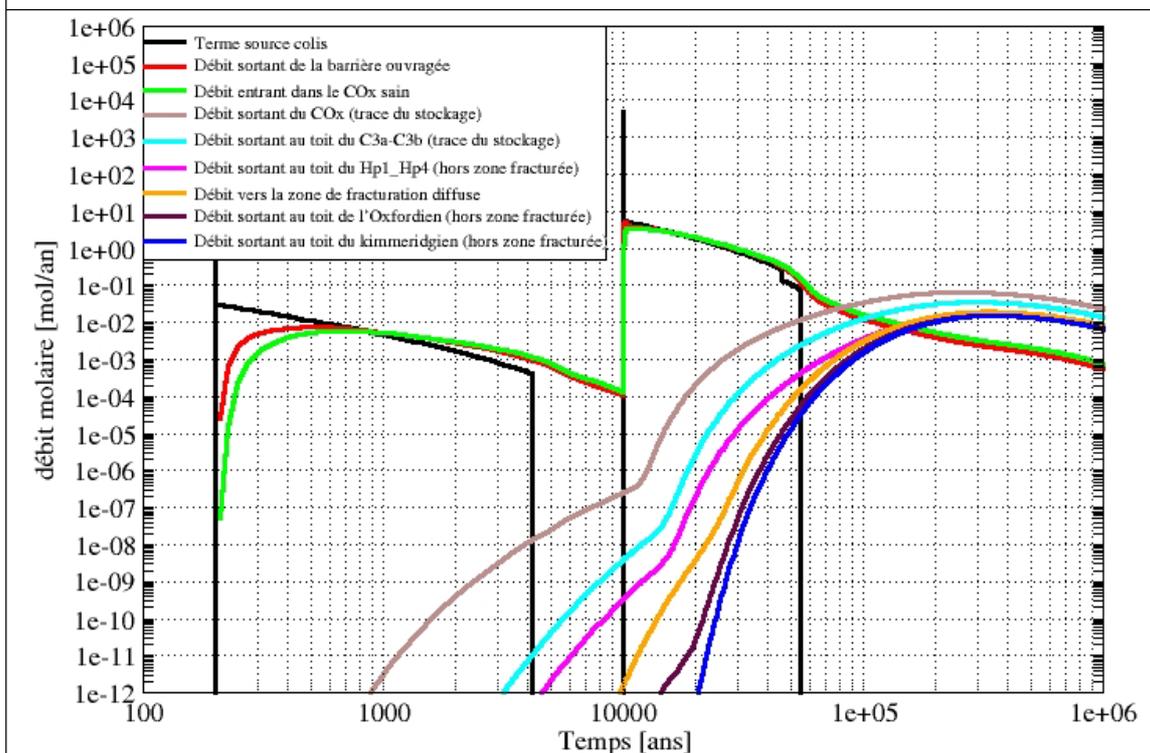


Figure 5.4-46 *SEN - Sensibilité au coefficient de retard de l'iode dans le Callovo-Oxfordien : colis type CU1 - ^{129}I - Historique de débit molaire [Calcul de référence ($K_d = 0 \text{ m}^3/\text{kg}$)]*

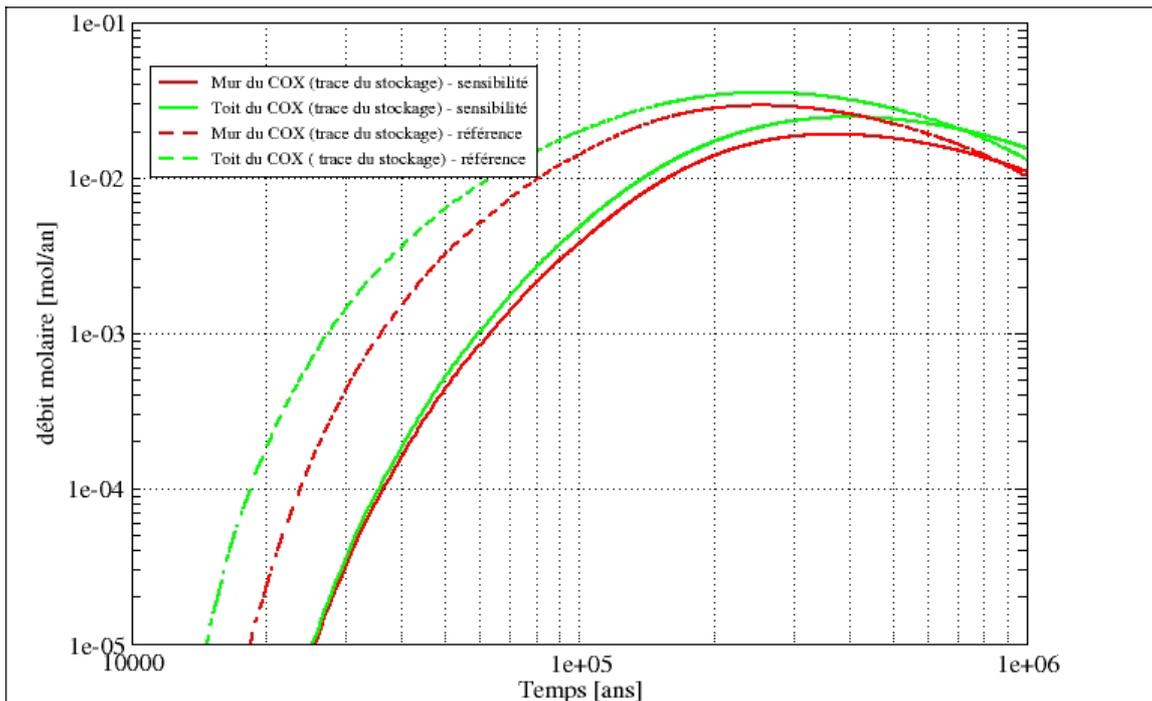


Figure 5.4-47 SEN - Sensibilité à l'épaisseur de Callovo-Oxfordien (150 mètres au lieu de 130 mètres en référence) - Colis type CUI - ^{129}I - Historique de débits molaire. (COX = Callovo-Oxfordien)

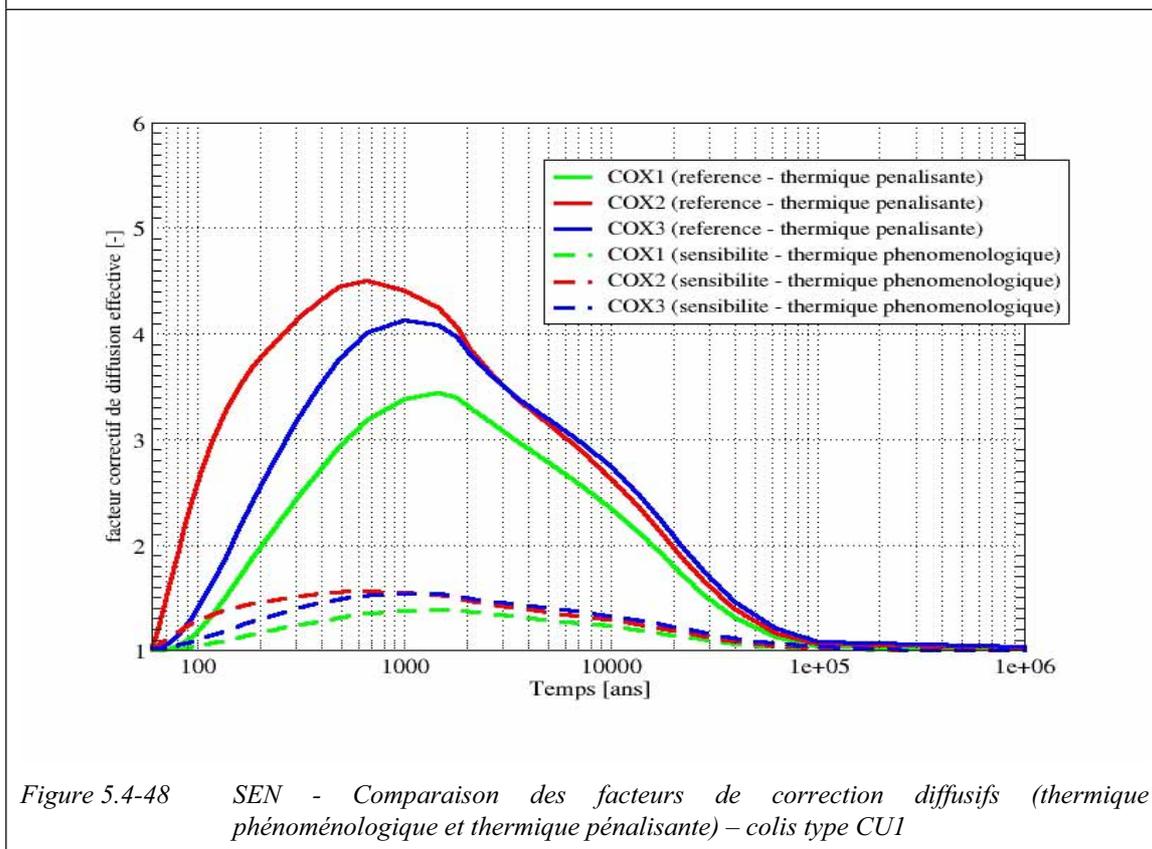


Figure 5.4-48 SEN - Comparaison des facteurs de correction diffusifs (thermique phénoménologique et thermique pénalisante) – colis type CUI

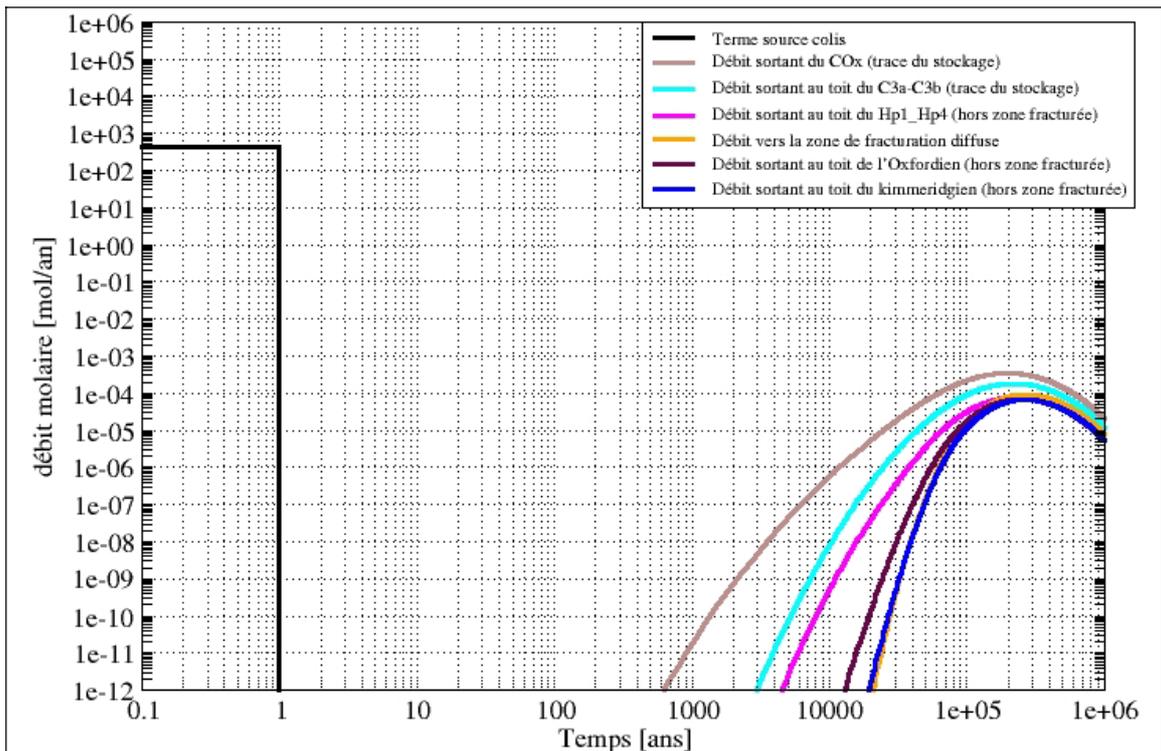


Figure 5.4-49 SEN - Sensibilité au modèle de référence retenu pour les colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (modèle pénalisant) - colis type B1x - ^{36}Cl - historique de débit molaire [Etude de sensibilité]

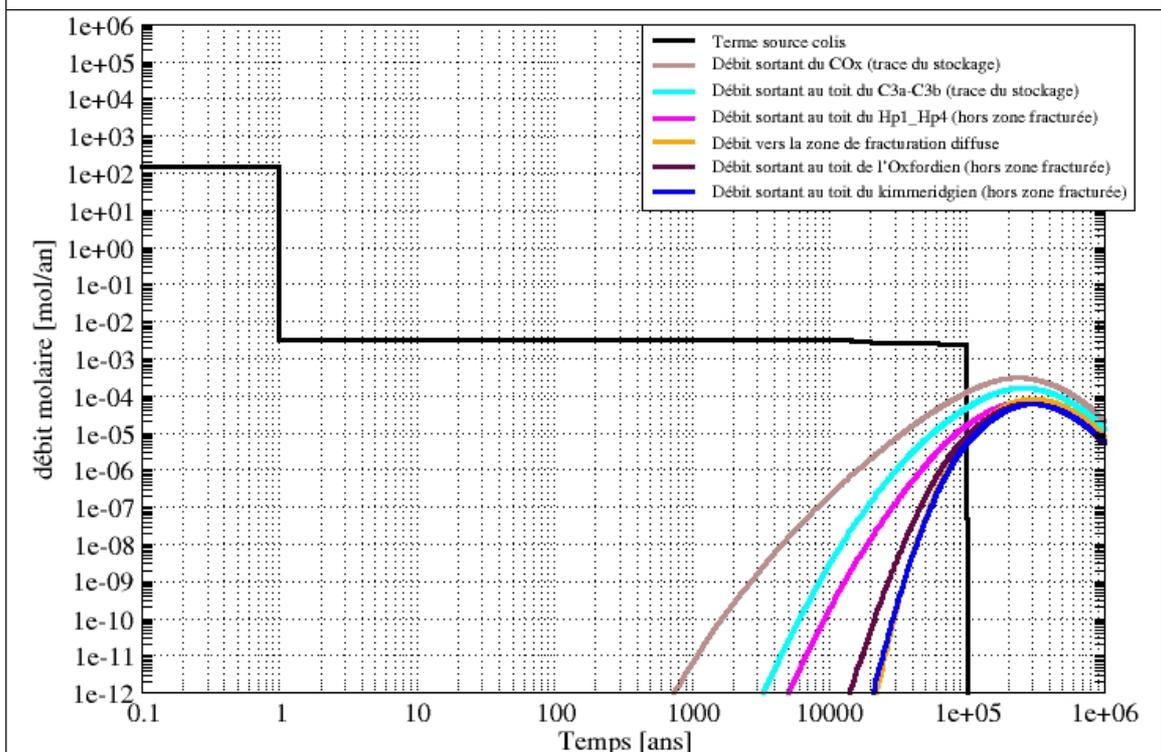
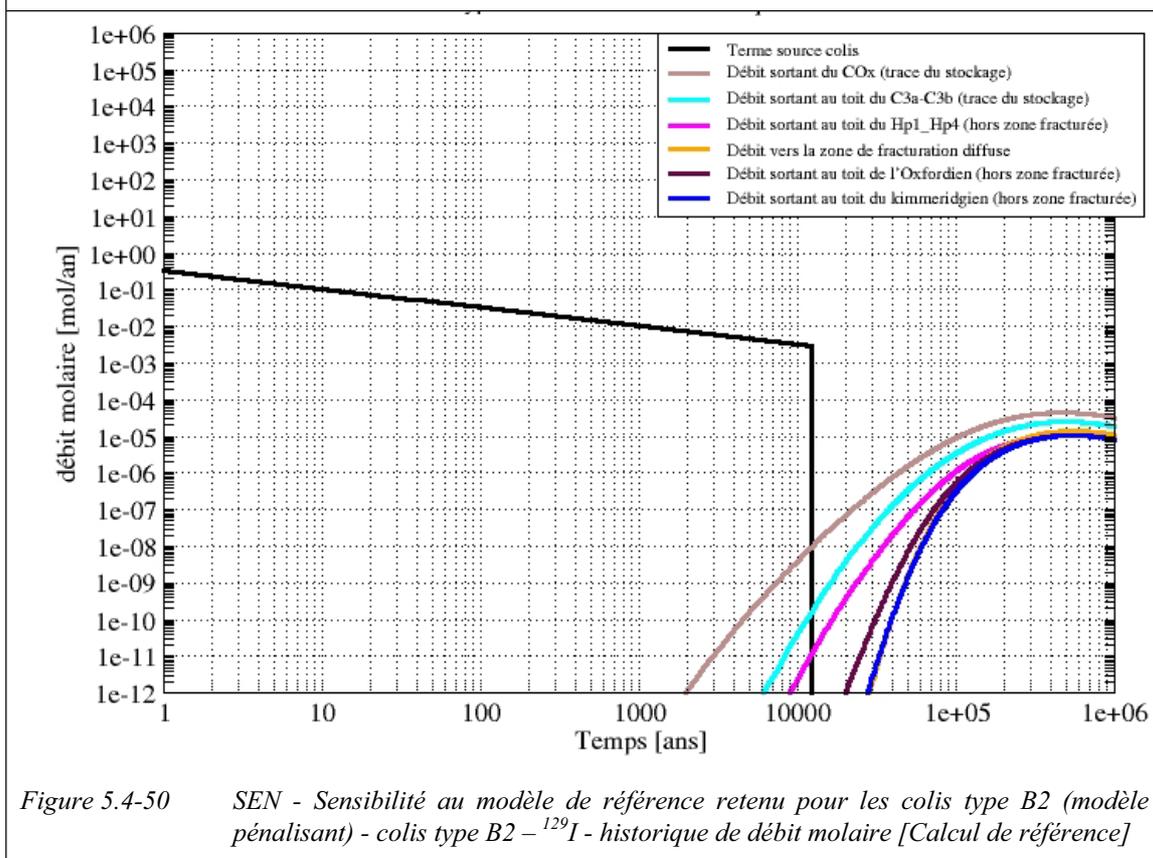
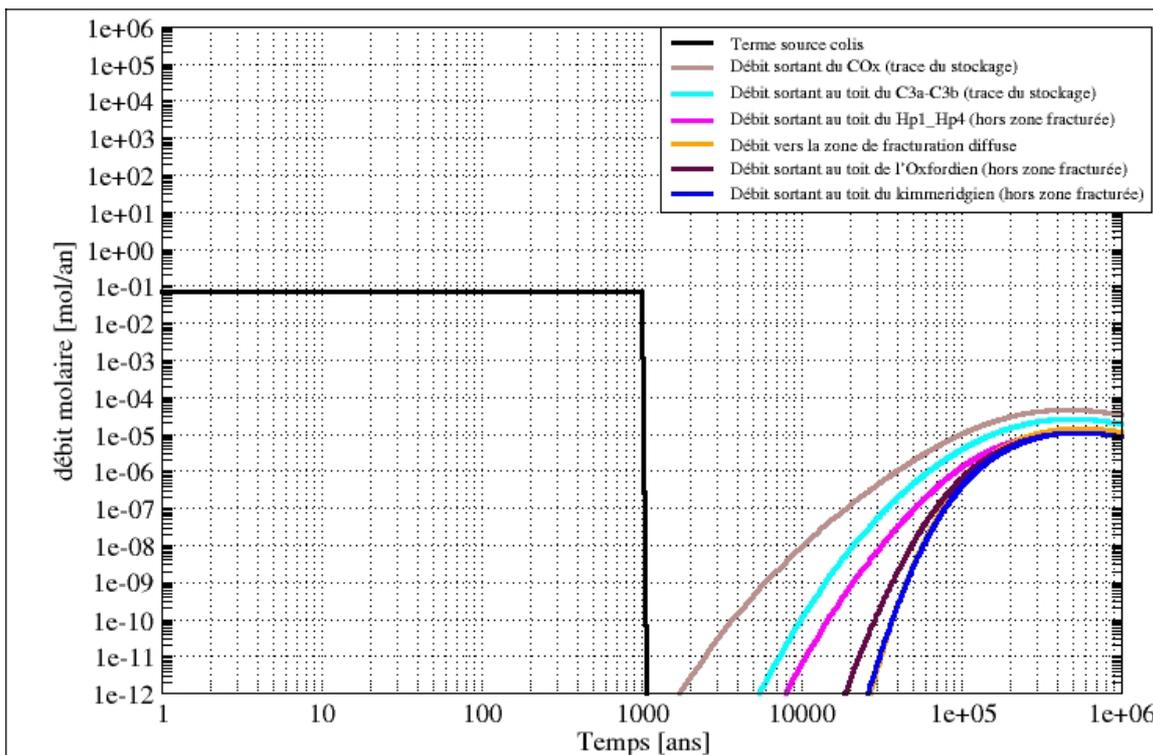


Figure 5.4-49 SEN - Sensibilité au modèle de référence retenu pour les colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (modèle pénalisant) - colis type B1x - ^{36}Cl - historique de débit molaire [Calcul de référence]



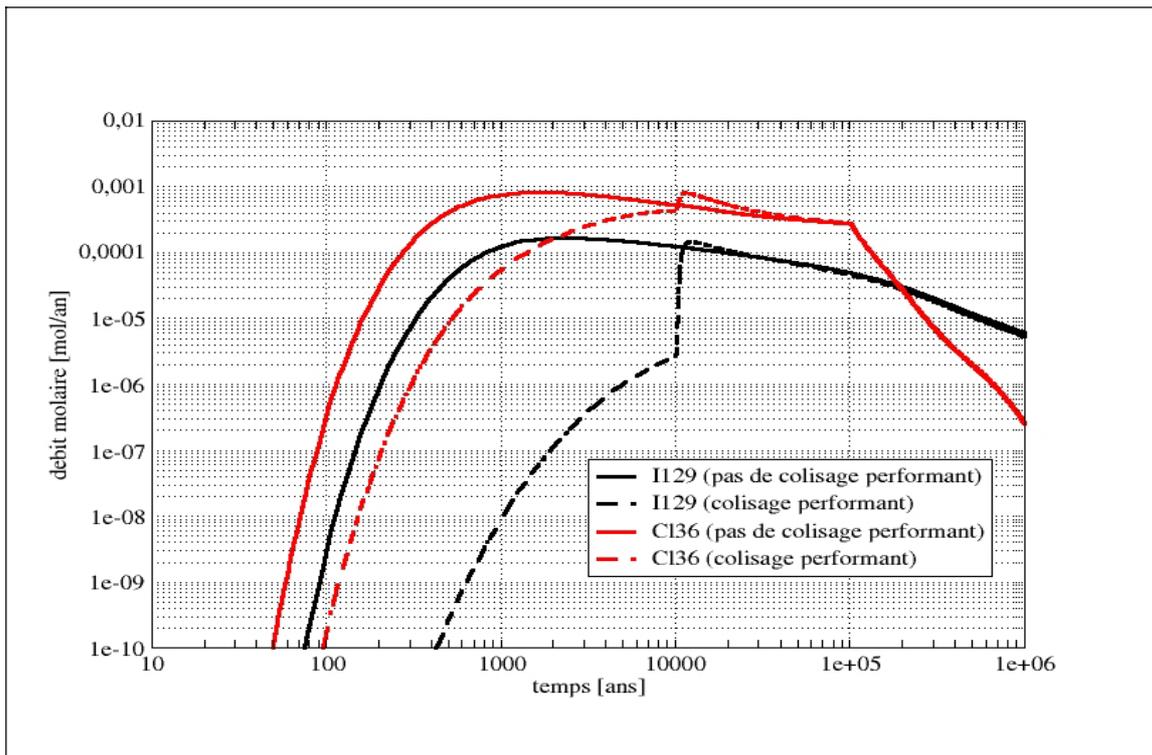


Figure 5.4-51 SEN - Evolution du débit molaire sortant des alvéoles de déchets B1x pour ^{129}I et ^{36}Cl - comparaison avec et sans conteneurage efficace

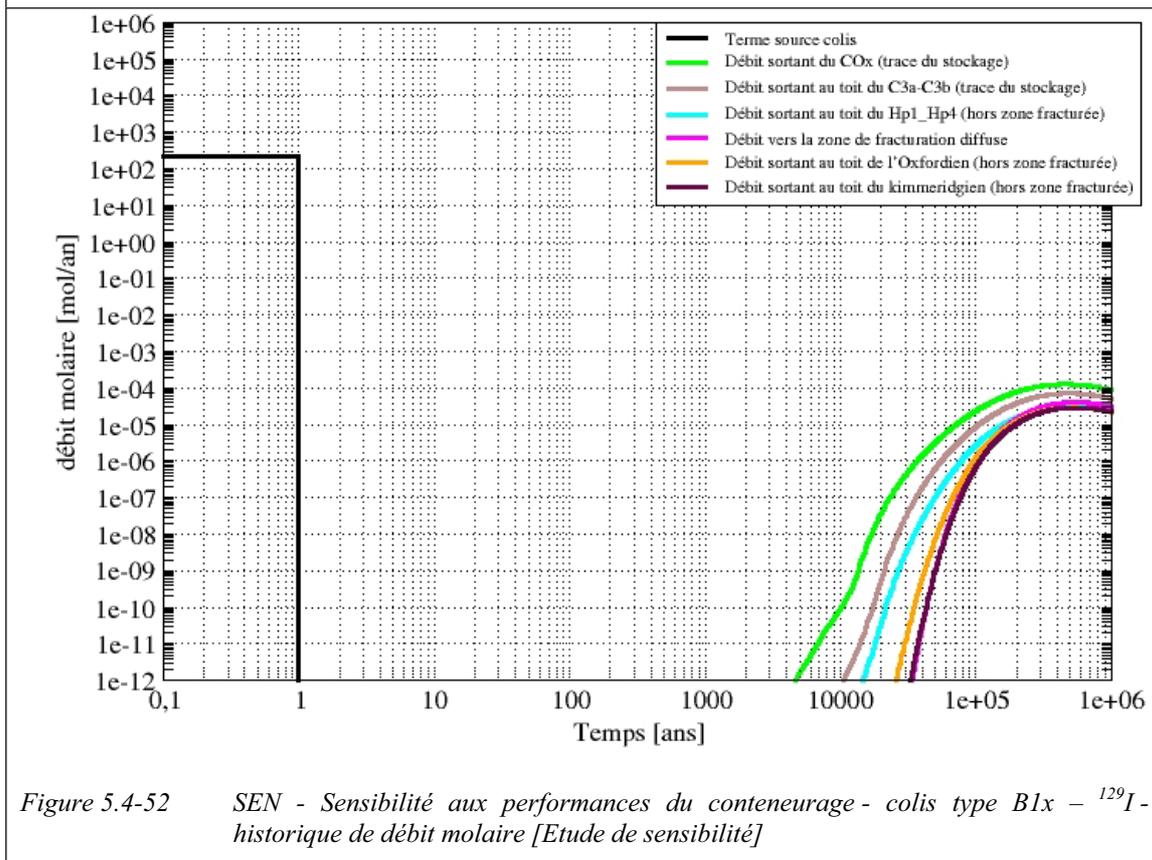


Figure 5.4-52 SEN - Sensibilité aux performances du conteneurage - colis type B1x - ^{129}I - historique de débit molaire [Etude de sensibilité]

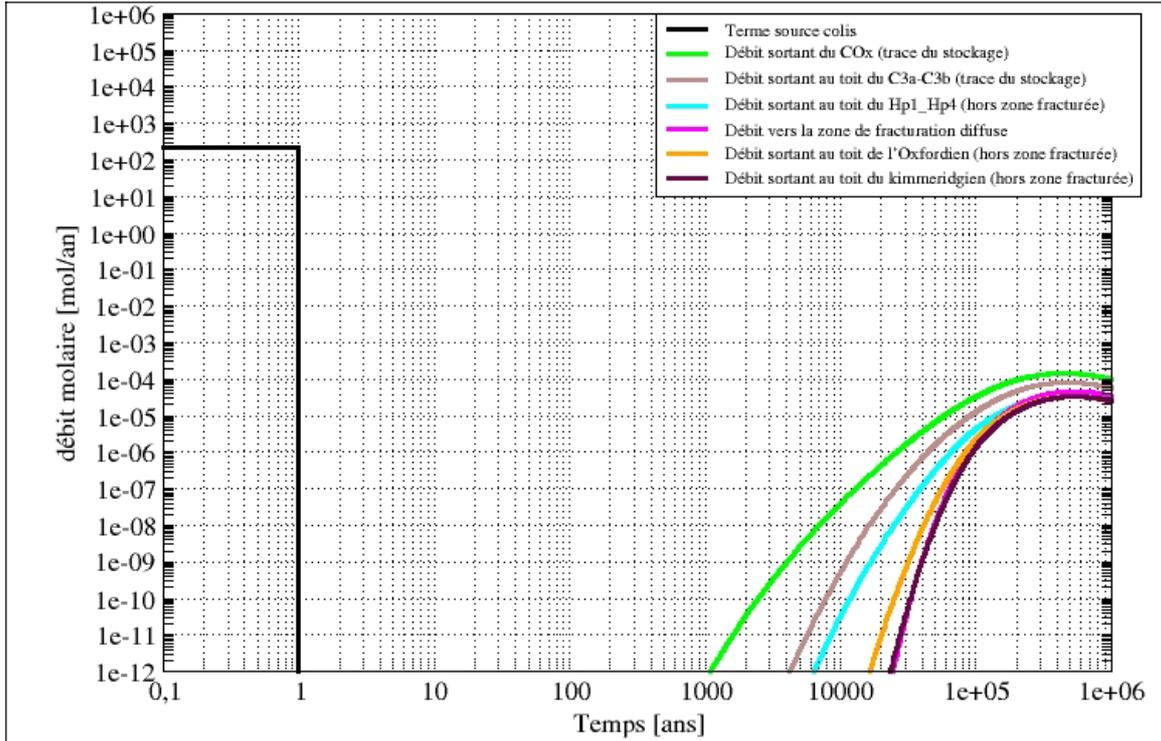


Figure 5.4-52 SEN - Sensibilité aux performances du conteneurage - colis type B1x - ^{129}I - historique de débit molaire [Calcul de référence]

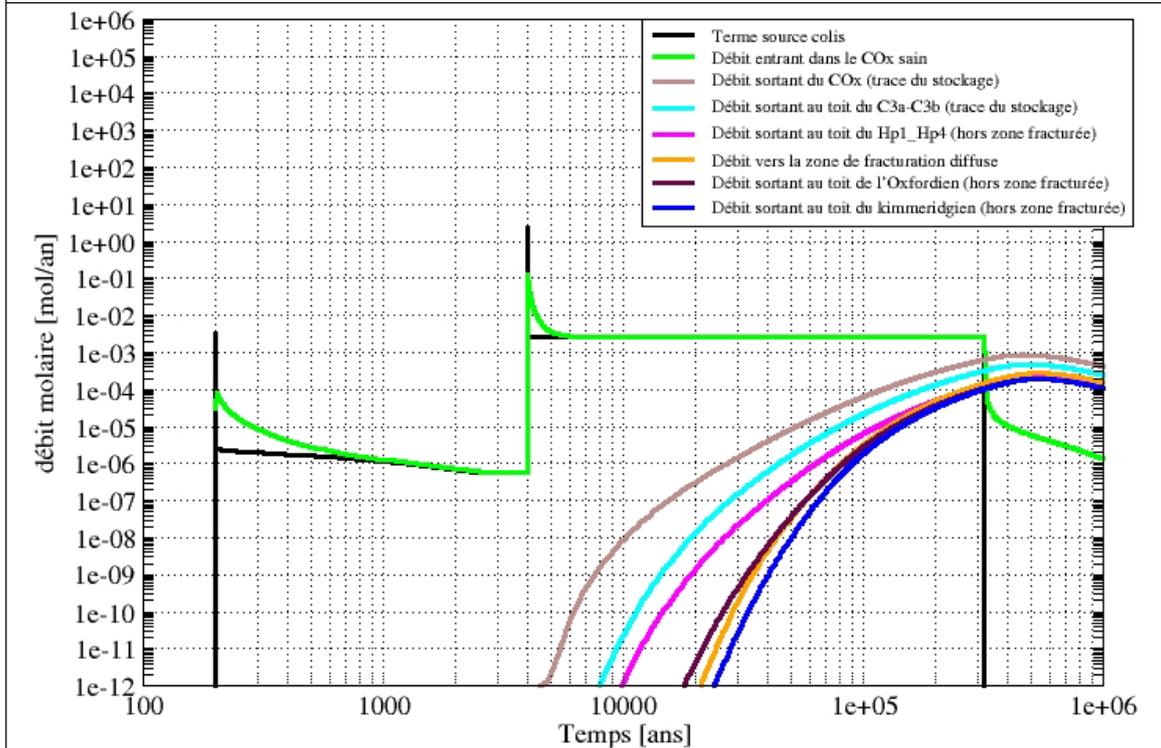


Figure 5.4-53 SEN - Sensibilité aux paramètres du terme source de référence des colis C (modèle $V_0 \cdot S \rightarrow V_r$) - colis type C1 + C2 - ^{129}I - historique de débit molaire [Etude de sensibilité]

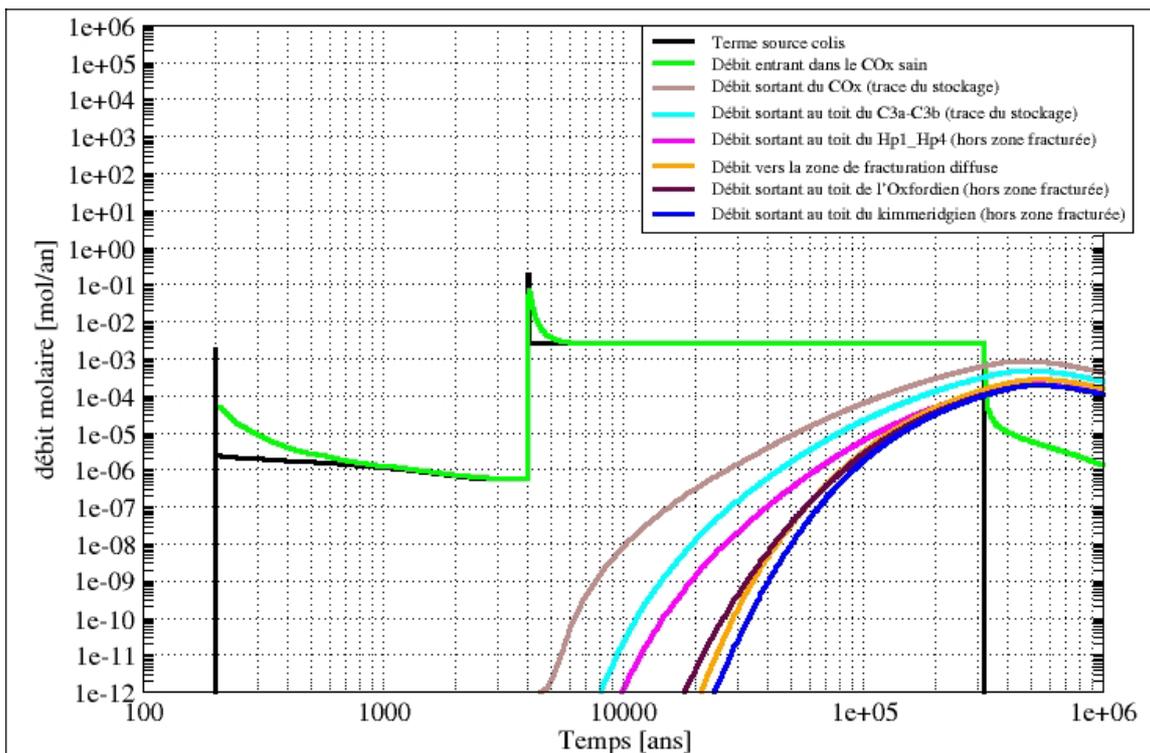


Figure 5.4-53 *SEN - Sensibilité aux paramètres du terme source de référence des colis C (modèle $V_0.S \rightarrow V_r$) - colis type C1 + C2 - ^{129}I - historique de débit molaire [Calcul de référence]*

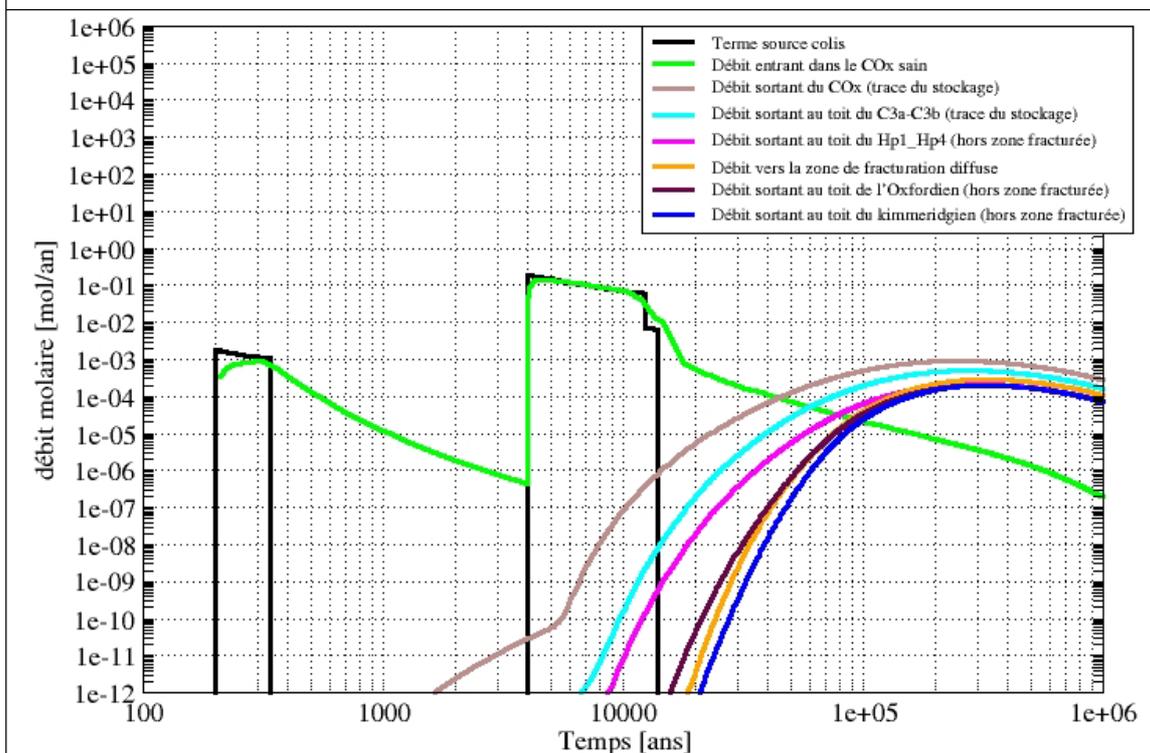


Figure 5.4-54 *SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis C (modèle $V_0.S$) - colis type C1 + C2 - ^{129}I - Historique de débit molaire [Etude de sensibilité]*

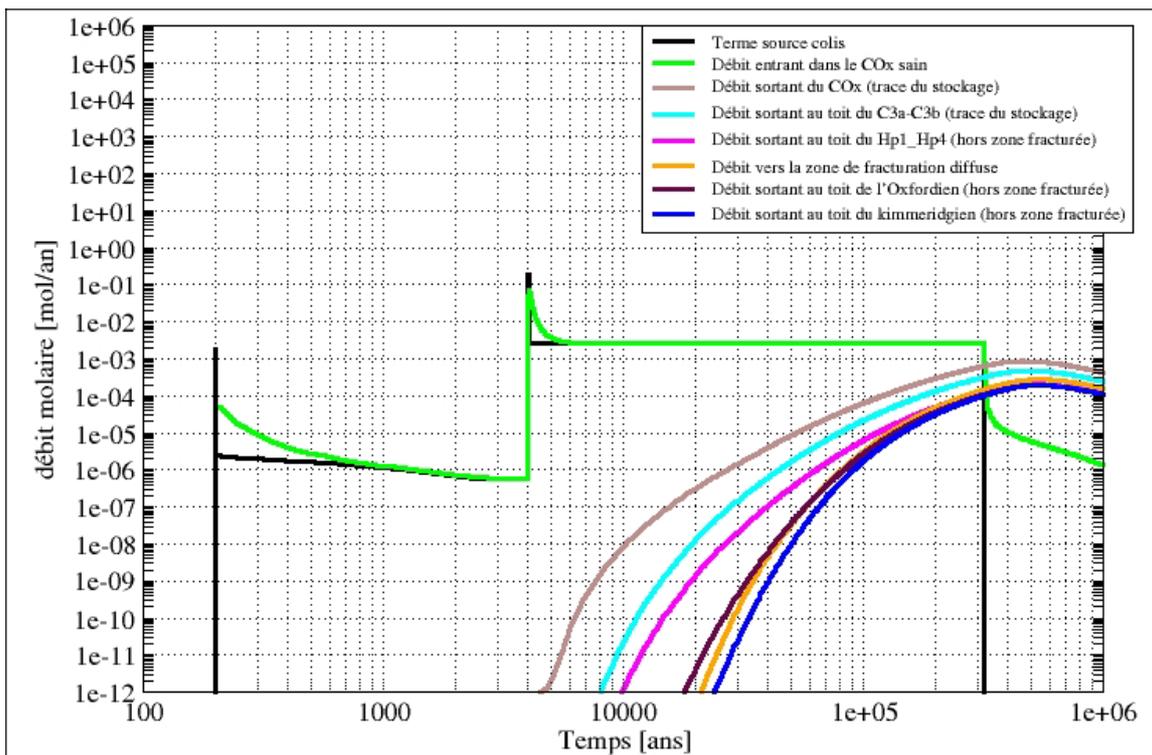


Figure 5.4-54 SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis C (modèle $V_0.S$) - colis type C1 + C2 - ^{129}I - Historique de débit molaire [Calcul de référence]

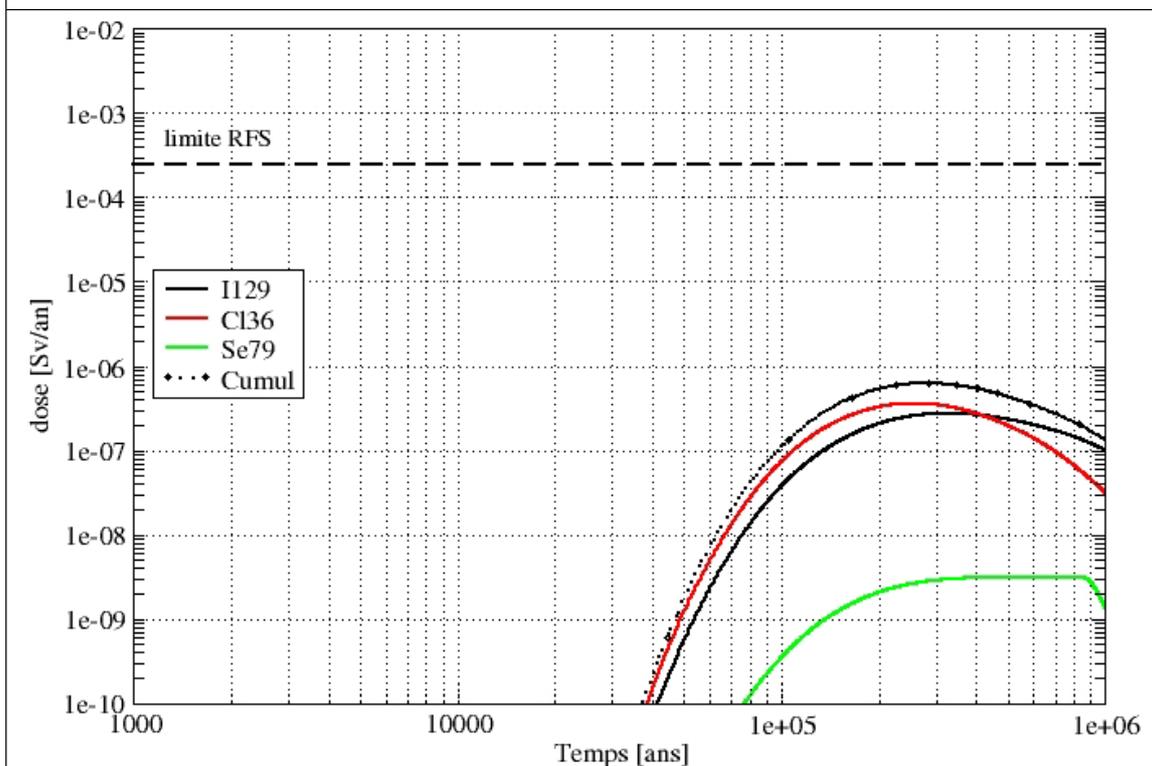


Figure 5.4-55 SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis C (modèle $V_0.S$) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - colis type C1 + C2 [Etude de sensibilité]

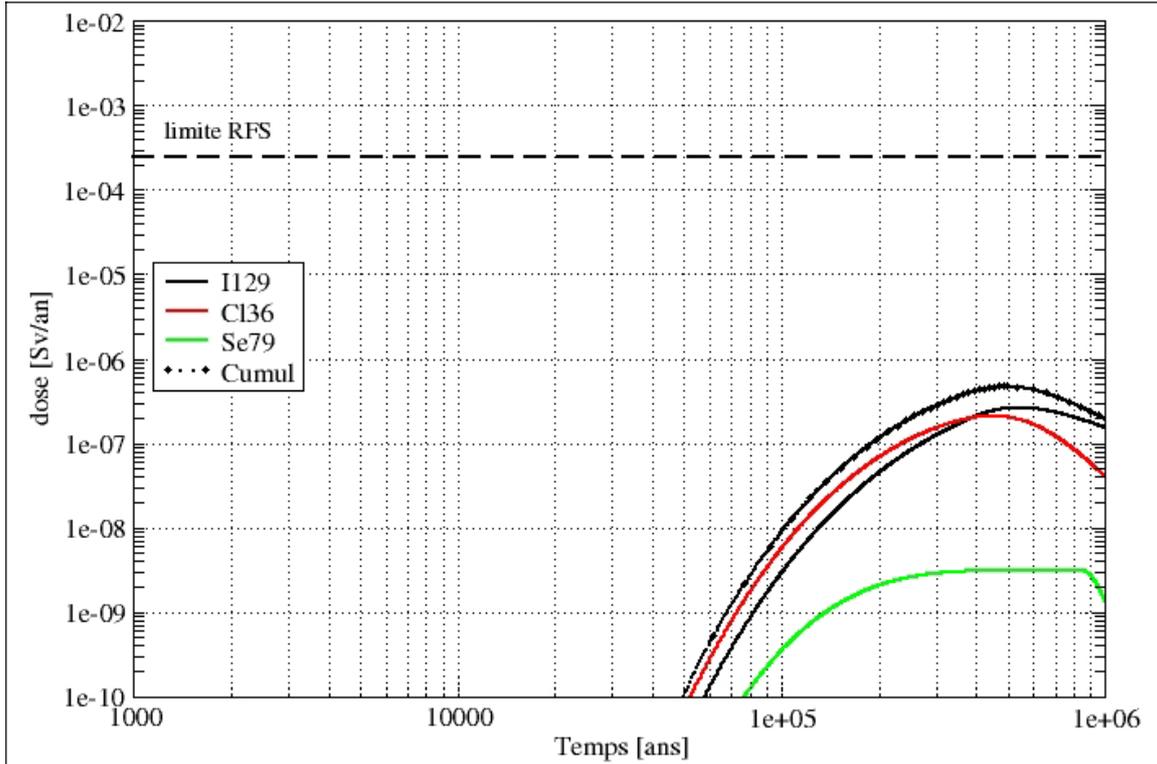


Figure 5.4-55 SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis C (modèle $V_0.S$) - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - colis type C1 + C2 [Calcul de référence]

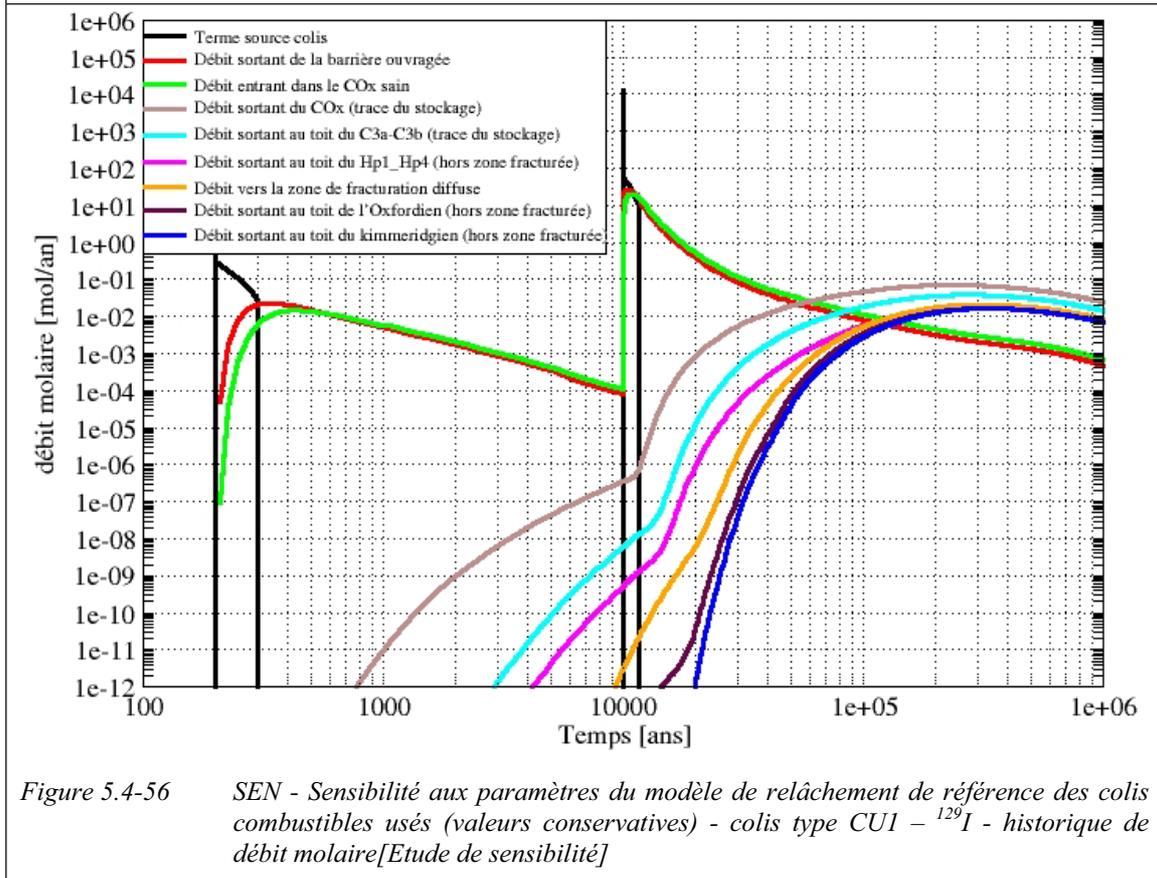


Figure 5.4-56 SEN - Sensibilité aux paramètres du modèle de relâchement de référence des colis combustibles usés (valeurs conservatives) - colis type CU1 - ^{129}I - historique de débit molaire [Etude de sensibilité]

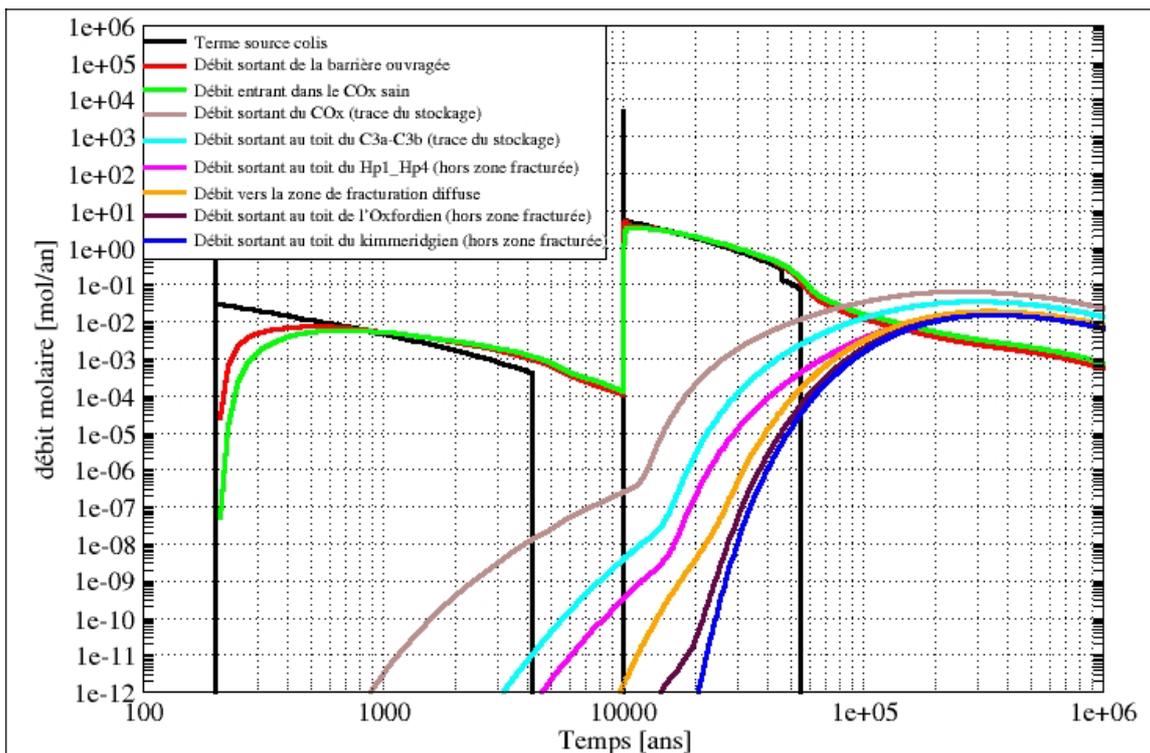


Figure 5.4-56 *SEN - Sensibilité aux paramètres du modèle de relâchement de référence des colis combustibles usés (valeurs conservatives) - colis type CU1 - ^{129}I - historique de débit molaire [Calcul de référence]*

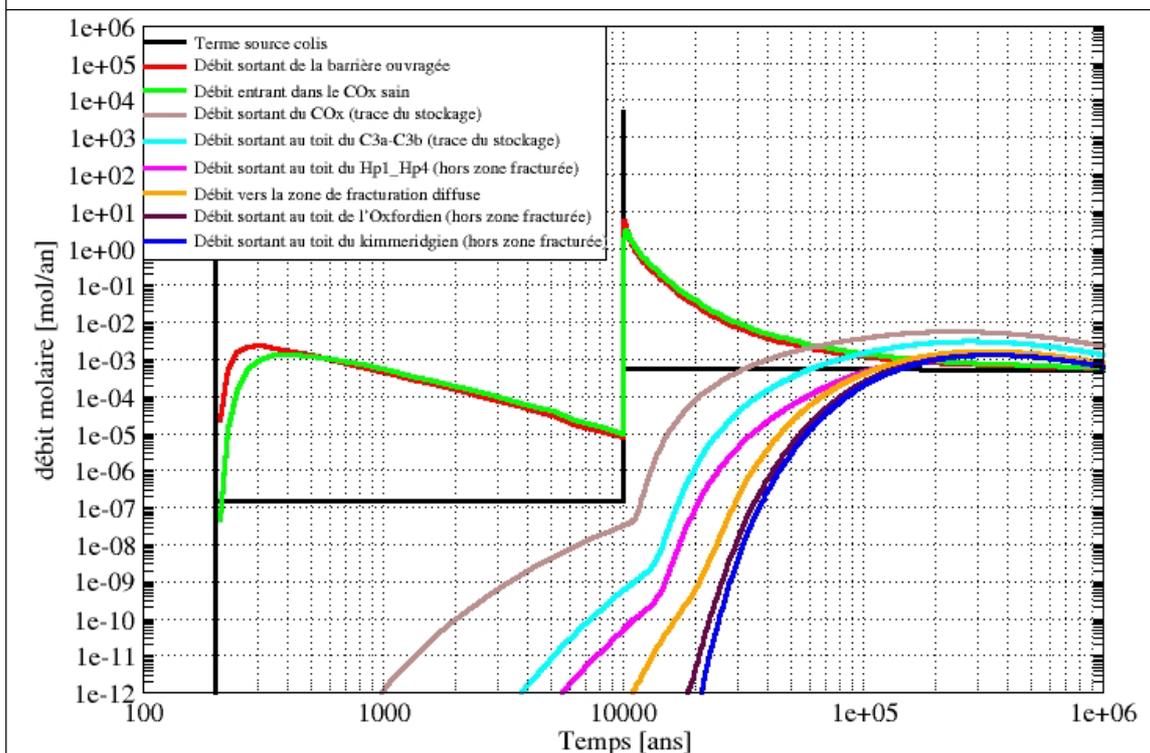


Figure 5.4-57 *SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis combustibles usés (contrôle par la solubilité de l'uranium) - colis type CU1 - ^{129}I - historique de débit molaire [Etude de sensibilité]*

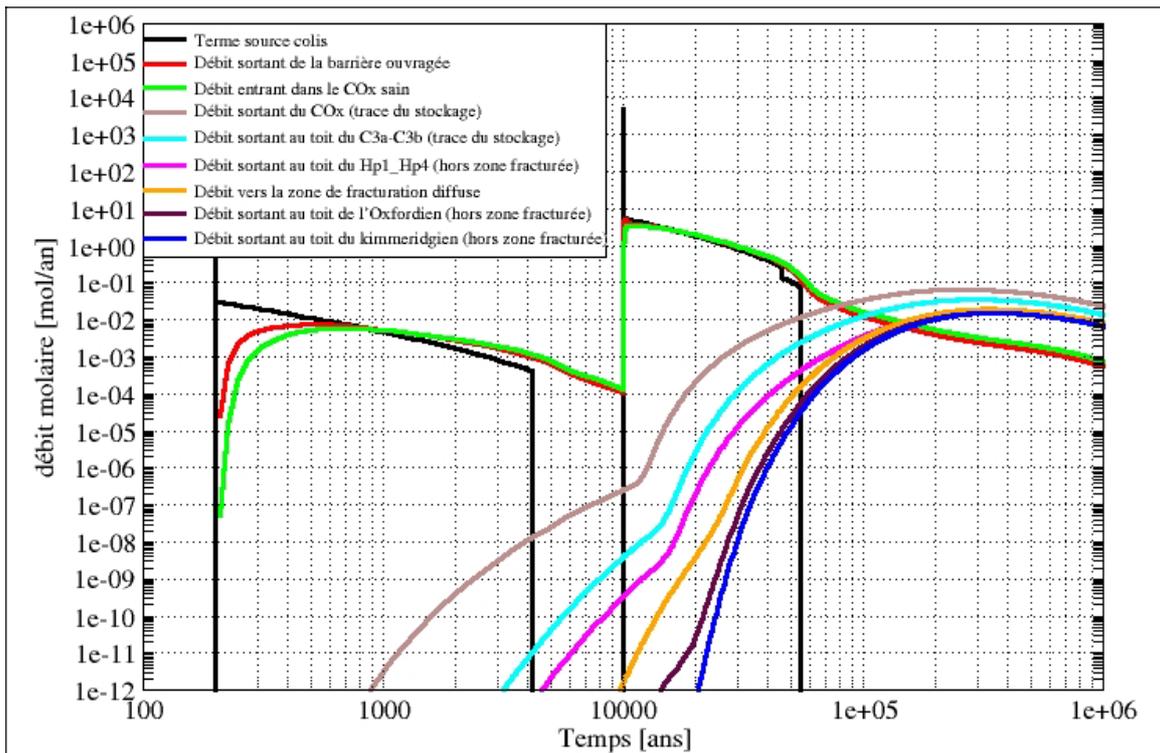


Figure 5.4-57 SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis combustibles usés (contrôle par la solubilité de l'uranium) - colis type CU1 - ^{129}I - historique de débit molaire [Calcul de référence]

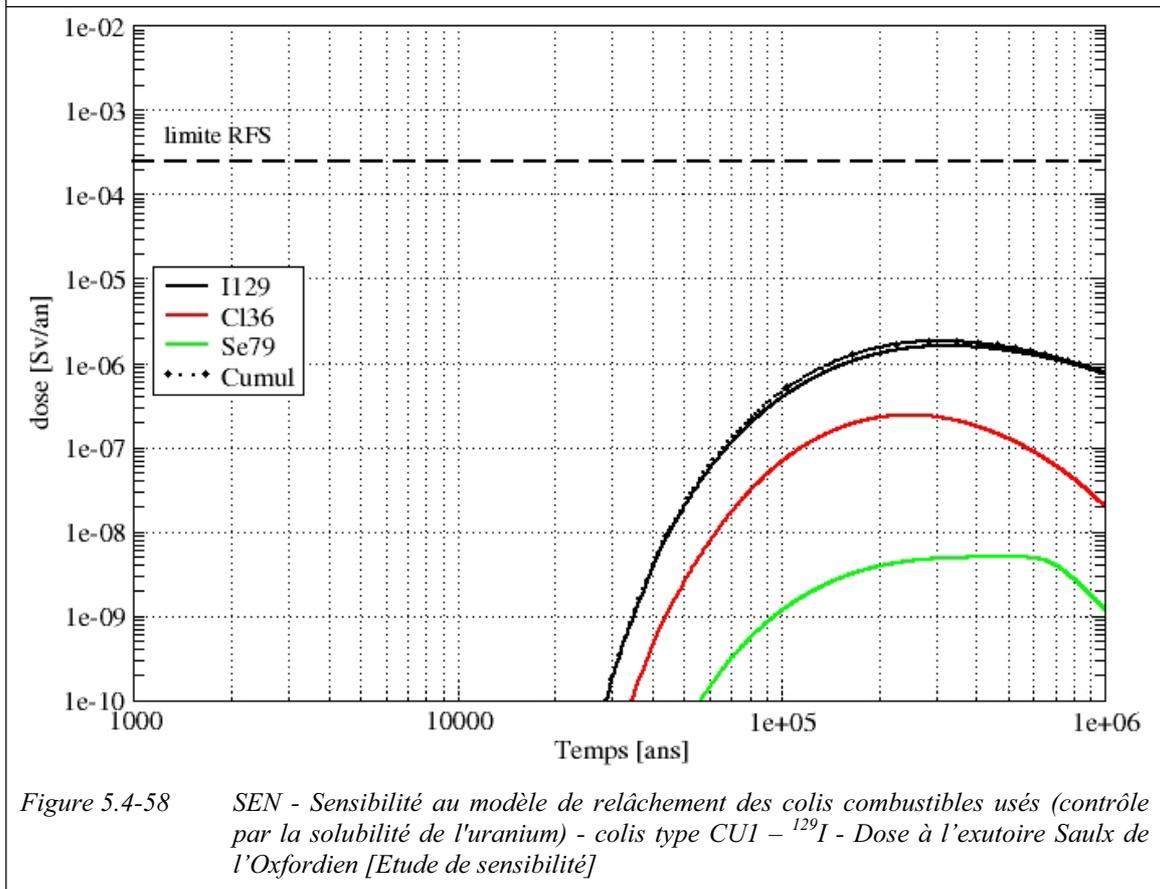


Figure 5.4-58 SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis combustibles usés (contrôle par la solubilité de l'uranium) - colis type CU1 - ^{129}I - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien [Etude de sensibilité]

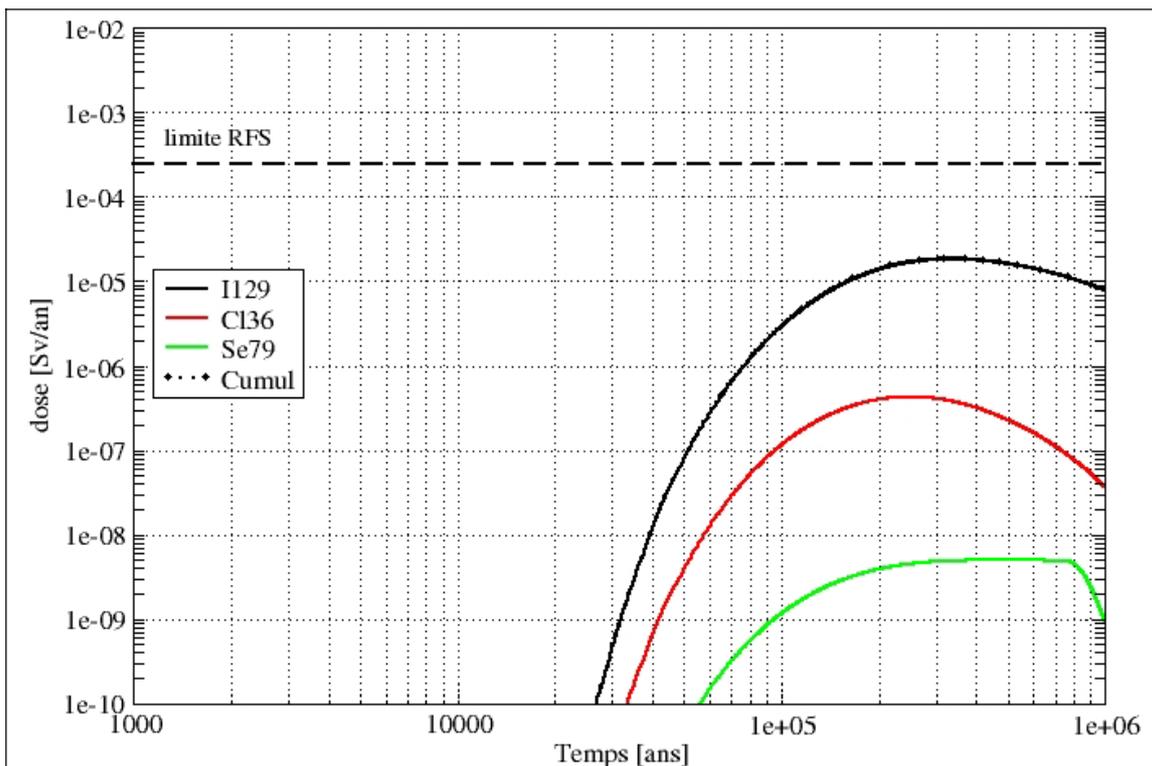


Figure 5.4-58 SEN - Sensibilité au modèle de relâchement des colis combustibles usés (contrôle par la solubilité de l'uranium) - colis type CU1 - ^{129}I - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien [Calcul de référence]

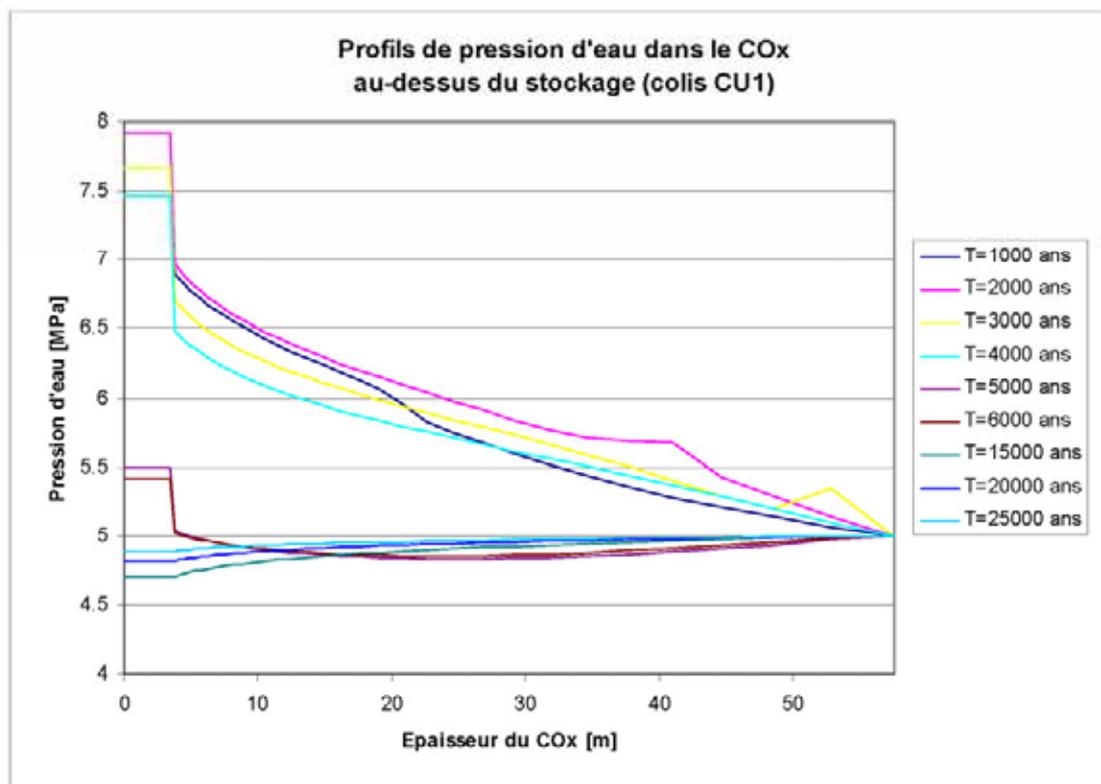


Figure 5.4-59 Pression d'eau dans le Callovo-Oxfordien (COX) au-dessus du stockage – colis type CU1

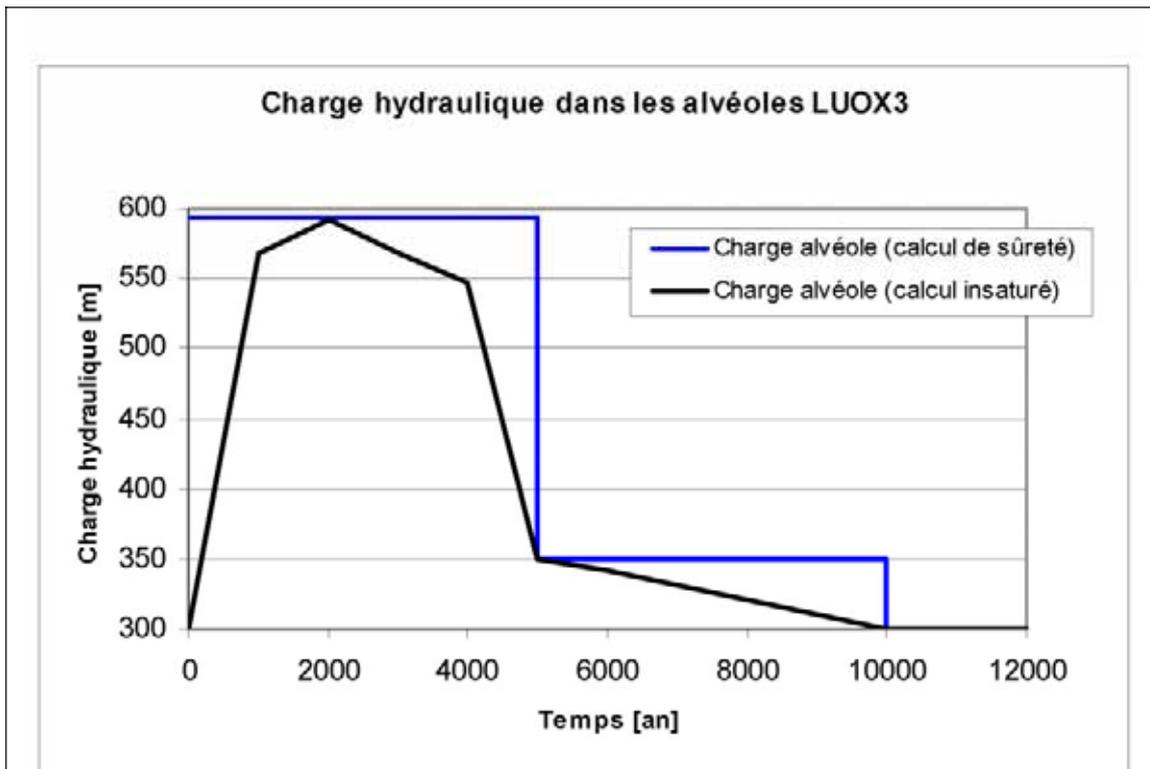


Figure 5.4-60 SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – Charge hydraulique imposée pendant la phase de surpression – colis type CUI

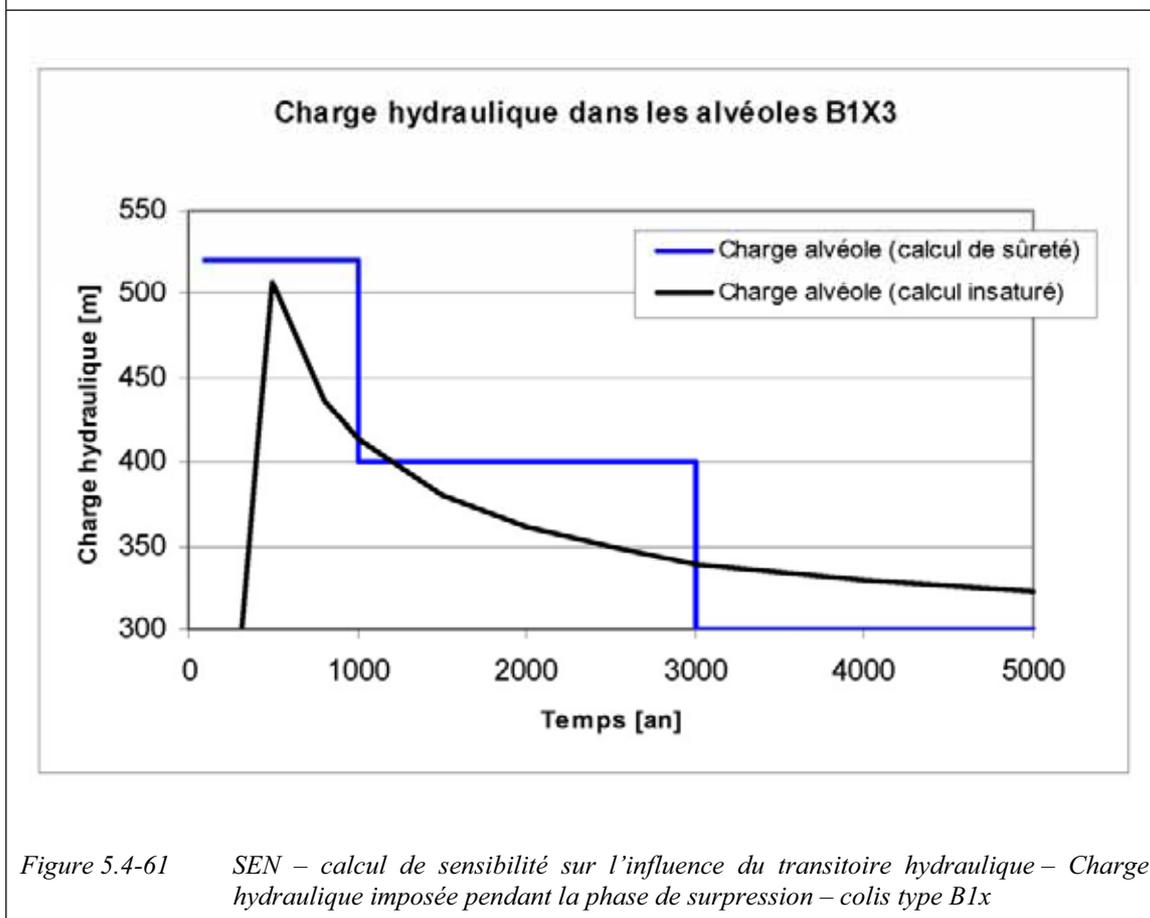


Figure 5.4-61 SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – Charge hydraulique imposée pendant la phase de surpression – colis type B1x

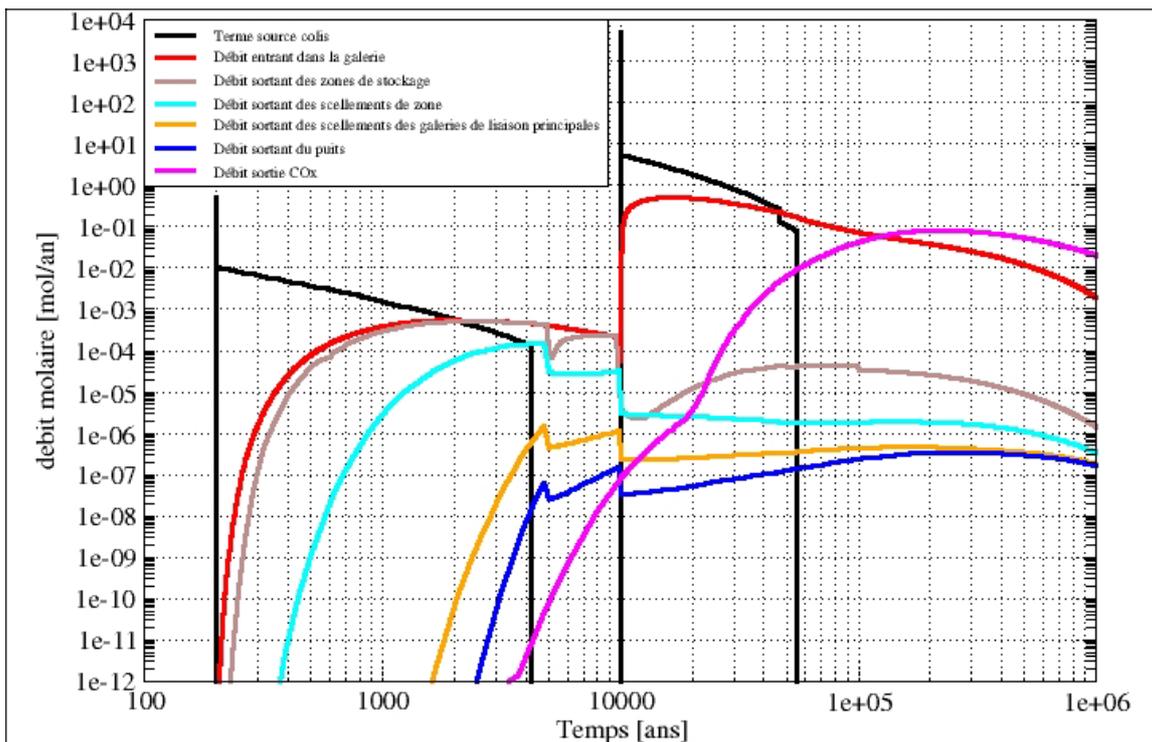


Figure 5.4-63 SEN – calcul de sensibilité sur l’influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – 129I⁻ combustibles usés CU1 [Calcul de sensibilité]

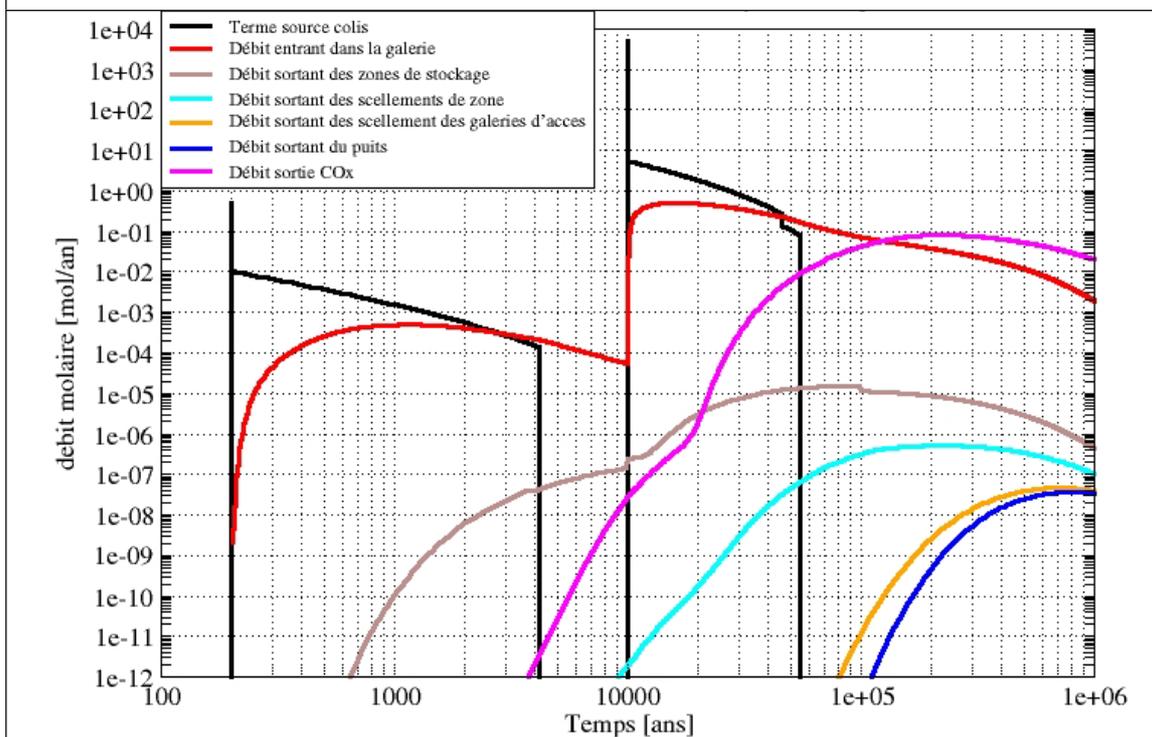


Figure 5.4-63 SEN – calcul de sensibilité sur l’influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – 129I⁻ combustibles usés CU1 [Calcul de référence]

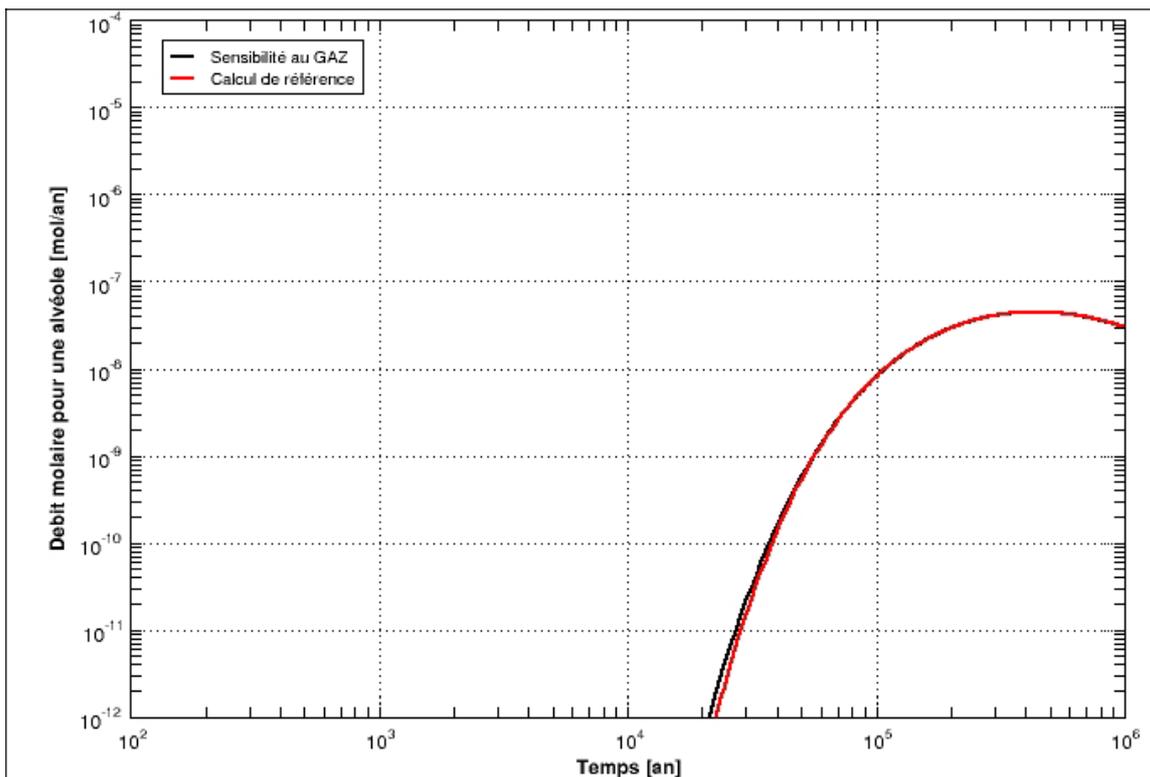


Figure 5.4-64 *SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historiques de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien pour un alvéole de déchet B1x - comparaison des cas avec et sans surpressions hydrauliques – ¹²⁹I*

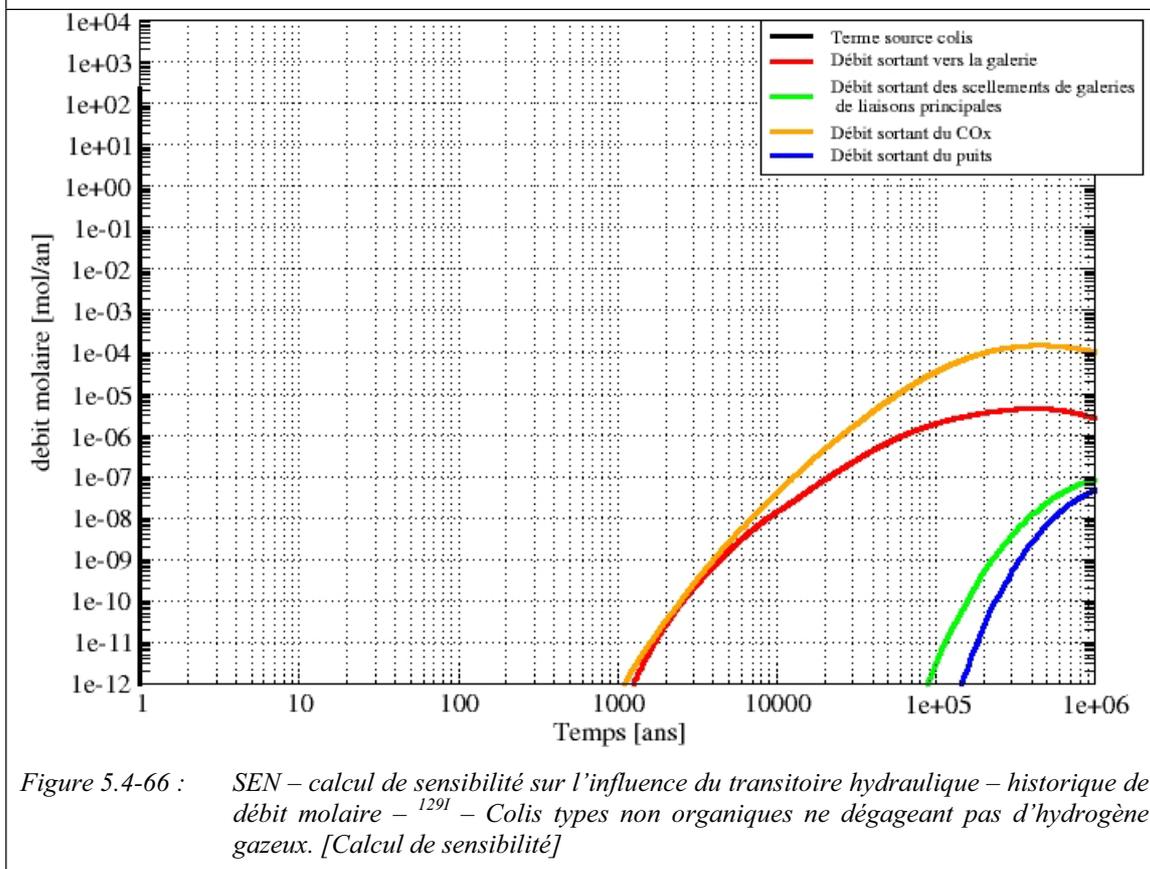


Figure 5.4-66 : *SEN – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – ¹²⁹I – Colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène gazeux. [Calcul de sensibilité]*

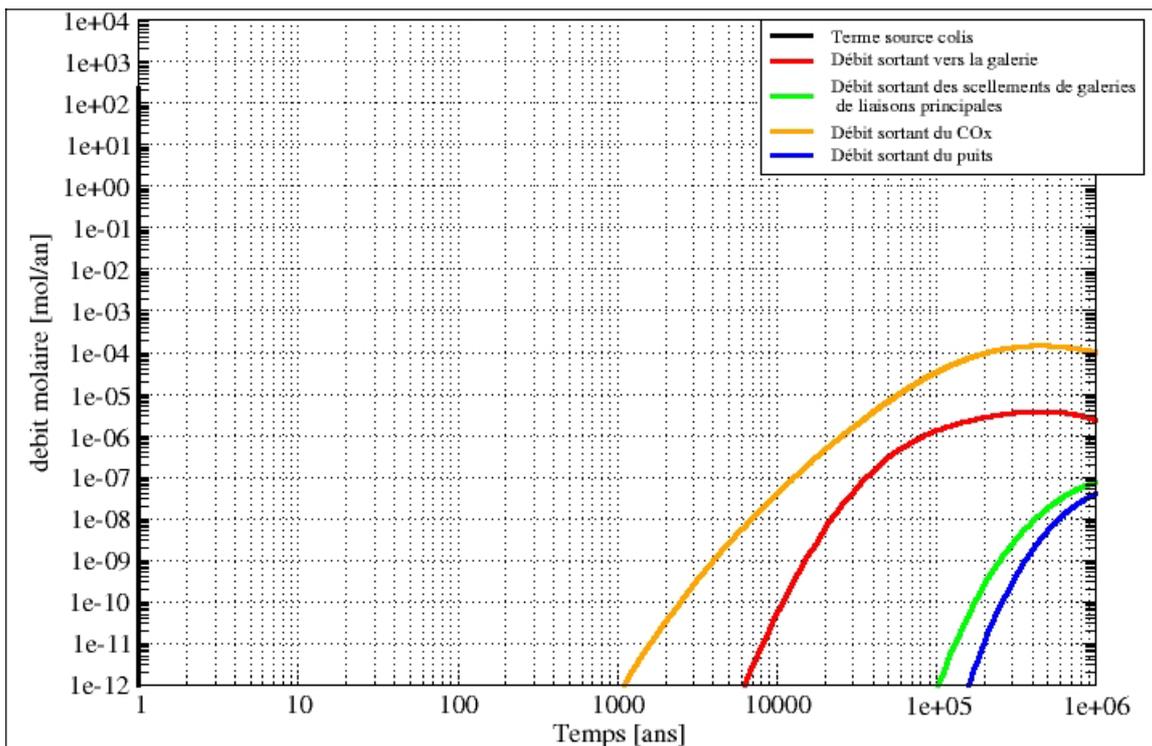


Figure 5.4-66 : SEN – calcul de sensibilité sur l’influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – ¹²⁹I – Colis types non organiques ne dégageant pas d’hydrogène gazeux. [Calcul de sensibilité]

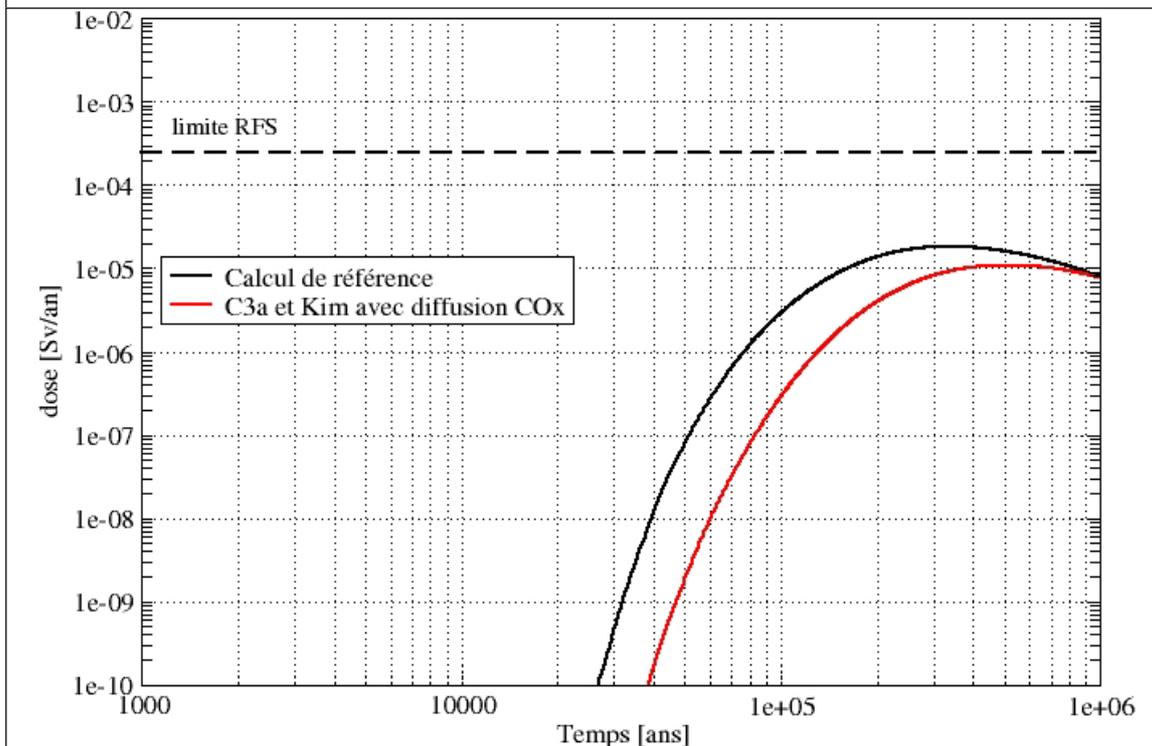


Figure 5.4-67 SEN - Sensibilité aux propriétés diffusives des couches semi-perméables des encaissants sus-jacents - colis type CUI – ¹²⁹I - Dose à l’exutoire Saulx et Ornain de l’Oxfordien – comparaison calcul de référence /étude de sensibilité [Exutoire Saulx]

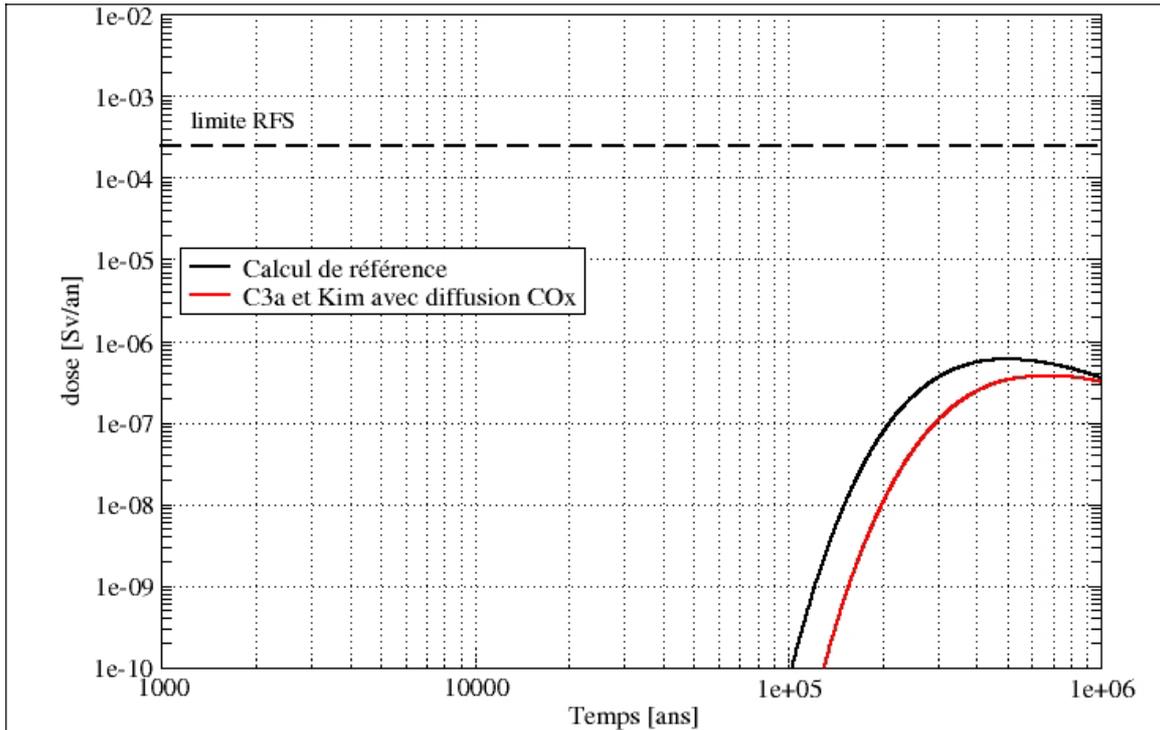


Figure 5.4-67 *SEN - Sensibilité aux propriétés diffusives des couches semi-perméables des encaissants sus-jacents - colis type CUI - ^{129}I - Dose à l'exutoire Saulx et Orvain de l'Oxfordien - comparaison calcul de référence /étude de sensibilité [Exutoire Orvain]*

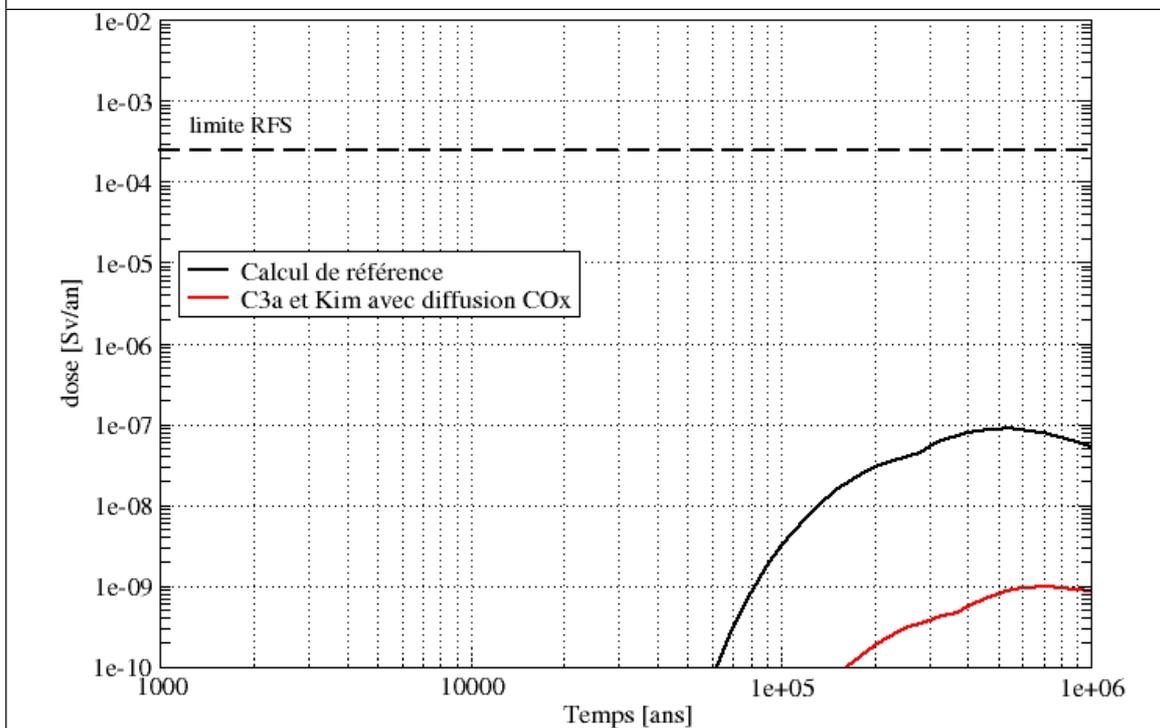


Figure 5.4-68 *SEN - Sensibilité aux propriétés diffusives des couches semi-perméables des encaissants sus-jacents - colis type CUI - ^{129}I - Dose à l'exutoire Barrois - comparaison calcul de référence /étude de sensibilité (H = charge hydraulique en mètres NGF⁷¹)* Figure 5.4-68

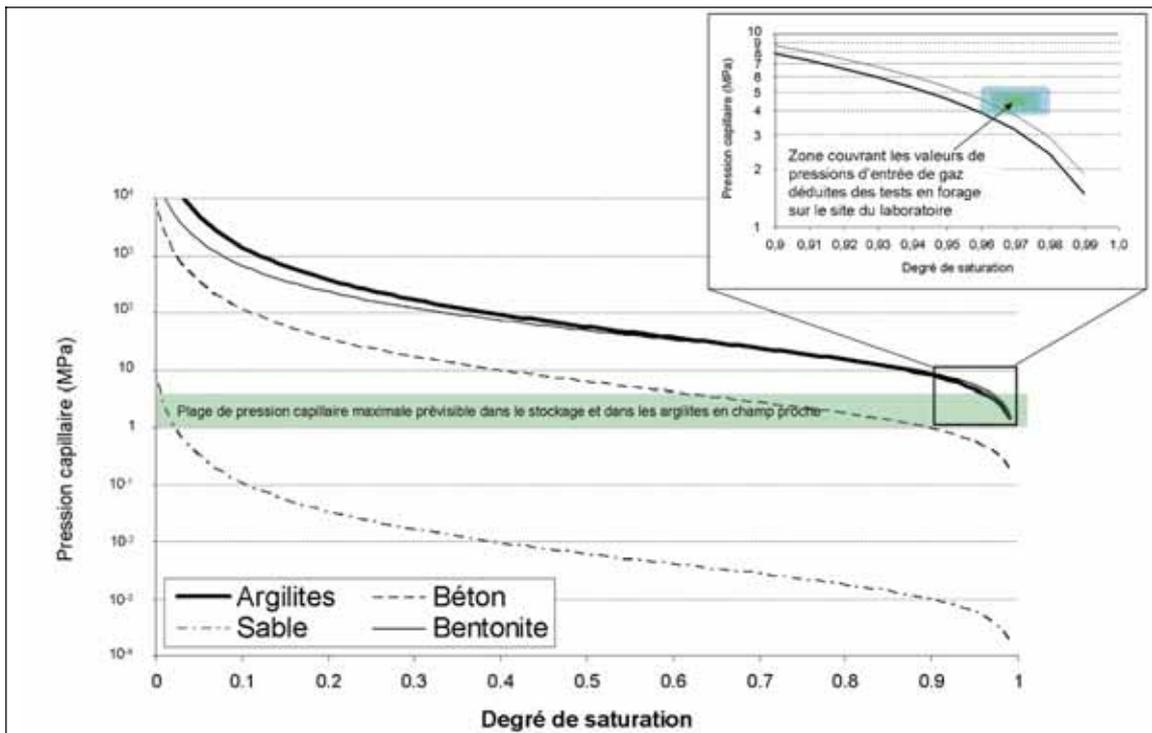


Figure 6.2-6 Succion dans différents milieux poreux en fonction du degré de saturation en eau

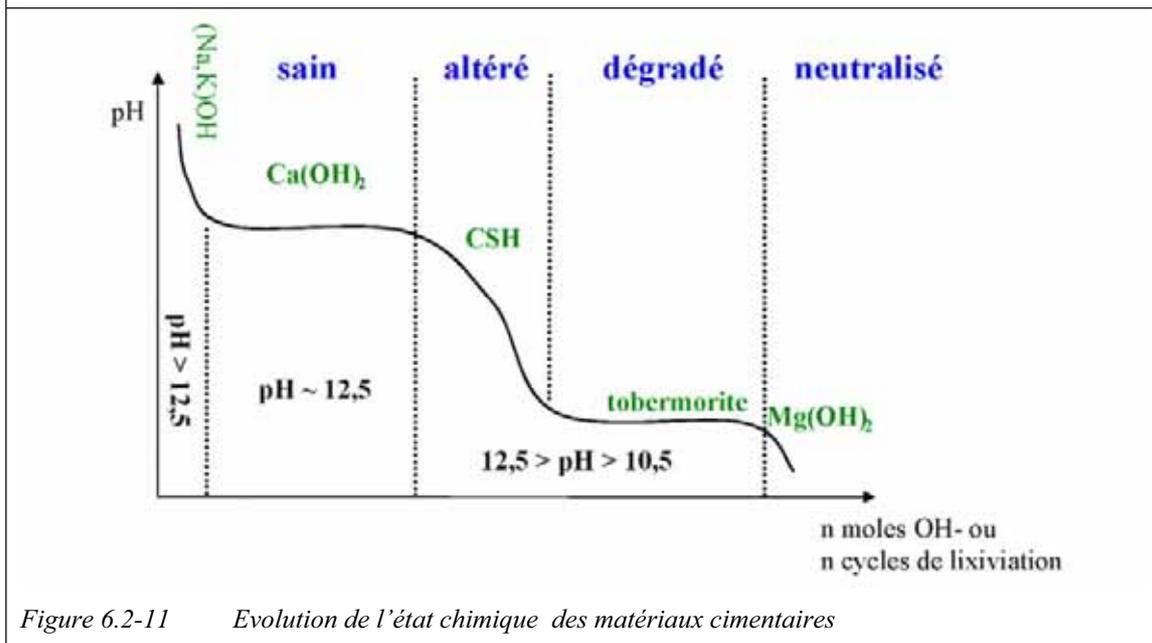


Figure 6.2-11 Evolution de l'état chimique des matériaux cimentaires

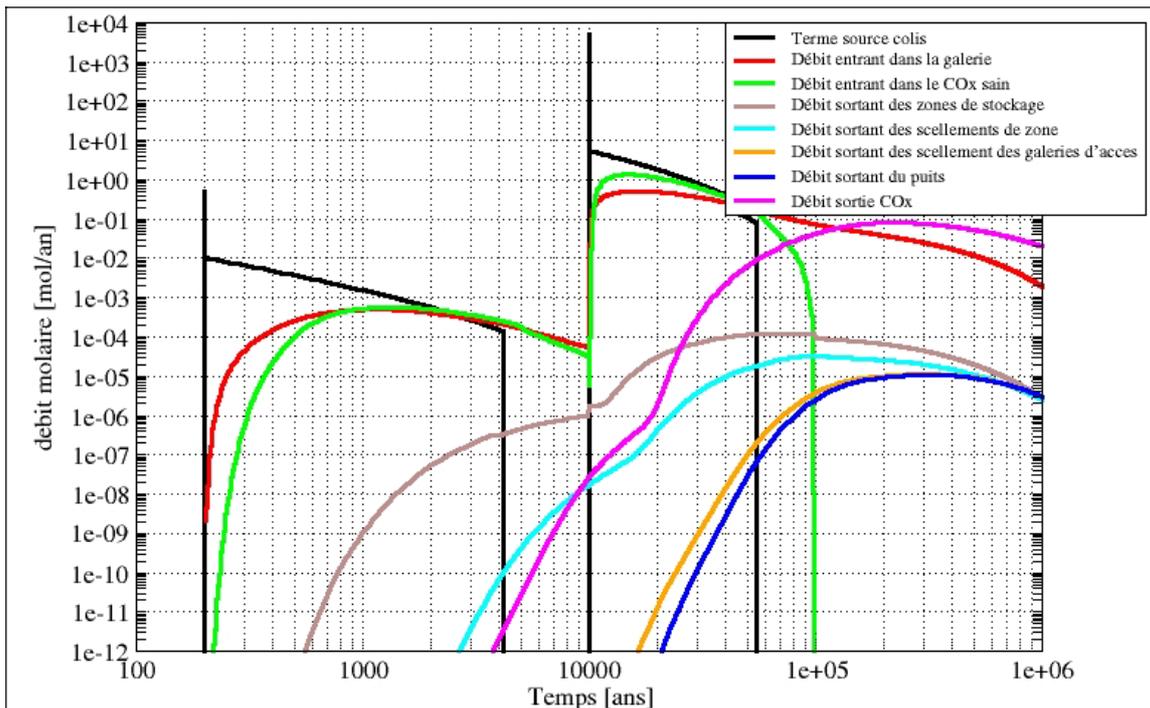


Figure 7.2-16 SEA défaut de scellements - toute situation de défaillance – historique de débit molaire - calcul de référence : colis type CUI-¹²⁹I [Tous scellements défaillants]

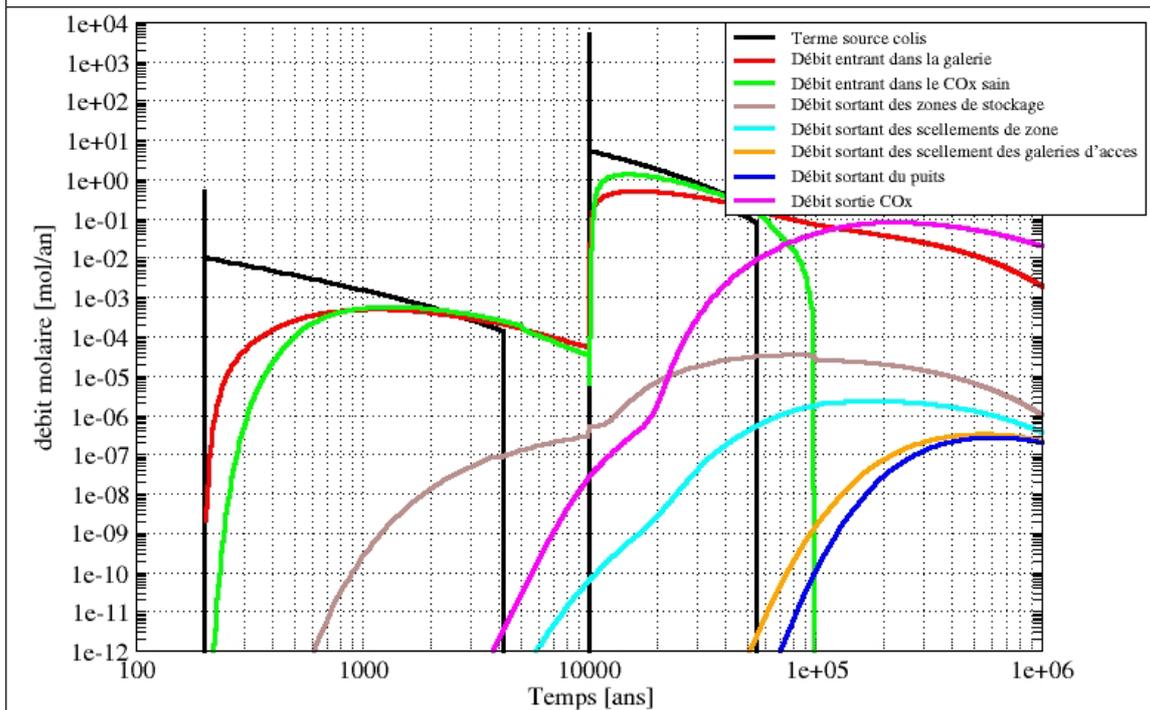


Figure 7.2-16 SEA défaut de scellements - toute situation de défaillance – historique de débit molaire - calcul de référence : colis type CUI-¹²⁹I [Scellements de galeries défaillants]

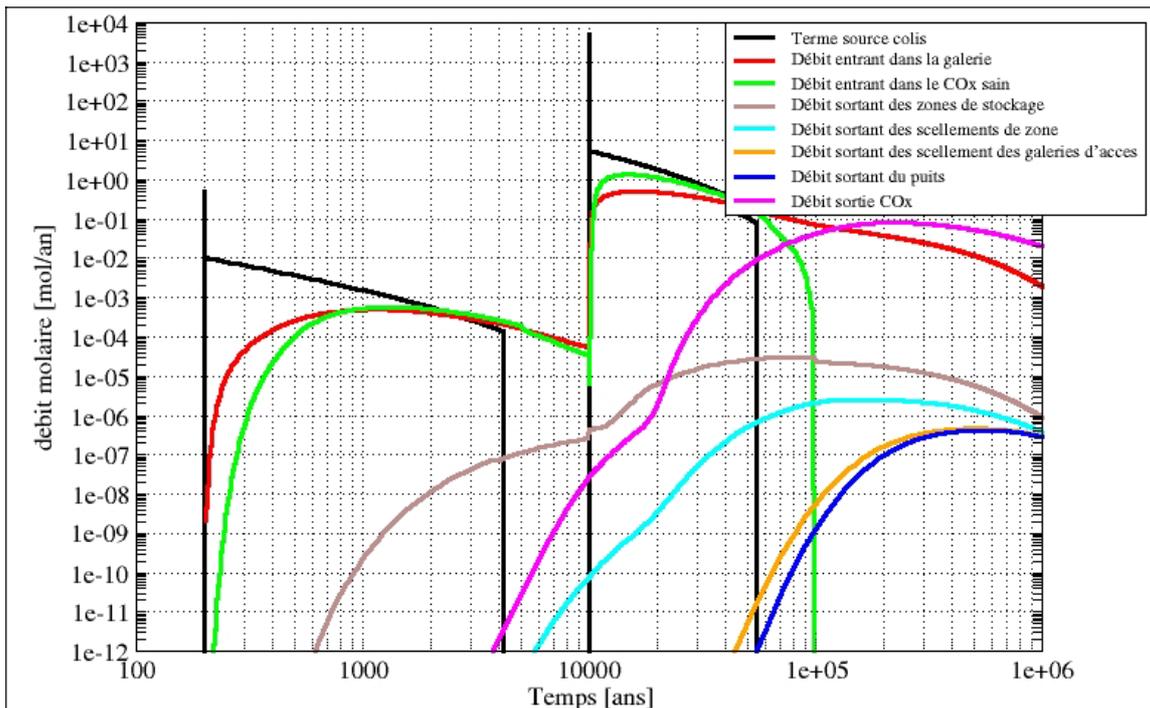


Figure 7.2-16 *SEA défaut de scellements - toute situation de défaillance – historique de débit molaire - calcul de référence : colis type CUI-¹²⁹I [Scellement de puits défaillants]*

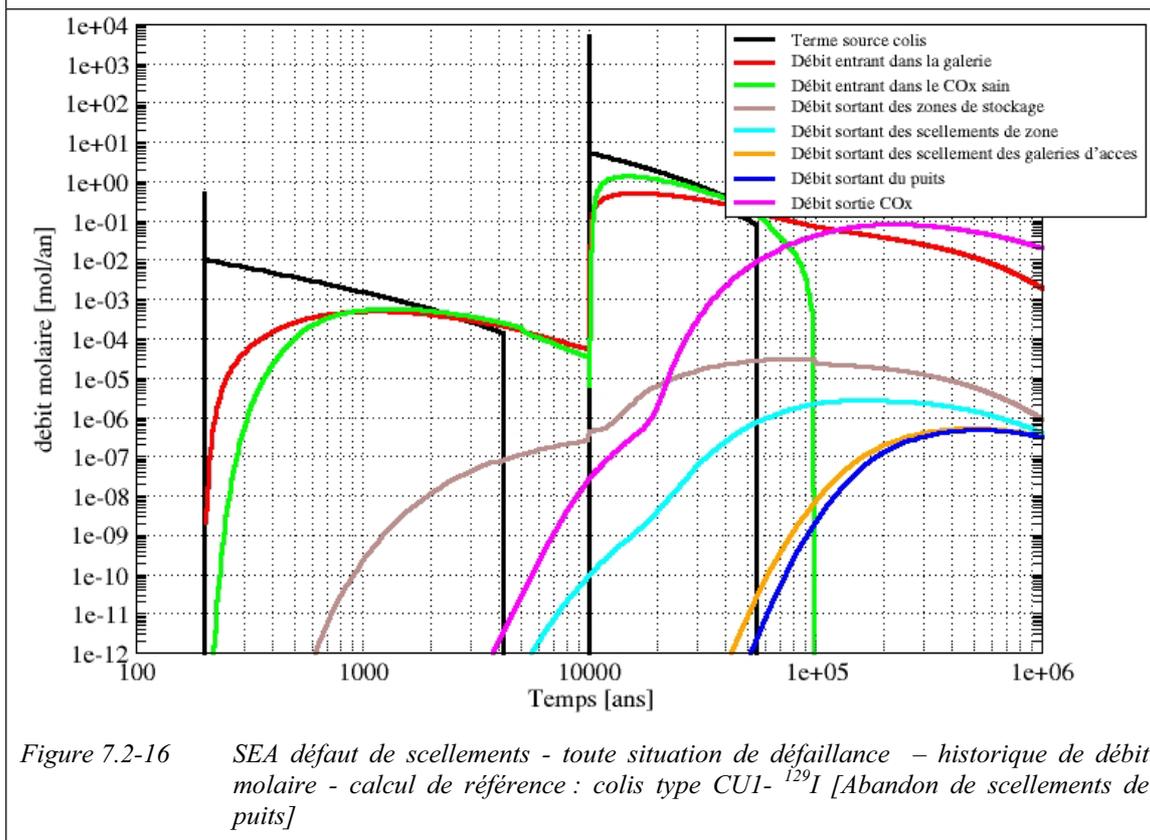


Figure 7.2-16 *SEA défaut de scellements - toute situation de défaillance – historique de débit molaire - calcul de référence : colis type CUI-¹²⁹I [Abandon de scellements de puits]*

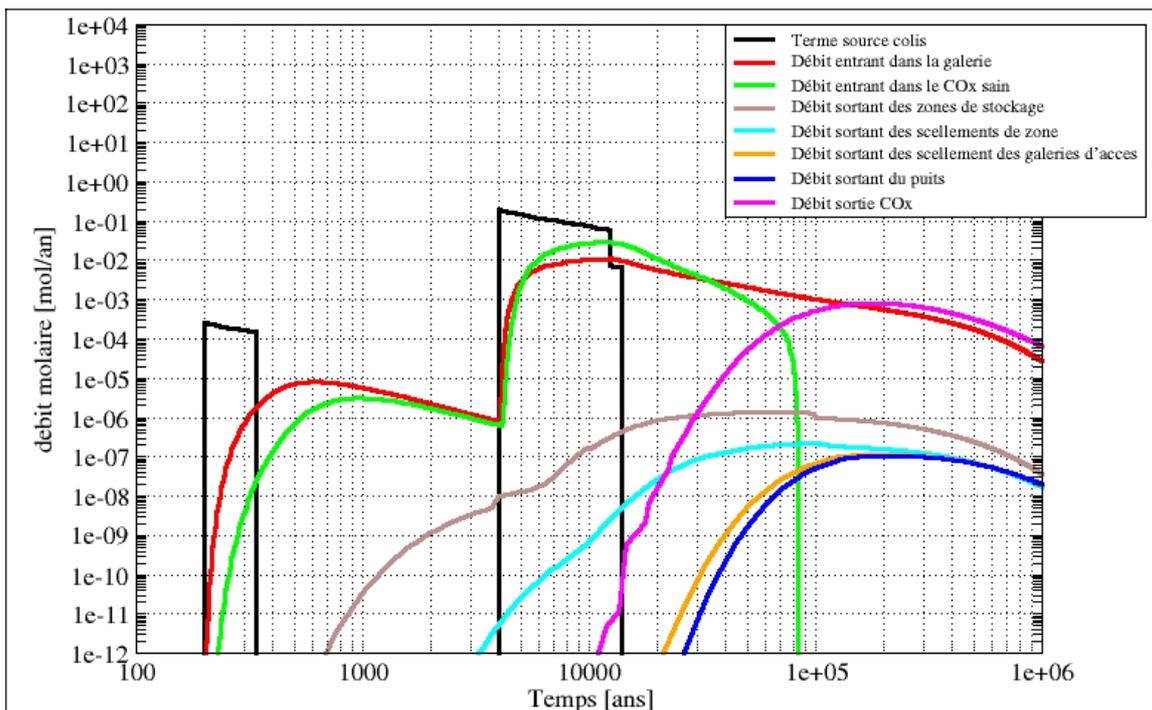


Figure 7.2-18 SEA défaut de scellements - situation de défaillance de tous les scellements – historique de débit molaire - calcul de référence - colis type C1/C2 - ¹²⁹I [Tous scellements défaillants]

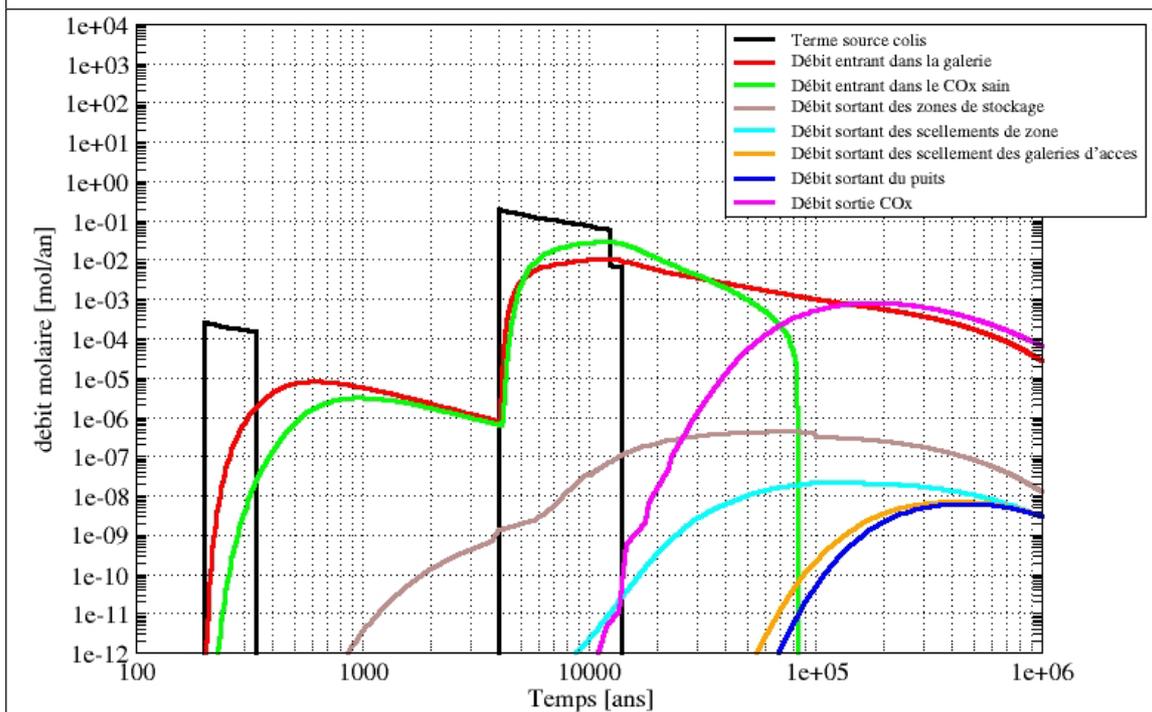


Figure 7.2-18 SEA défaut de scellements - situation de défaillance de tous les scellements – historique de débit molaire - calcul de référence - colis type C1/C2 - ¹²⁹I [Scellement de puits défaillants]

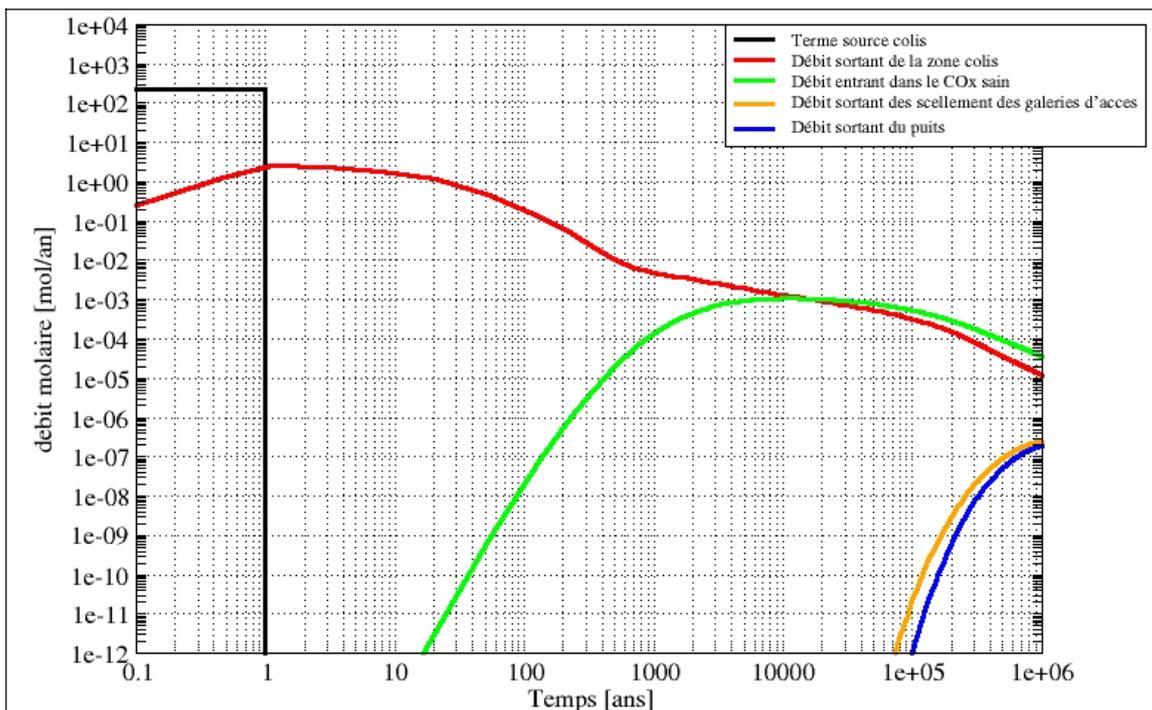


Figure 7.2-20 SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants : calcul de référence - Historique de débit molaire - colis non organiques ne dégagent pas d'hydrogène - ^{129}I et ^{36}Cl [^{129}I]

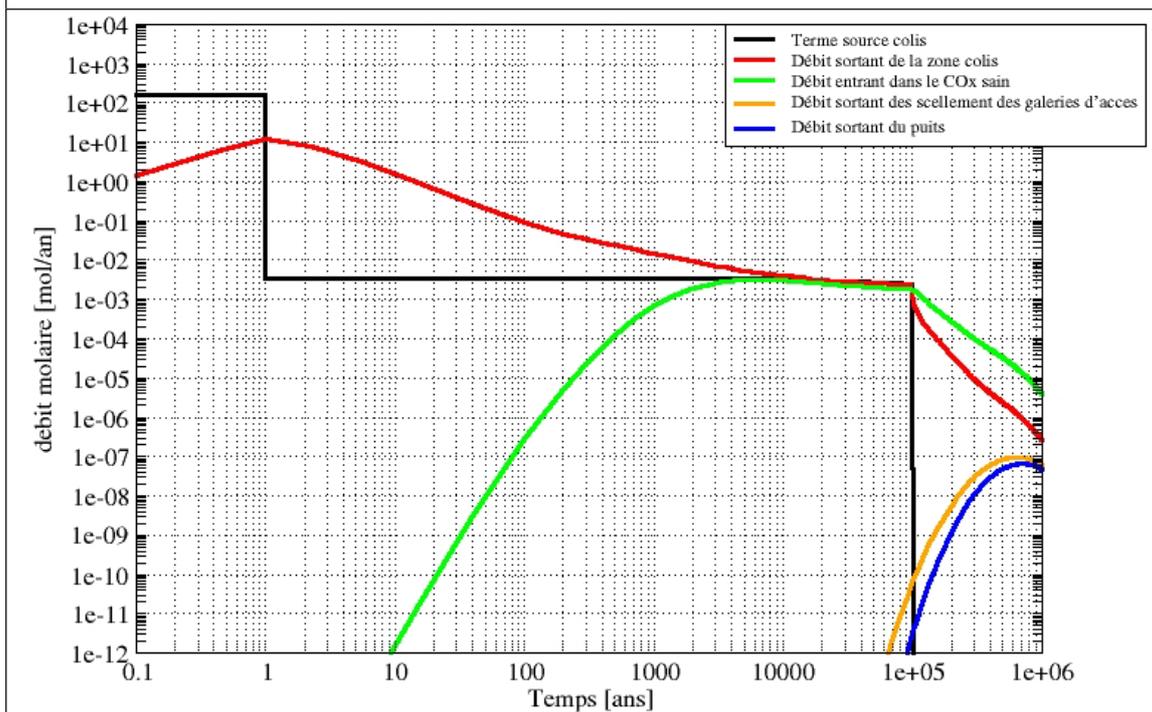


Figure 7.2-20 SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants : calcul de référence - Historique de débit molaire - colis non organiques ne dégagent pas d'hydrogène - ^{129}I et ^{36}Cl [^{36}Cl]

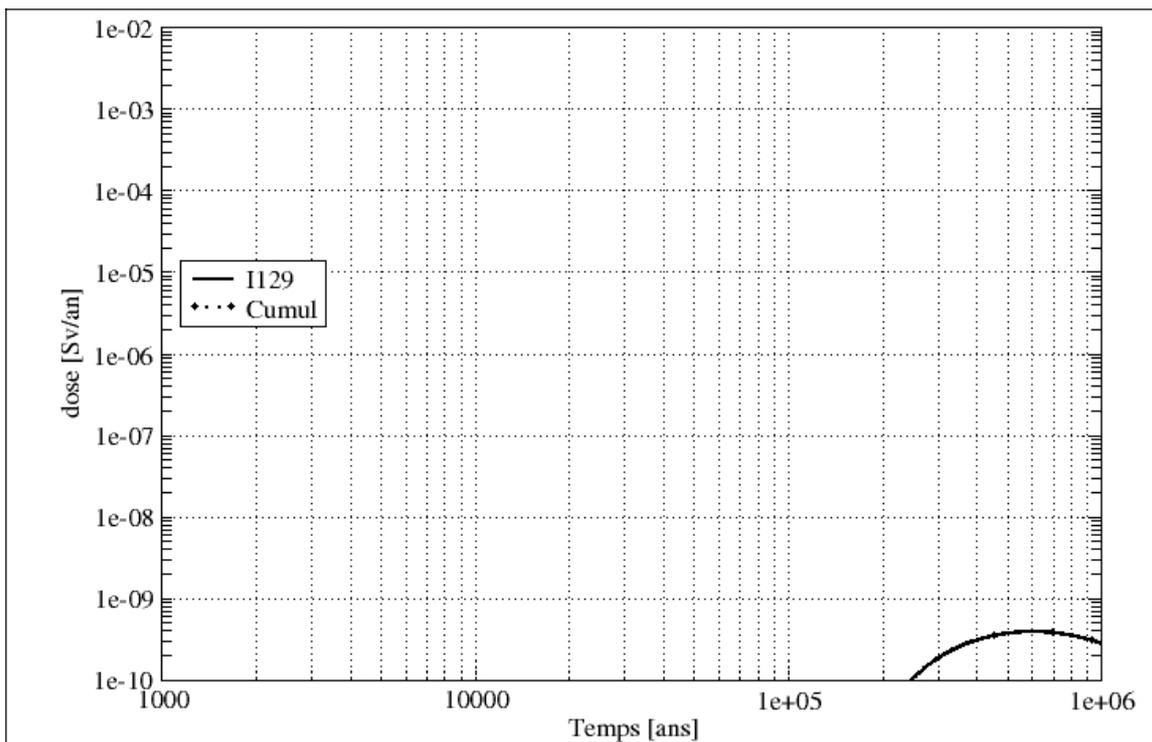


Figure 7.2-21 SEA défaut de scellements - Scellements de puits défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CUI

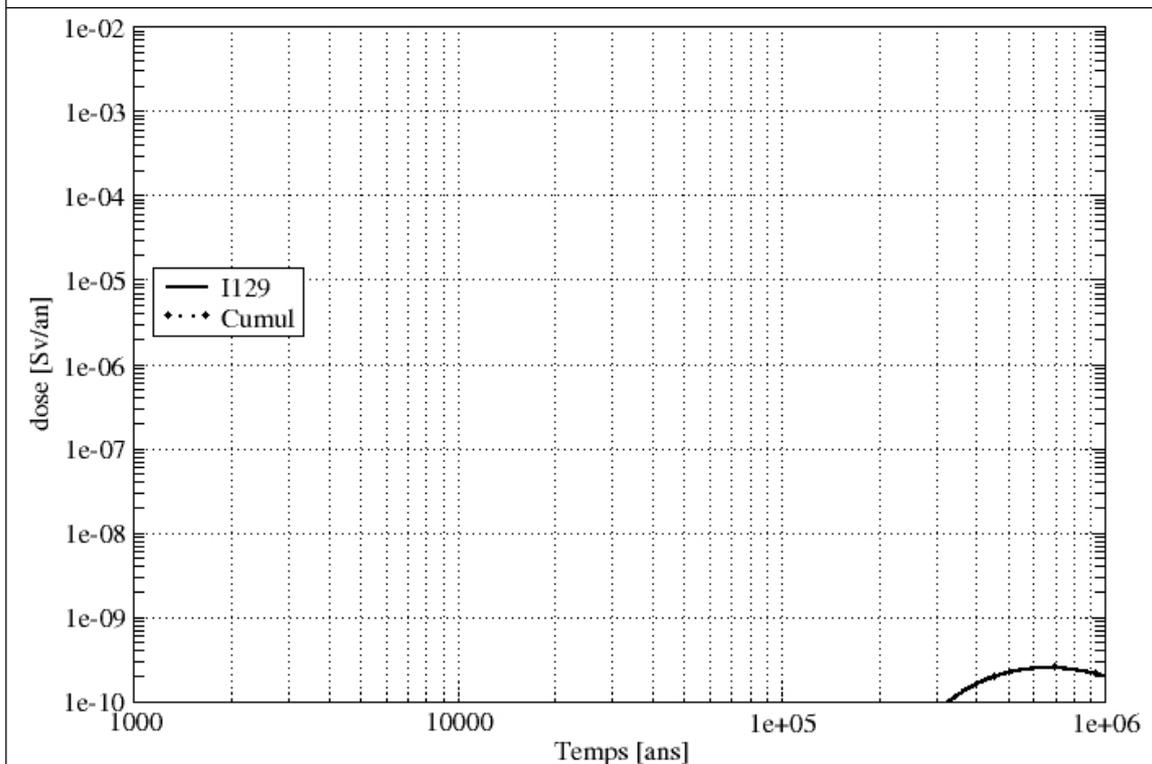


Figure 7.2-22 SEA défaut de scellements - Scellements de Galeries défailant – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrage – colis type CUI

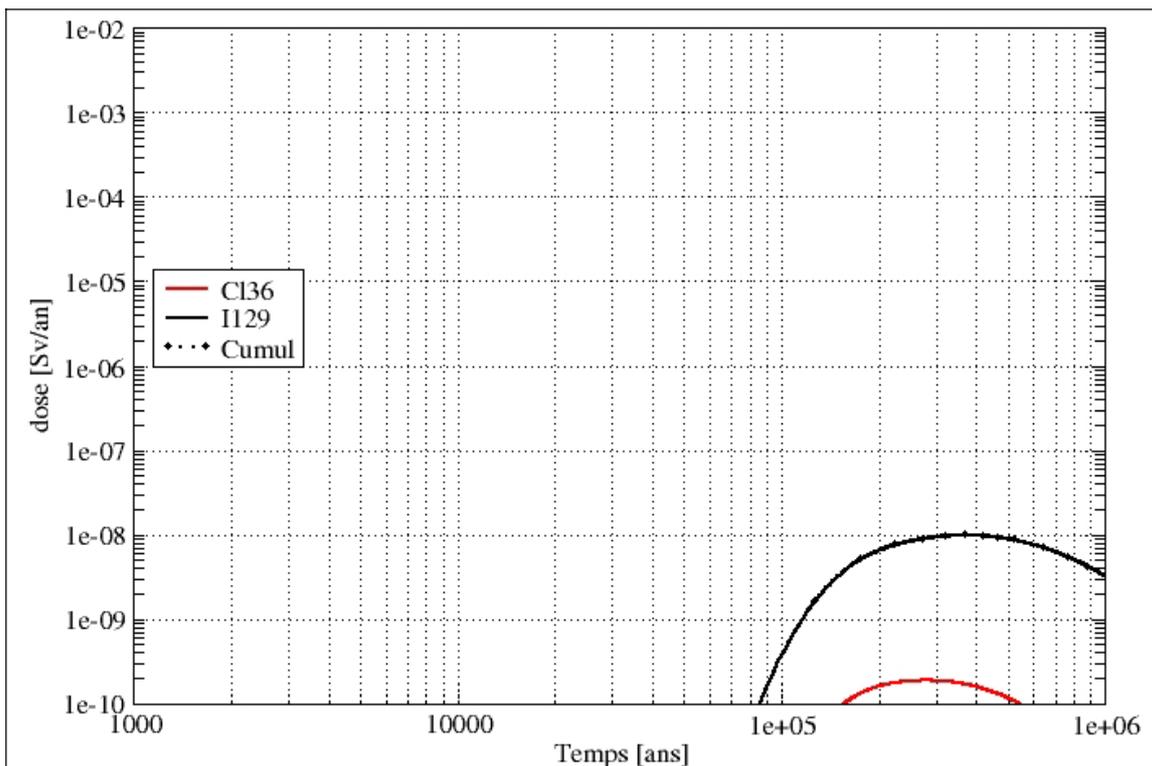


Figure 7.2-23 SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CUI

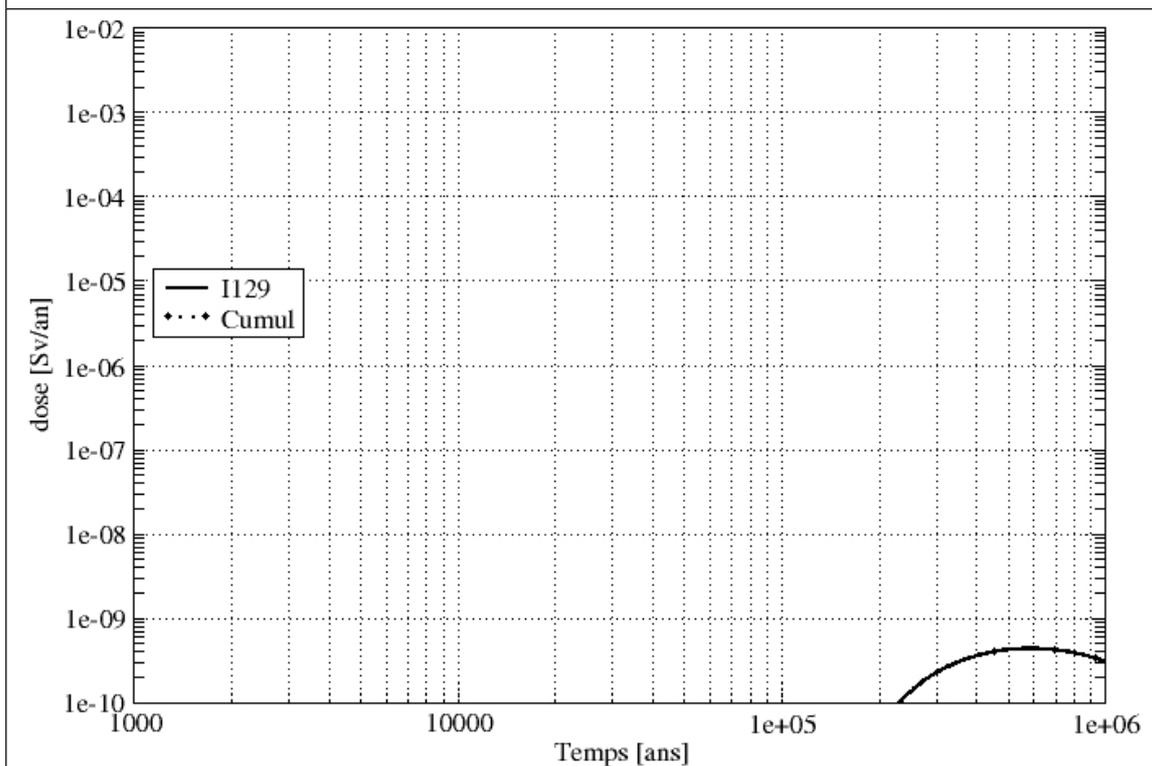


Figure 7.2-24 SEA défaut de scellements – Abandon du scellement de puits – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CUI

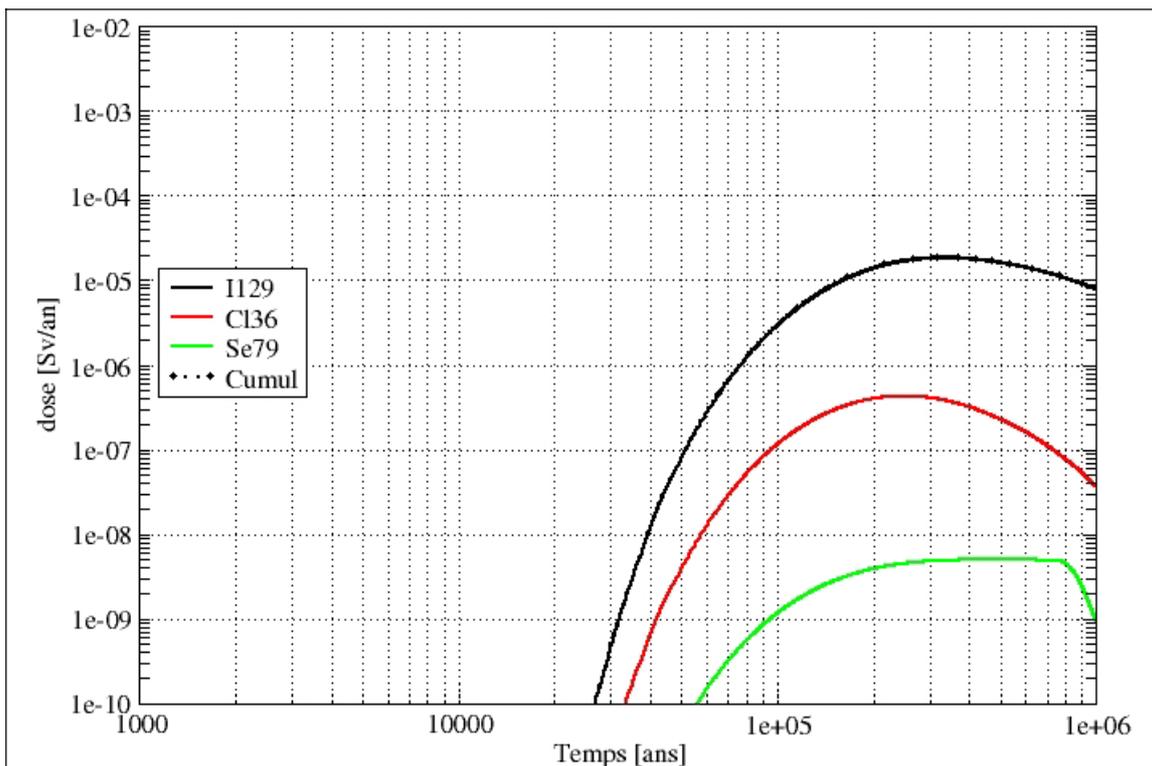


Figure 7.2-25 SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis type CU1

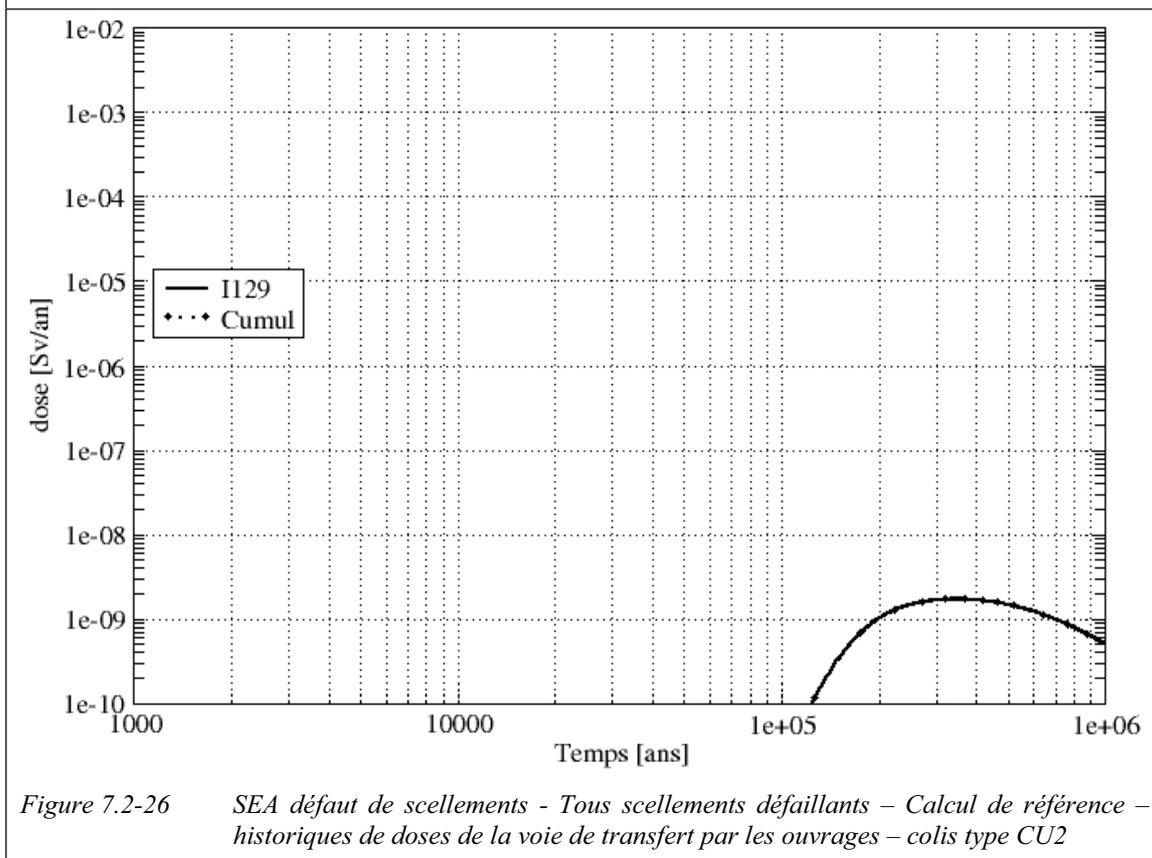


Figure 7.2-26 SEA défaut de scellements - Tous scellements défaillants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU2

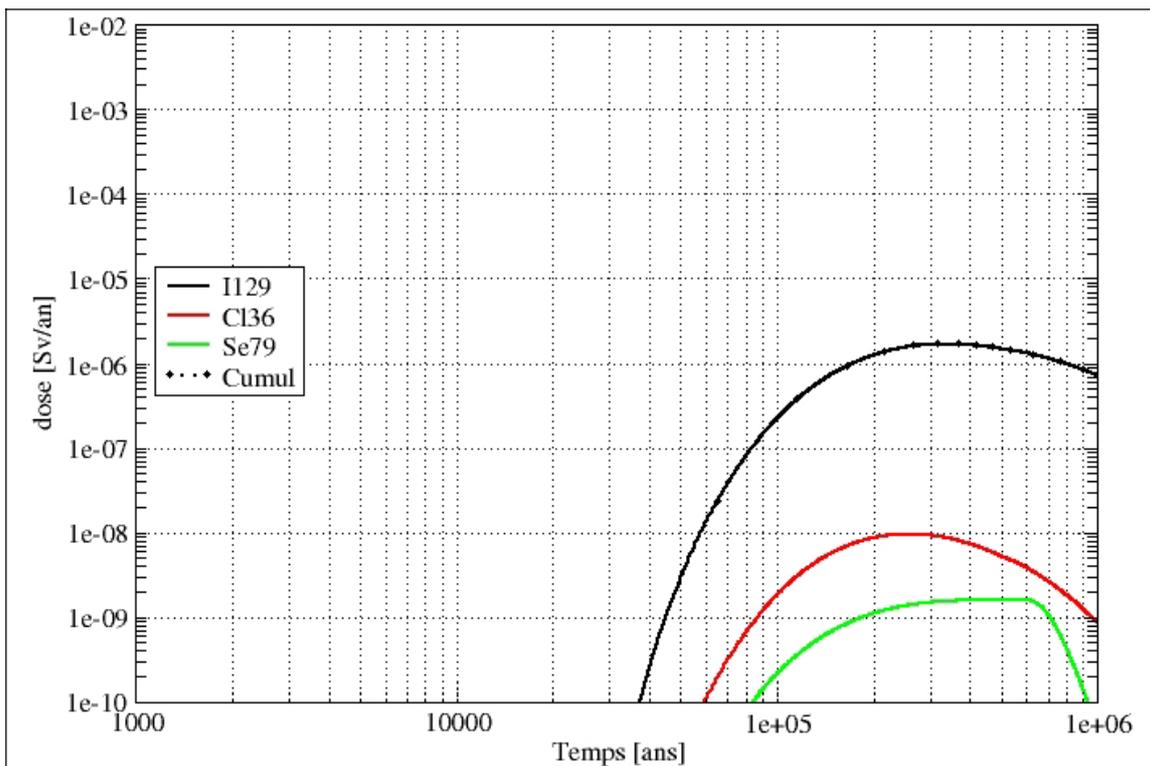


Figure 7.2-27 SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis type CU2

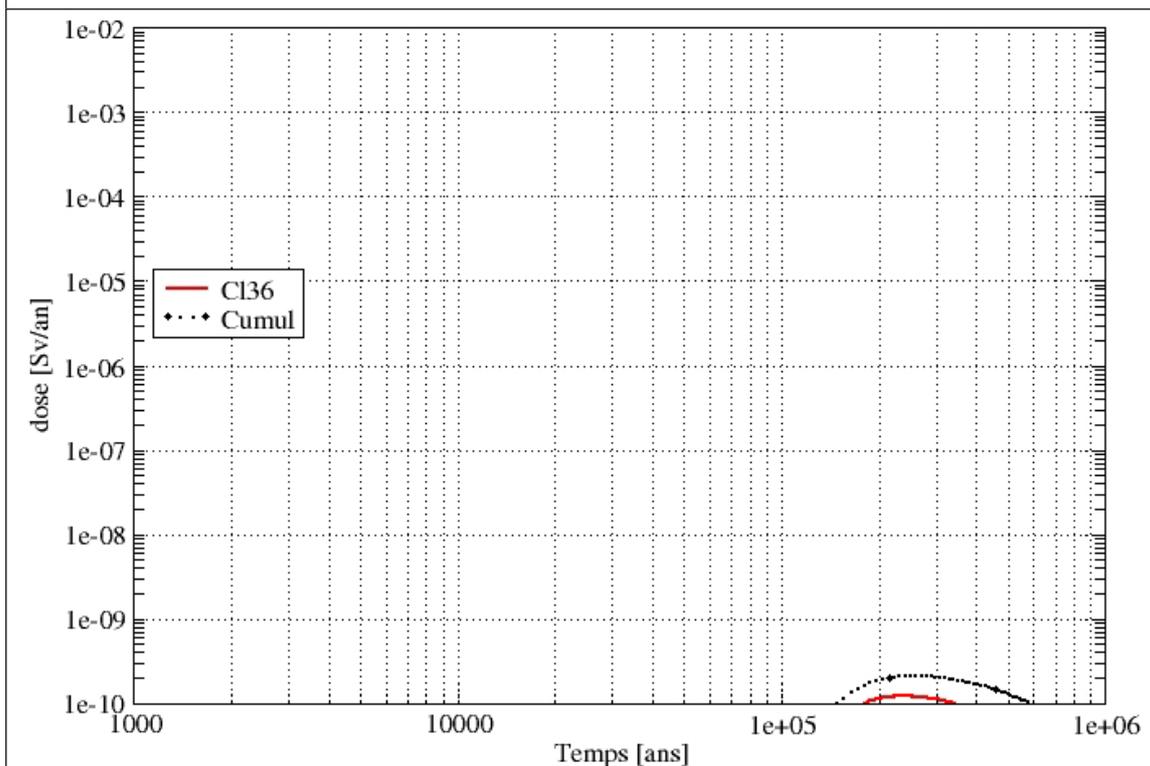


Figure 7.2-28 SEA défaut de scellements - Tous scellements défaillants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types C1/C2

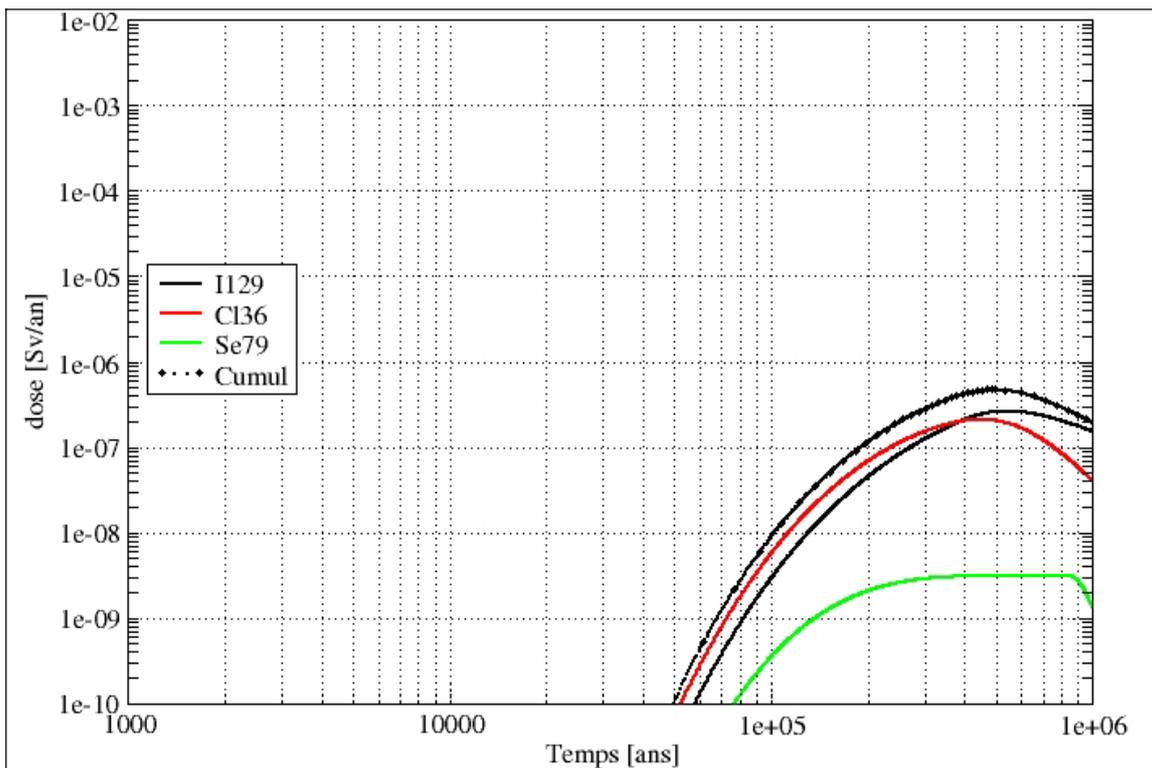


Figure 7.2-29 : SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types C1/C2

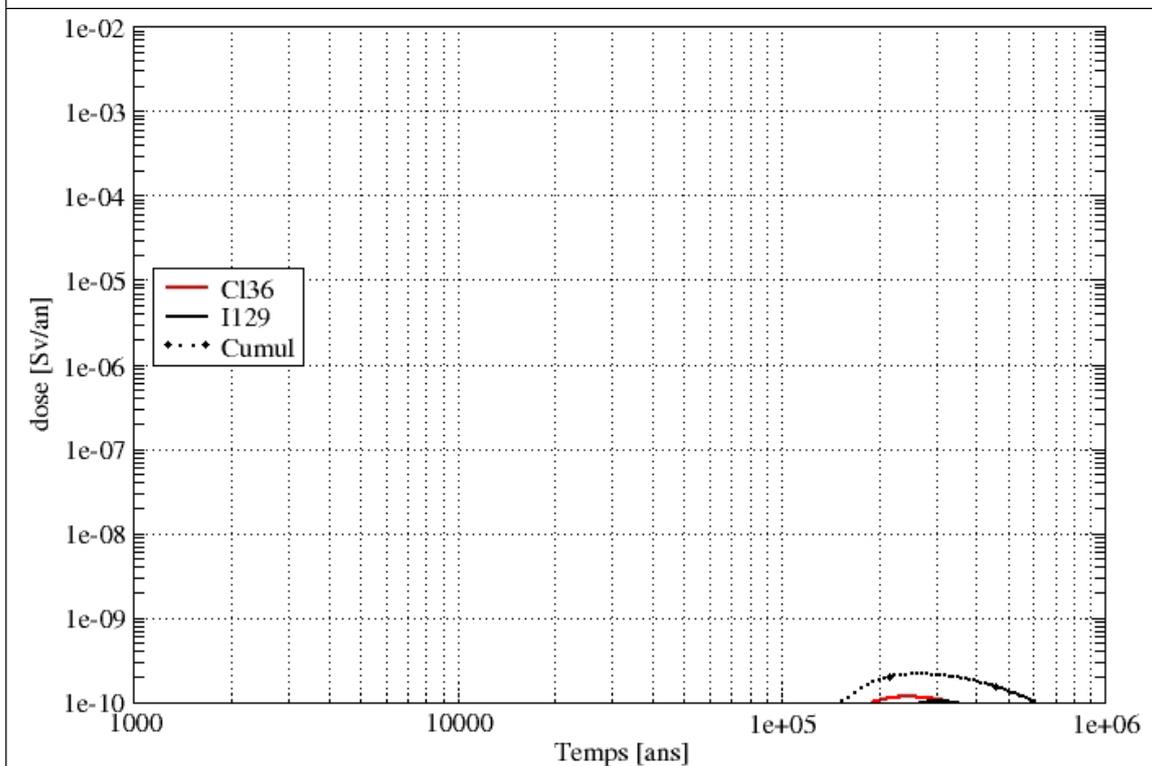


Figure 7.2-30 : SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types C3/C4

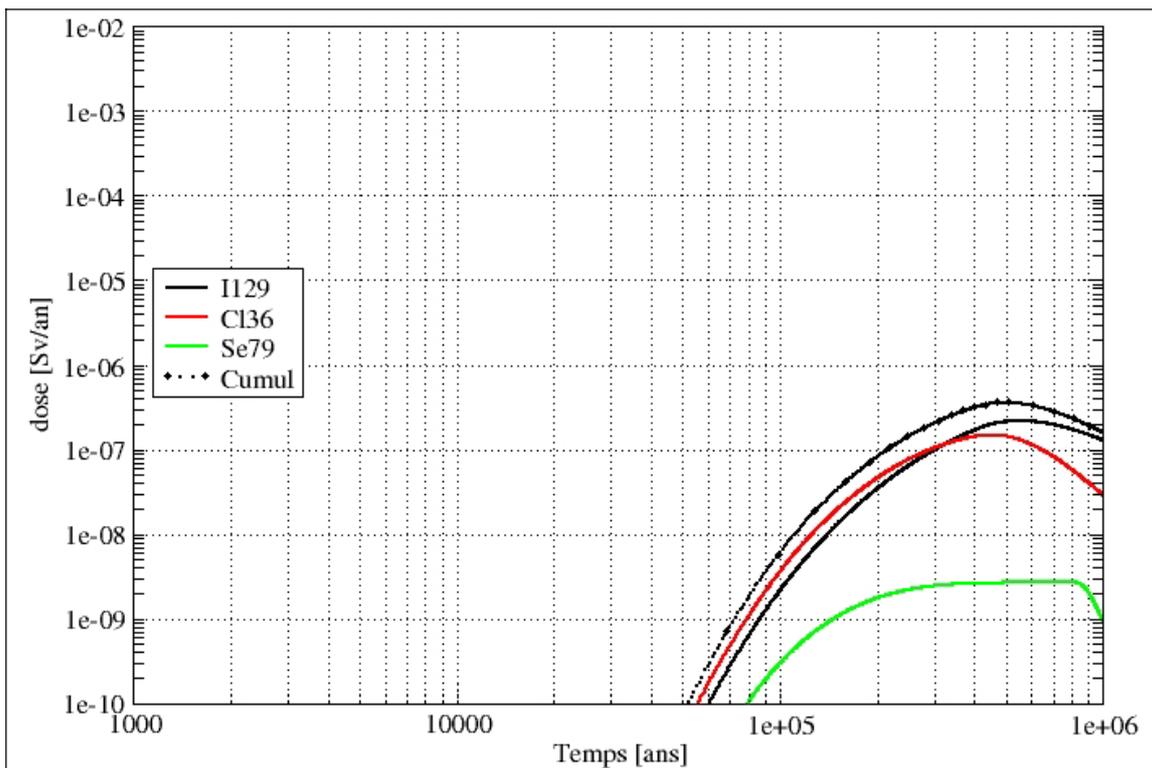


Figure 7.2-31 SEA défaut de scellements - toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types C3/C4

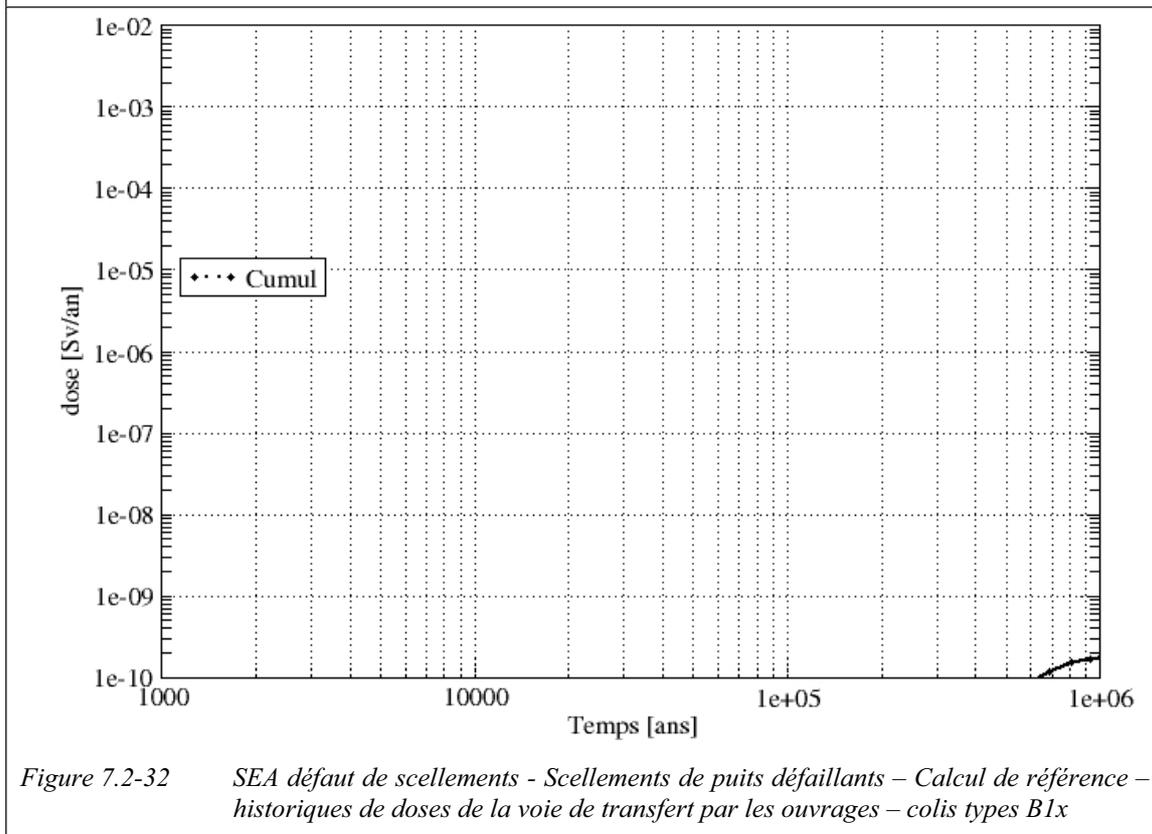


Figure 7.2-32 SEA défaut de scellements - Scellements de puits défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types B1x

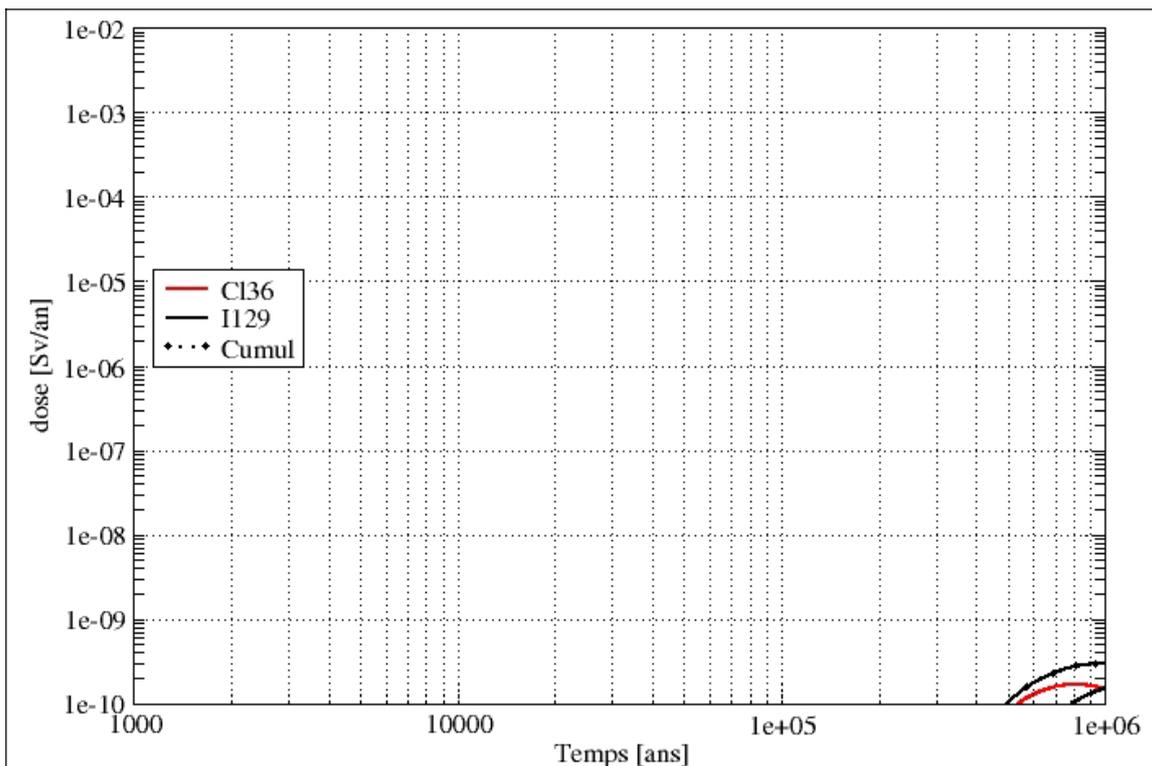


Figure 7.2-33 SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis types B1x

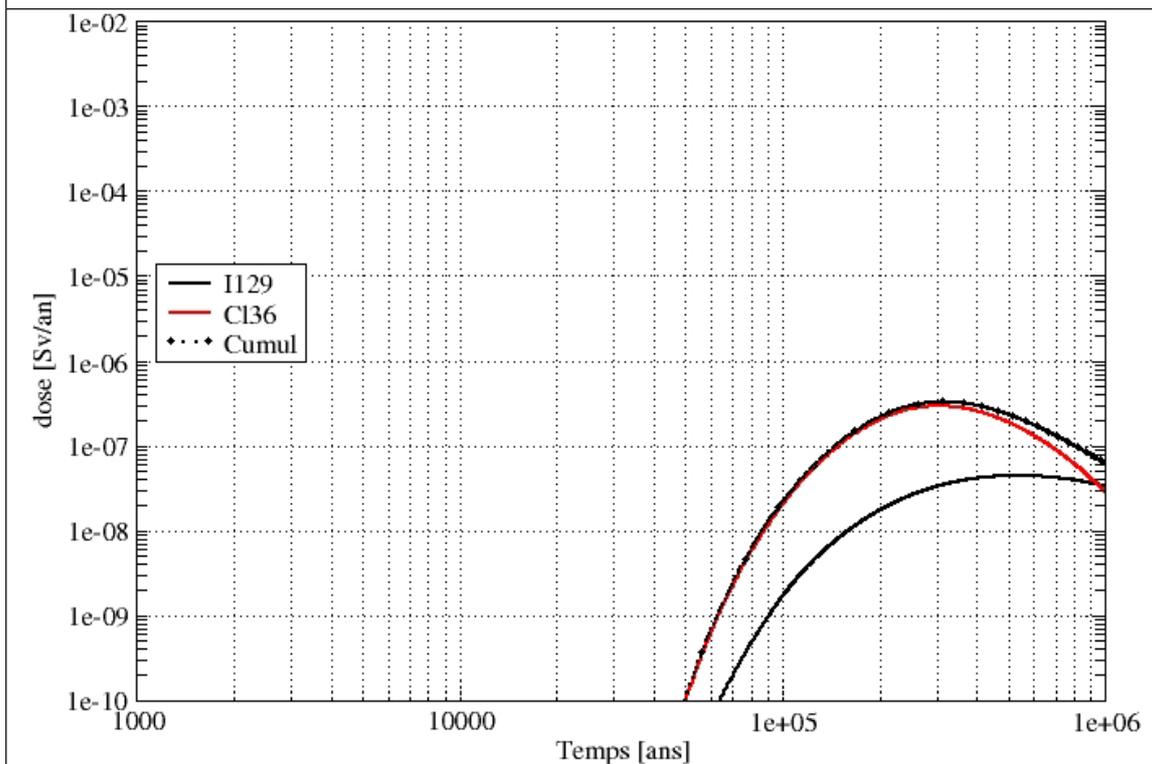


Figure 7.2-34 SEA défaut de scellements - Toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types B1x

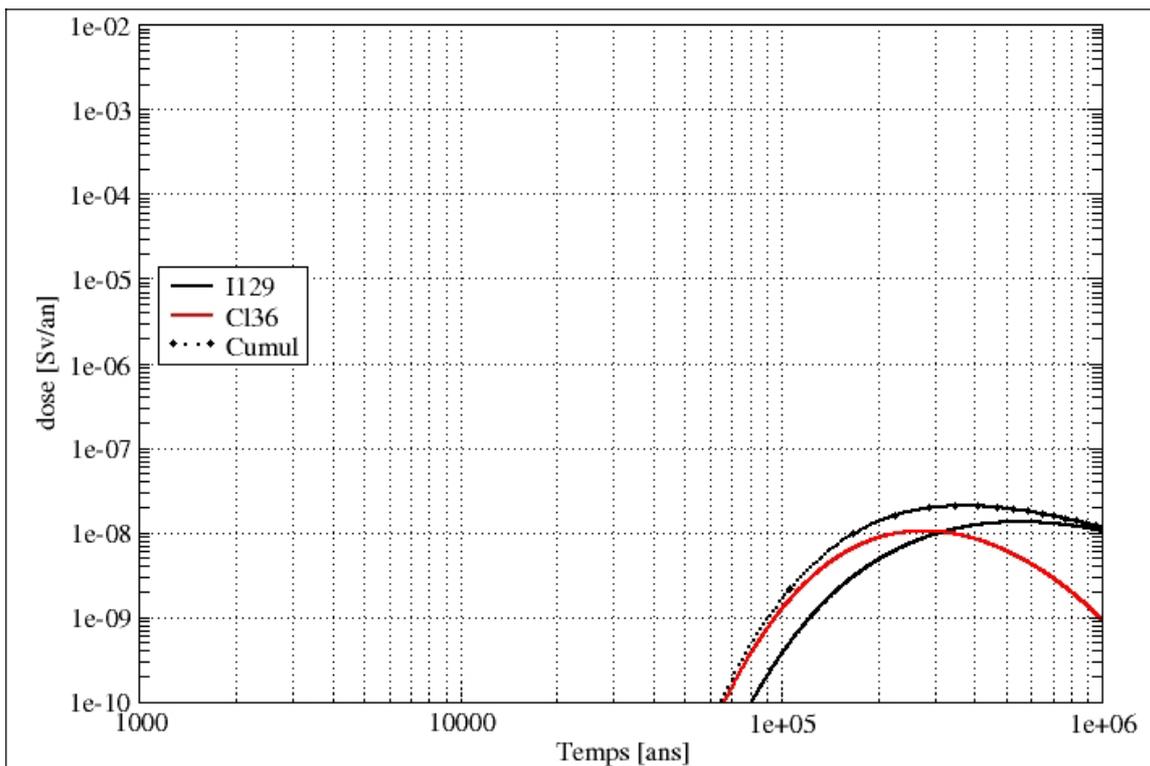


Figure 7.2-35 SEA défaut de scellements - Toutes situations – Calcul de référence – historiques de doses de la voie de transfert par la formation hôte – colis types B2

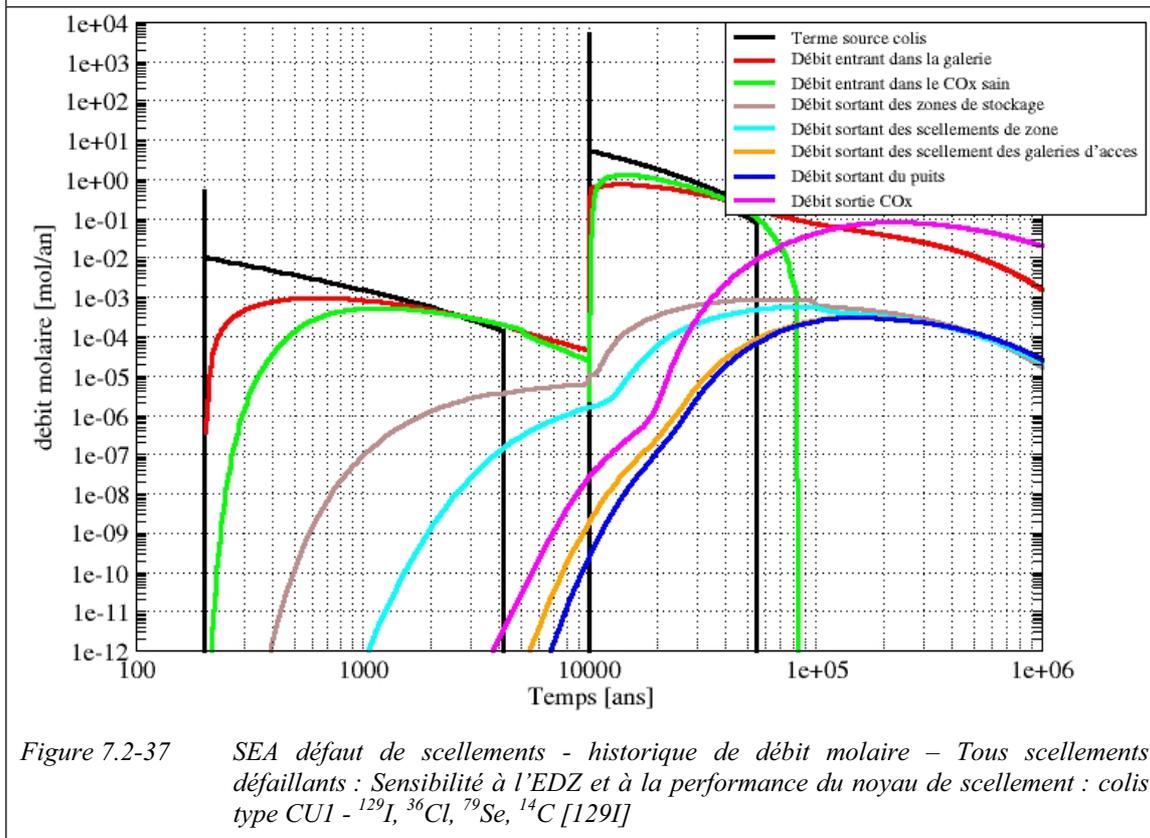


Figure 7.2-37 SEA défaut de scellements - historique de débit molaire – Tous scellements défailants : Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement : colis type CU1 - ^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{14}C [129I]

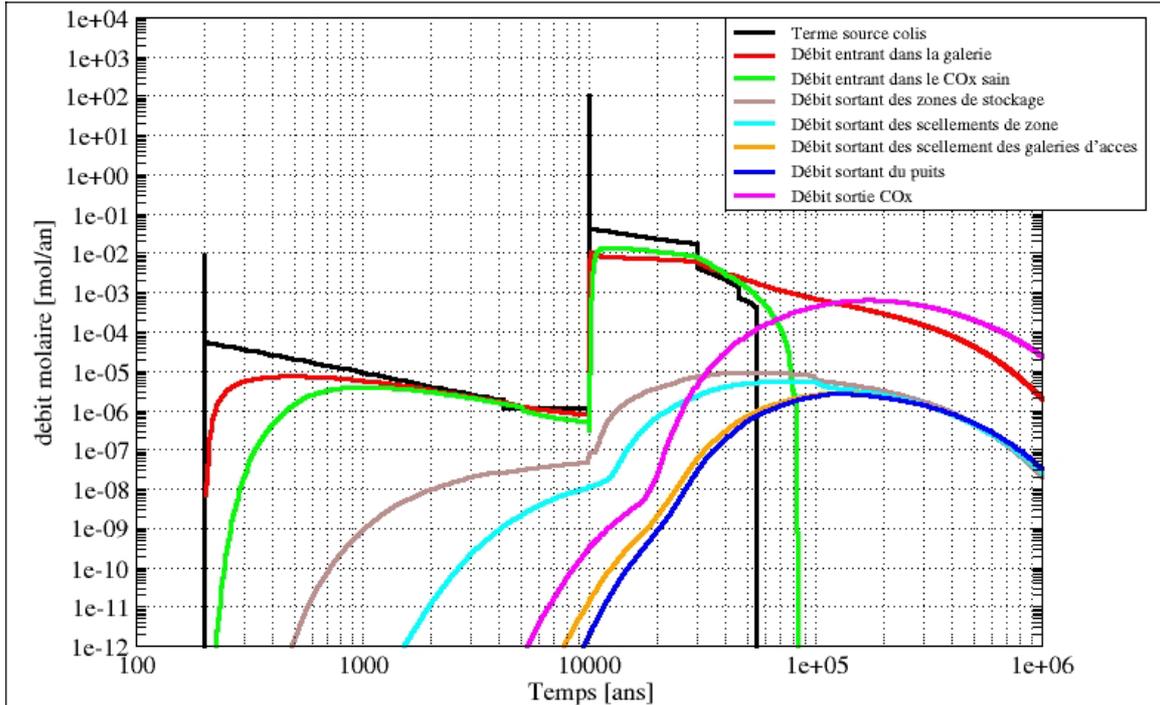


Figure 7.2-37 SEA défaut de scellements - historique de débit molaire – Tous scellements défectueux : Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement : colis type CUI - ^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{14}C [^{36}Cl]

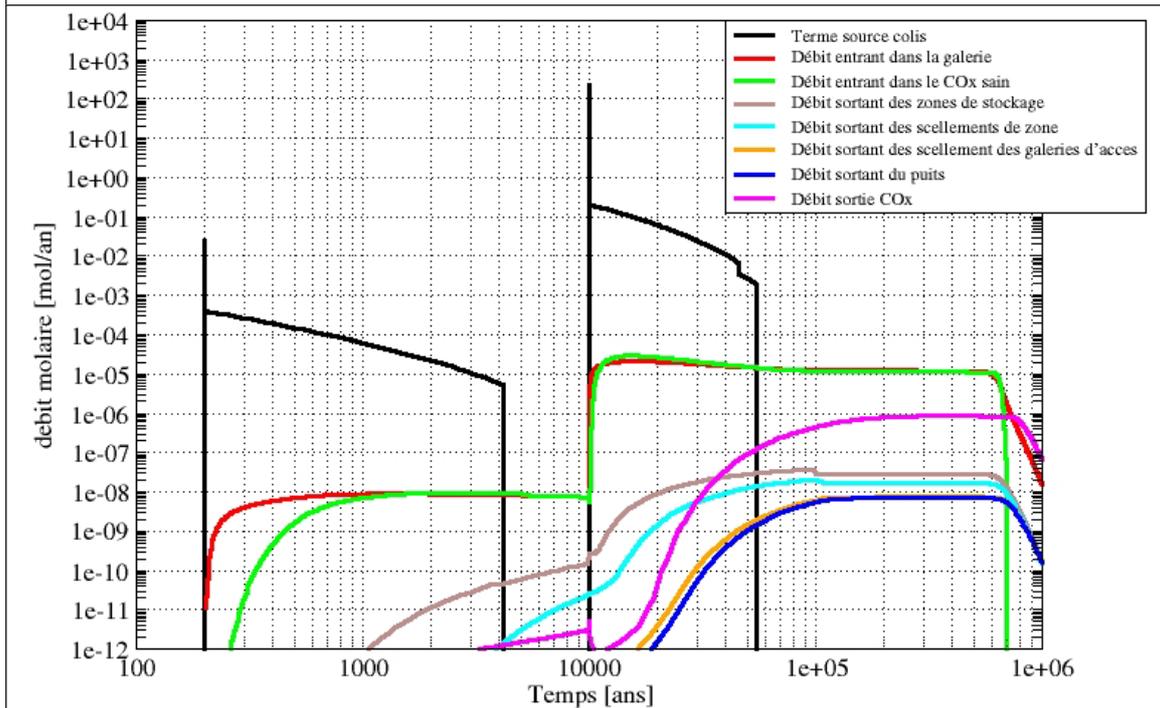


Figure 7.2-37 SEA défaut de scellements - historique de débit molaire – Tous scellements défectueux : Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement : colis type CUI - ^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{14}C [^{79}Se]

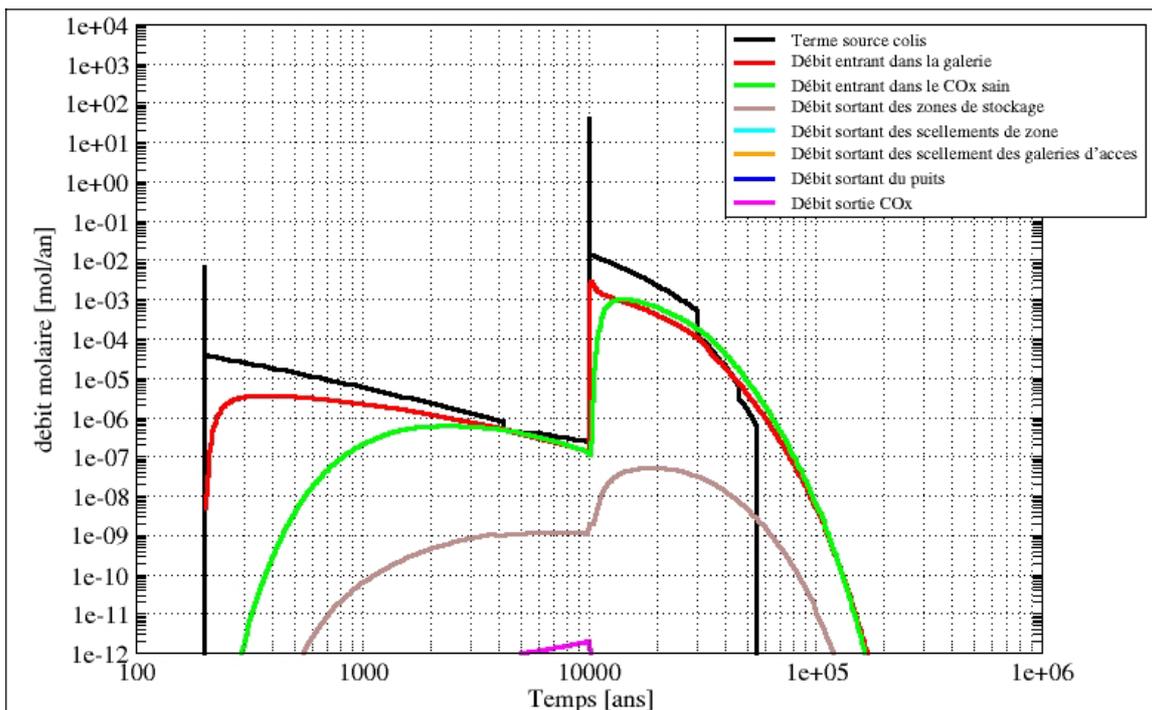


Figure 7.2-37 SEA défaut de scellements - historique de débit molaire – Tous scellements défailants : Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement : colis type CUI - ^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{14}C [^{14}C]

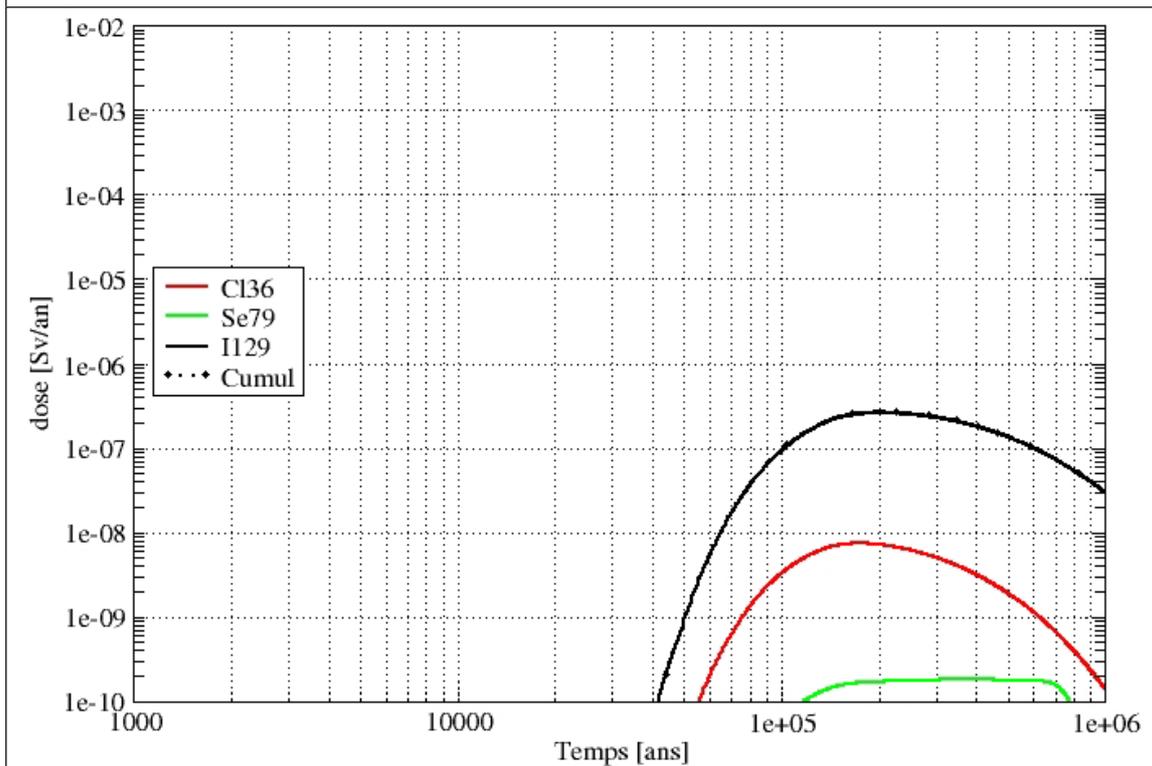


Figure 7.2-38 SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Sensibilité à l'EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CUI

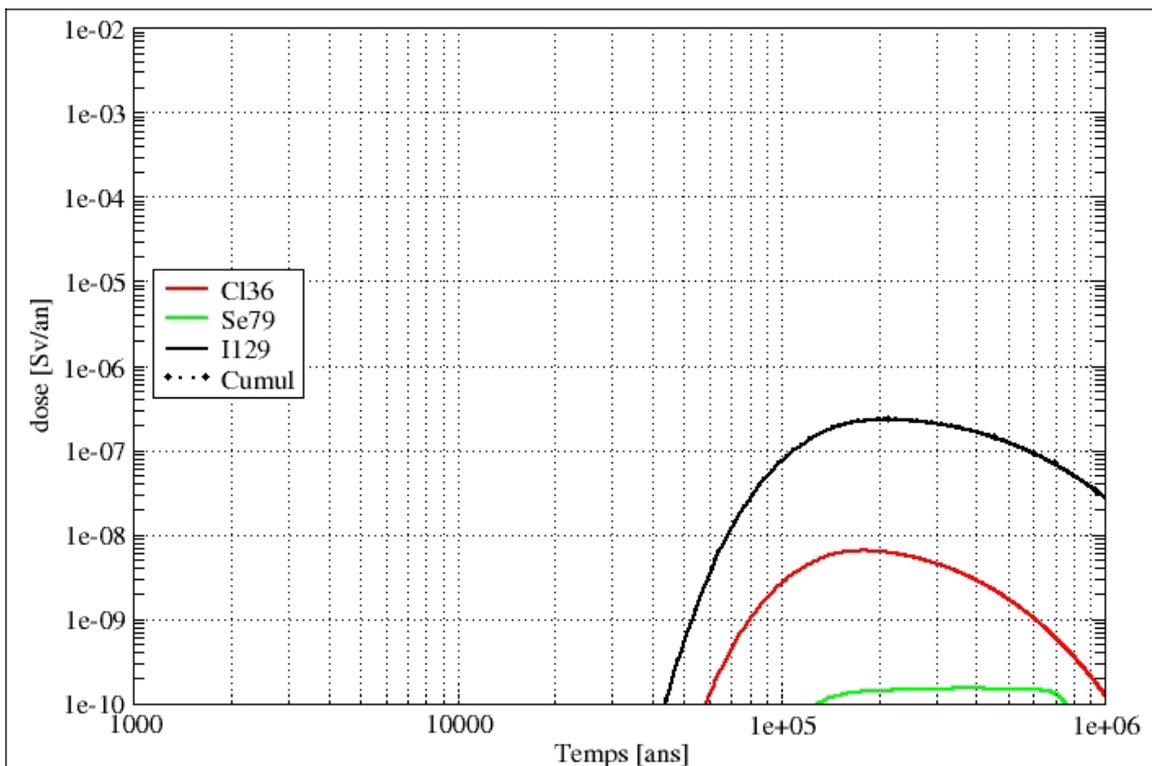


Figure 7.2-39 SEA défaut de scellements - Scellements de puits défailants – Sensibilité à l’EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CUI

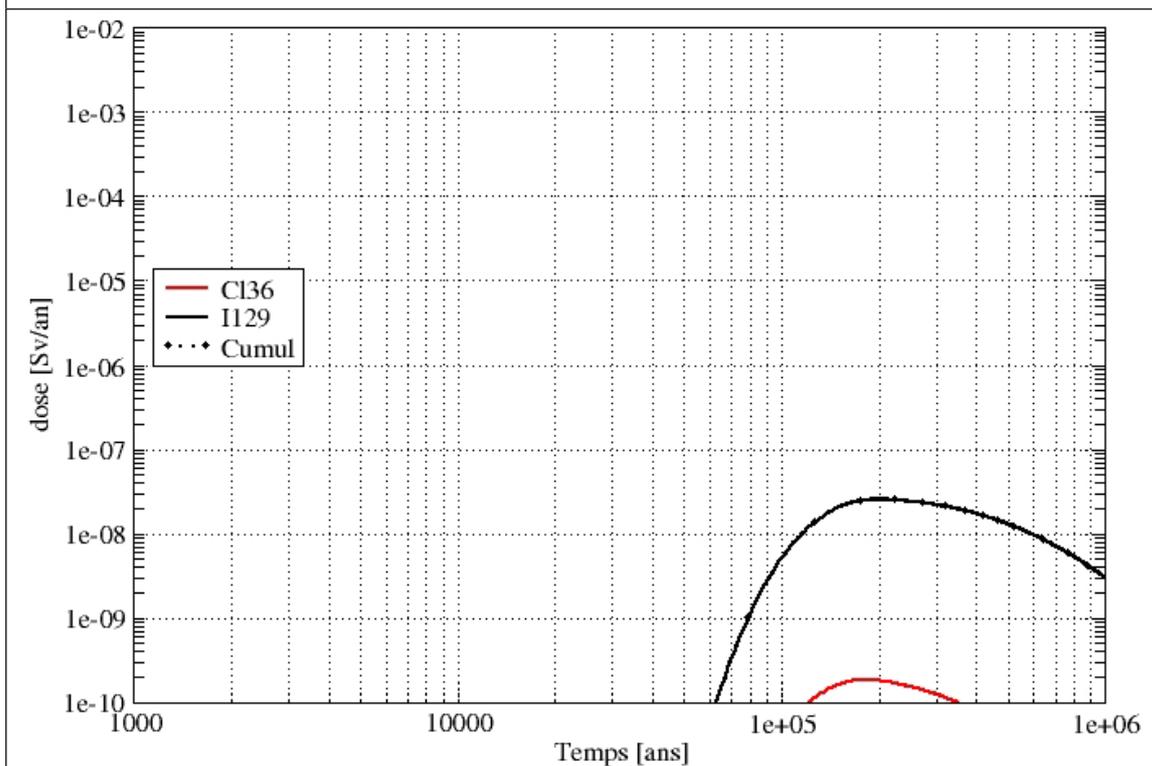


Figure 7.2-40 SEA défaut de scellements - Tous scellements défailants – Sensibilité à l’EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU2

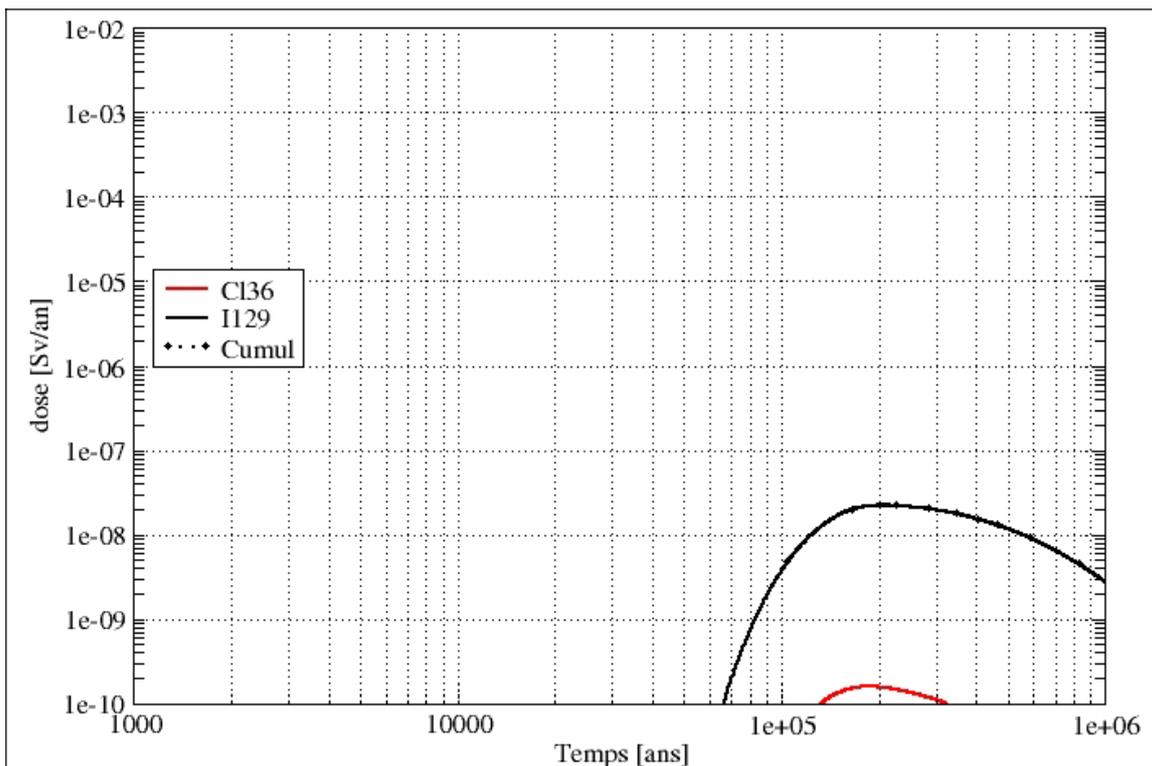


Figure 7.2-41 SEA défaut de scellements - Scellements de puits défaillants – Sensibilité à l’EDZ et à la performance du noyau de scellement – historiques de doses de la voie de transfert par les ouvrages – colis type CU2

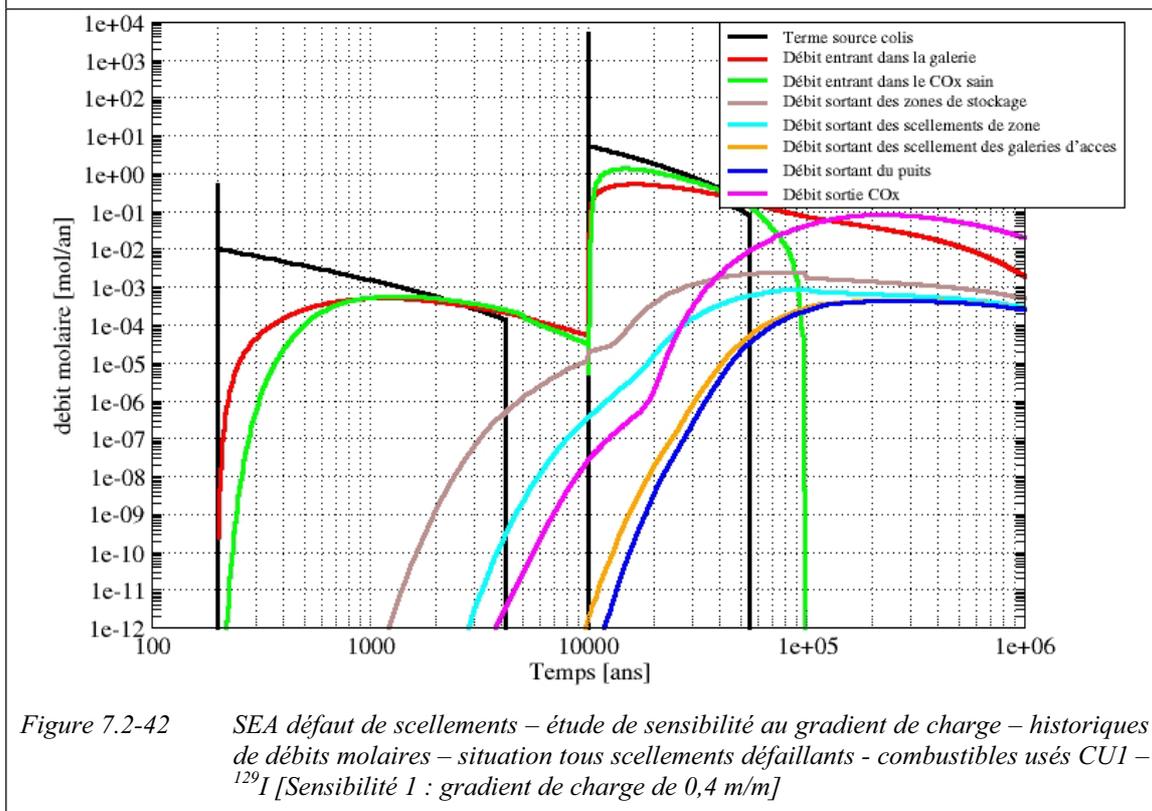


Figure 7.2-42 SEA défaut de scellements – étude de sensibilité au gradient de charge – historiques de débits molaires – situation tous scellements défaillants - combustibles usés CU1 – ¹²⁹I [Sensibilité 1 : gradient de charge de 0,4 m/m]

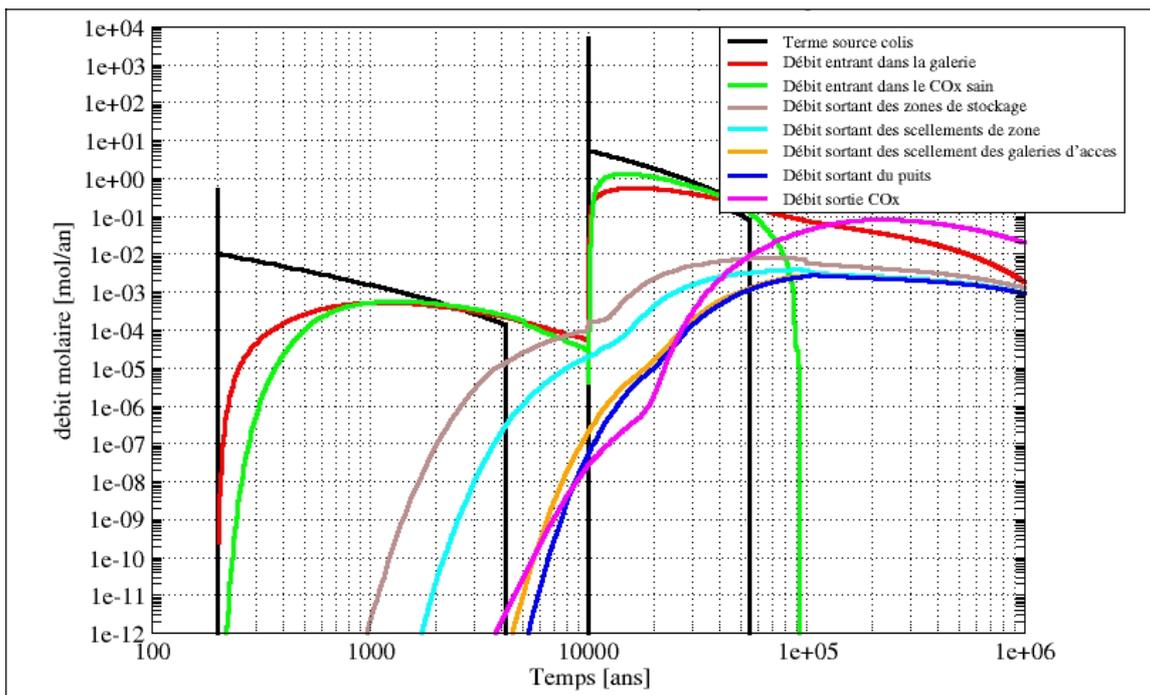


Figure 7.2-42 SEA défaut de scellements – étude de sensibilité au gradient de charge – historiques de débits molaires – situation tous scellements défailants - combustibles usés CUI – ^{129}I [Sensibilité 2 : gradient de charge de 1 m/m]

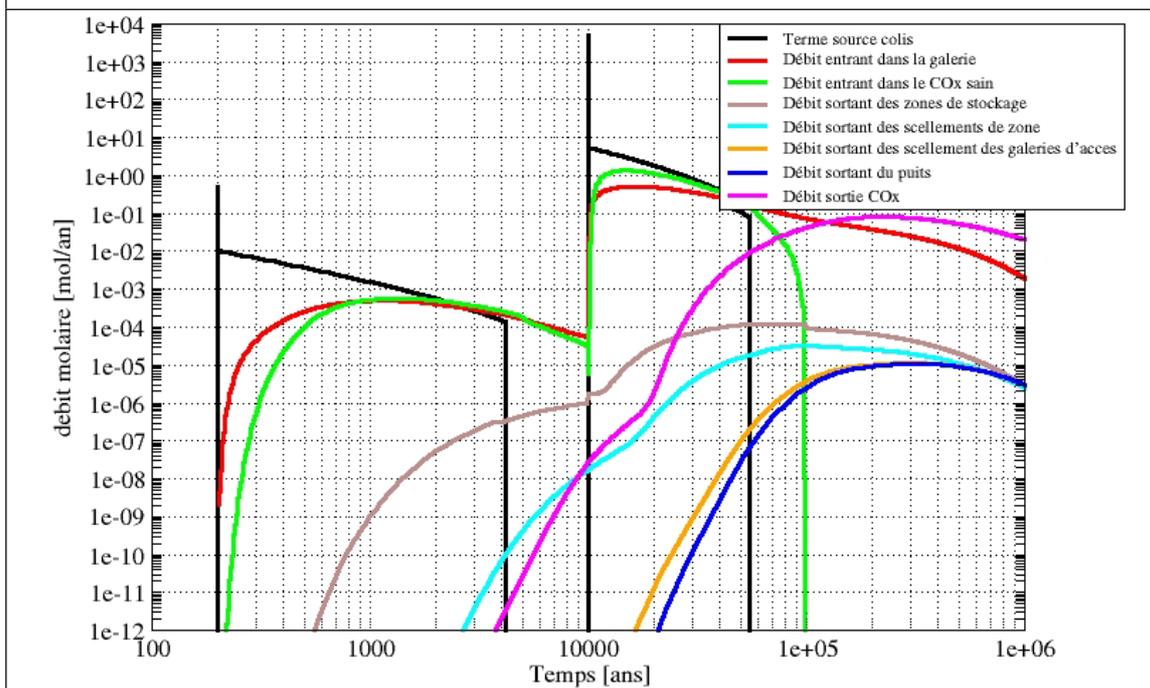


Figure 7.2-42 SEA défaut de scellements – étude de sensibilité au gradient de charge – historiques de débits molaires – situation tous scellements défailants - combustibles usés CUI – ^{129}I [Calcul de référence : gradient de charge de 0,2 m/m]

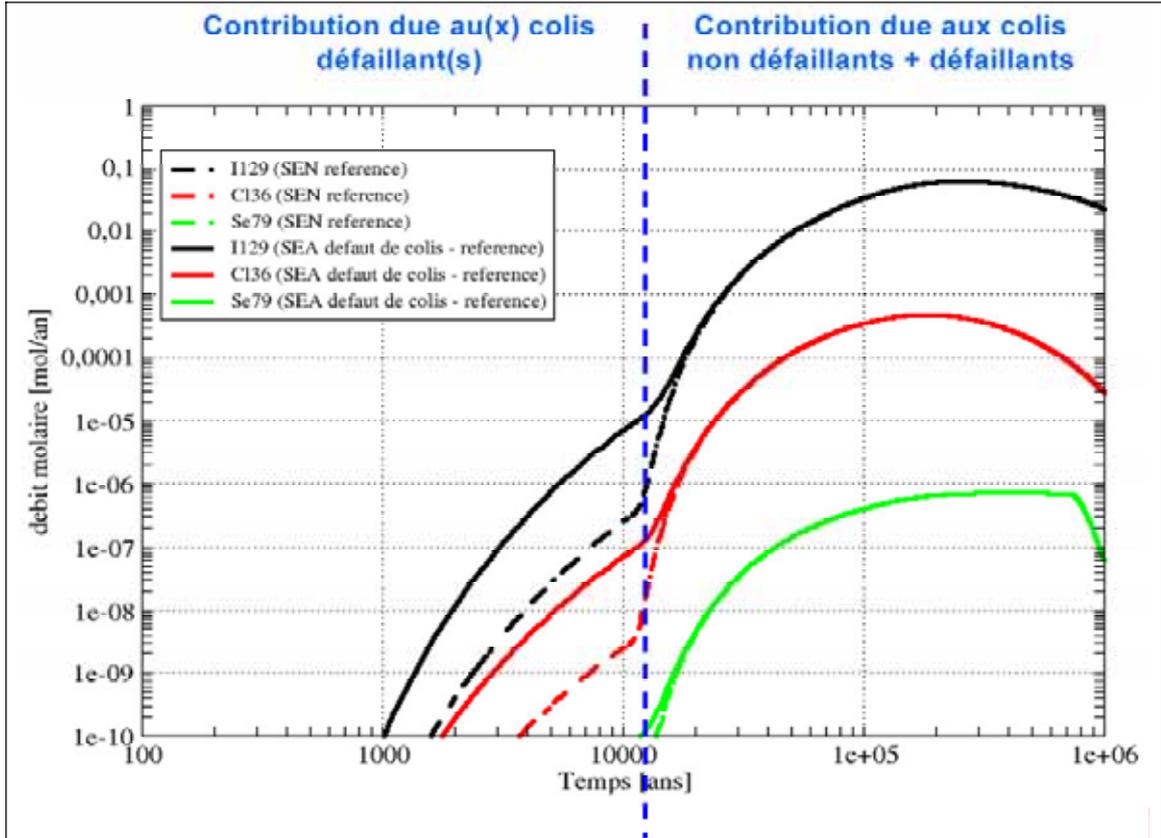


Figure 7.3-1 SEA défaut de colis - Courbes de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien – comparaison ^{129}I , ^{36}Cl et ^{79}Se entre la situation SEN (colis défaillant) et SEA défaut de colis (référence – 30 colis défaillants) – combustibles usés CUI

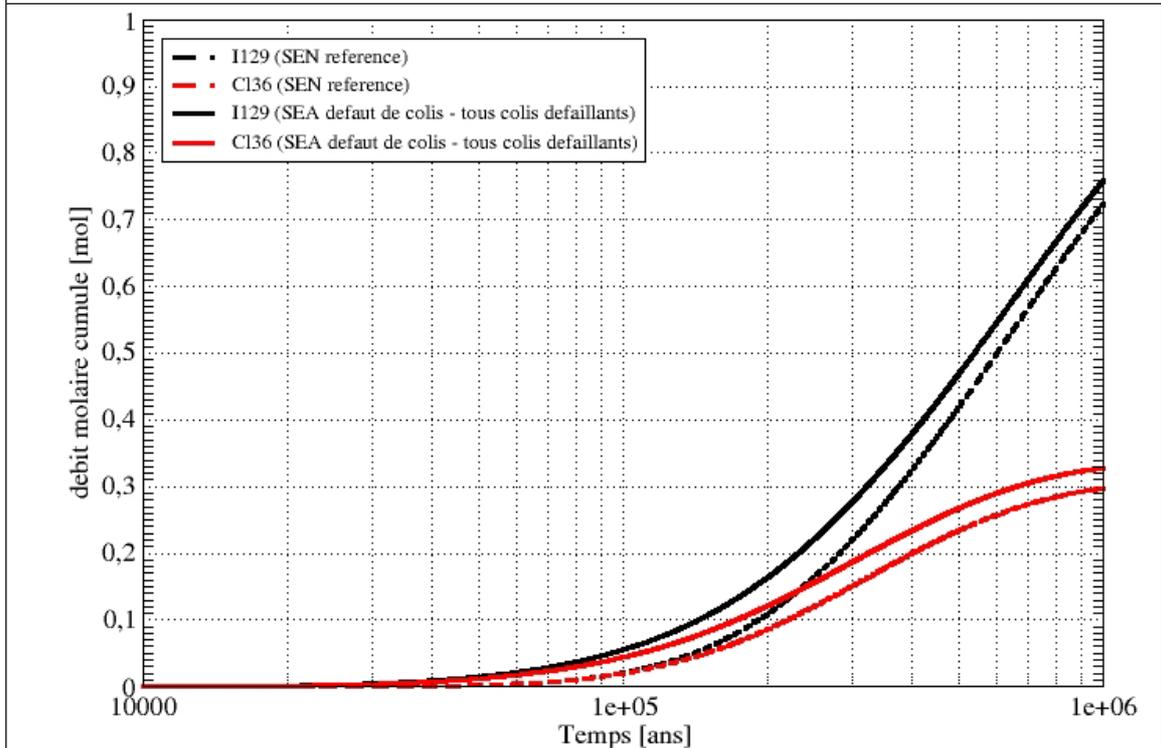


Figure 7.3-3 SEA défaut de colis - Evolution du débit molaire cumulé en sortie de Callovo-Oxfordien – comparaison « tous colis défaillants » et SEN – combustibles usés CUI

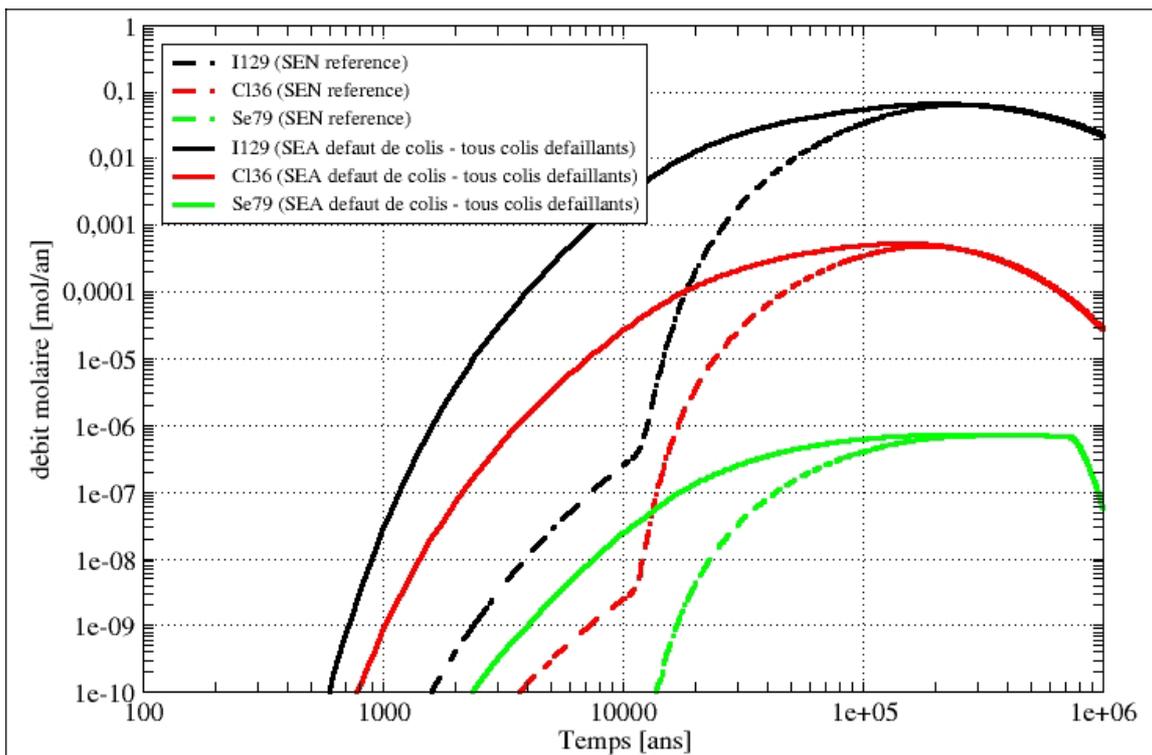


Figure 7.3-4 SEA défaut de colis - Evolution du débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien – comparaison « tous colis défaillants » et SEN – combustibles usés CUI

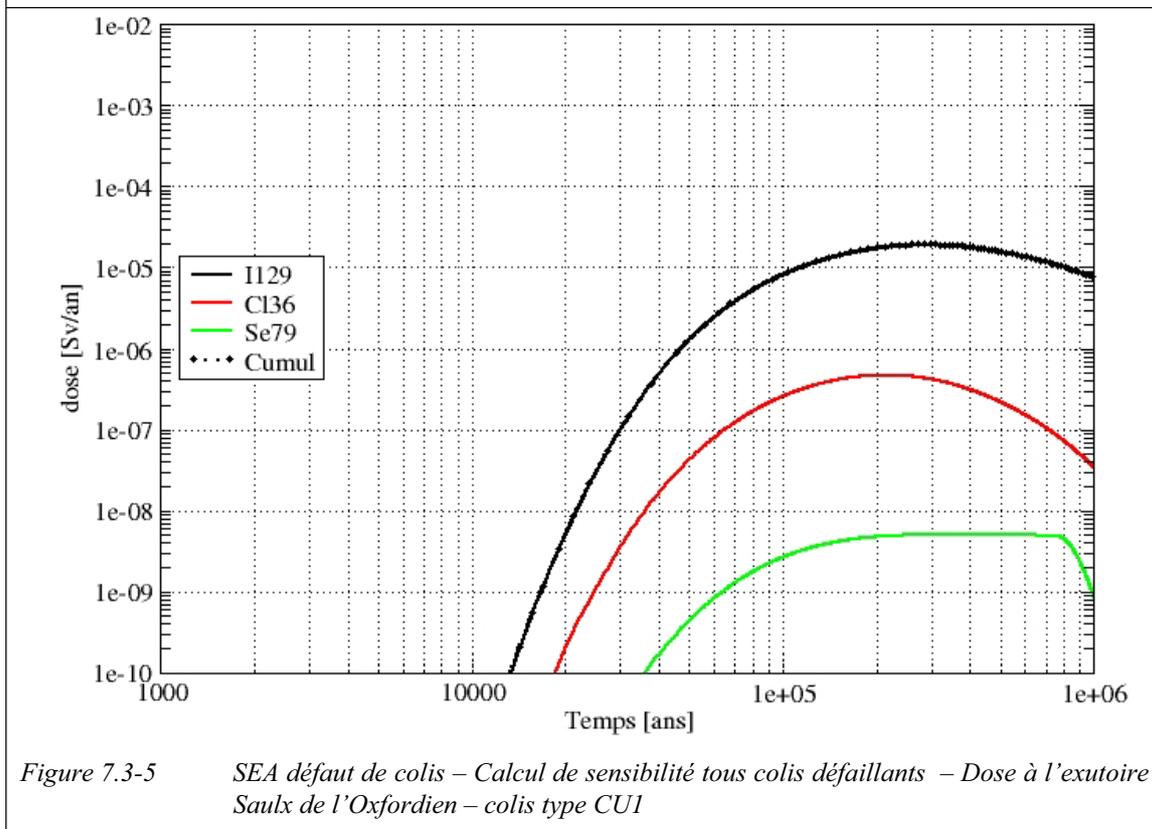


Figure 7.3-5 SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défaillants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis type CUI

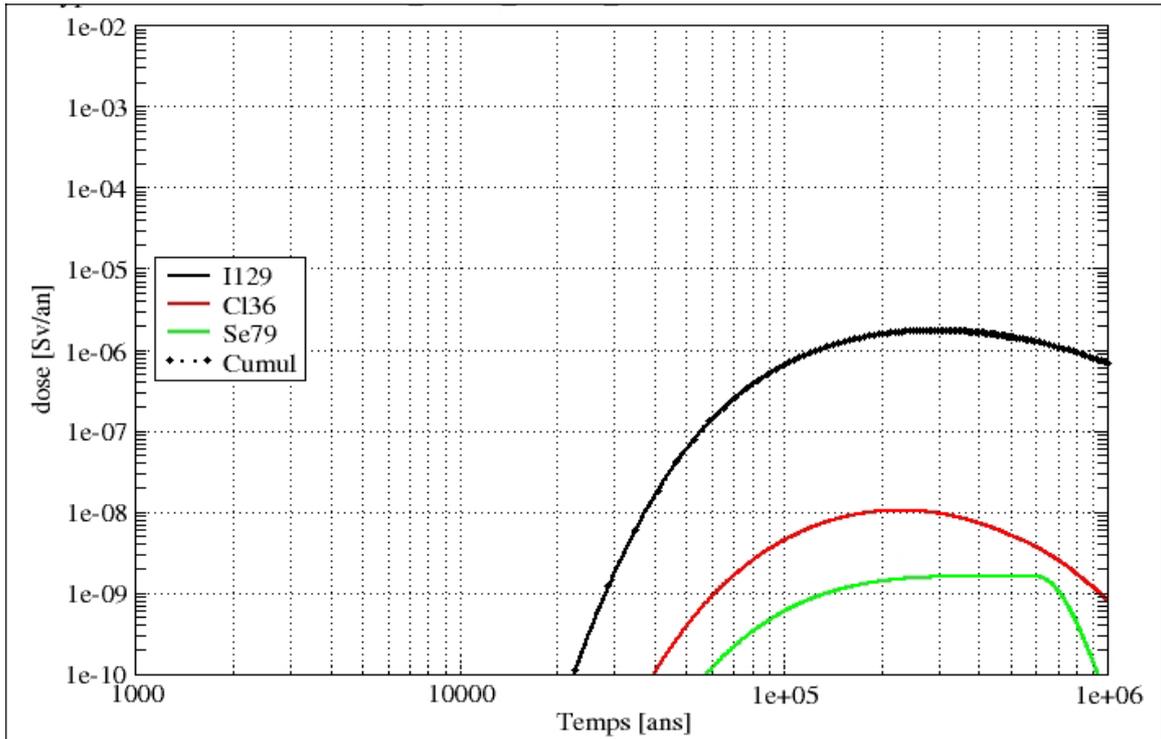


Figure 7.3-6 SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défailants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Colis type CU2

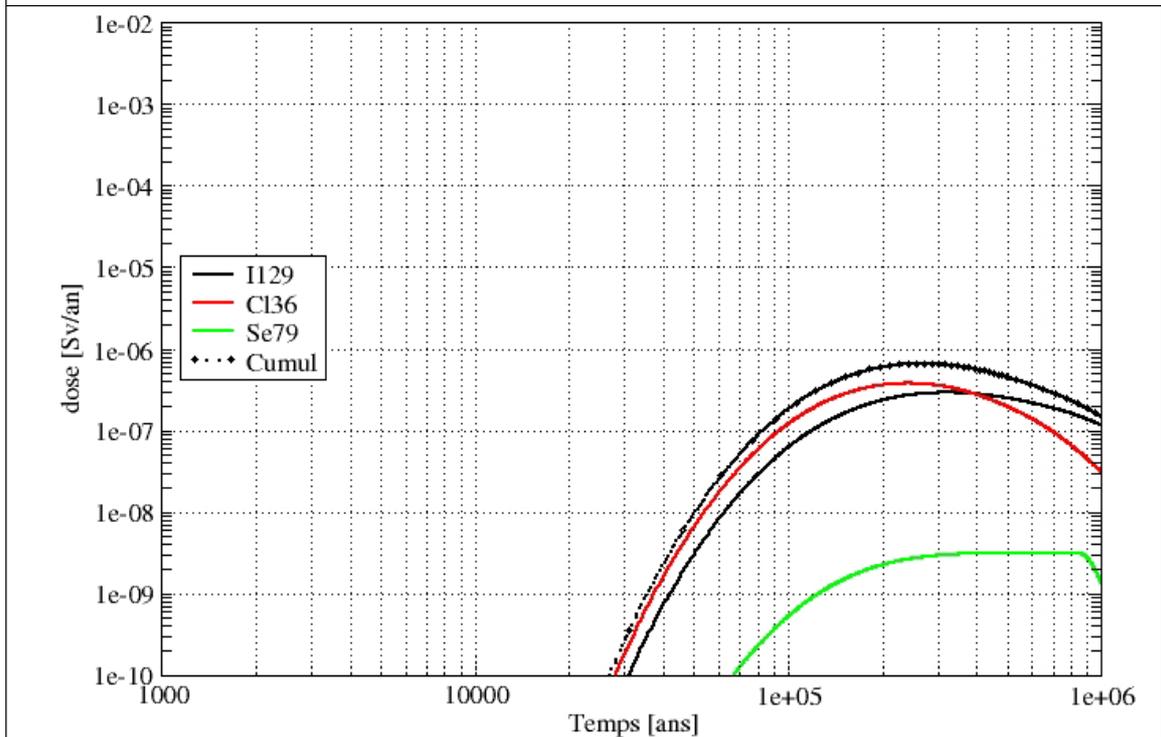


Figure 7.3-7 SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défailants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis type C1/C2

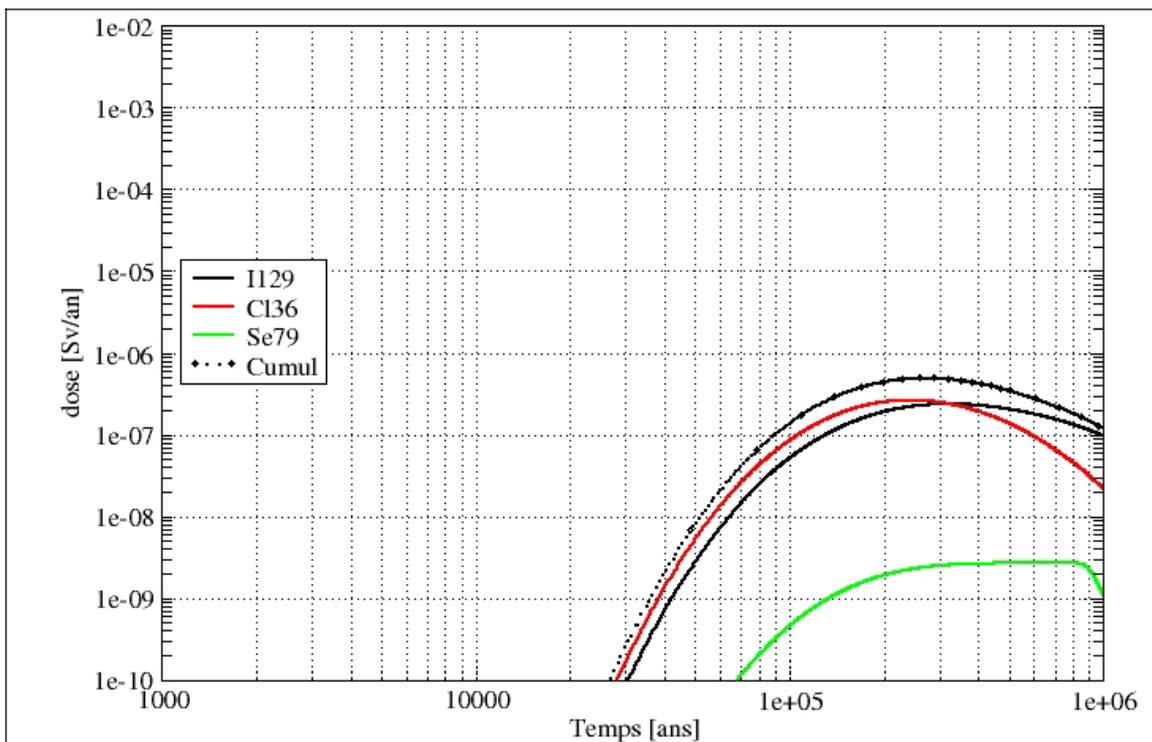


Figure 7.3-8 SEA défaut de colis – Calcul de sensibilité tous colis défailants – Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – colis type C3/C4

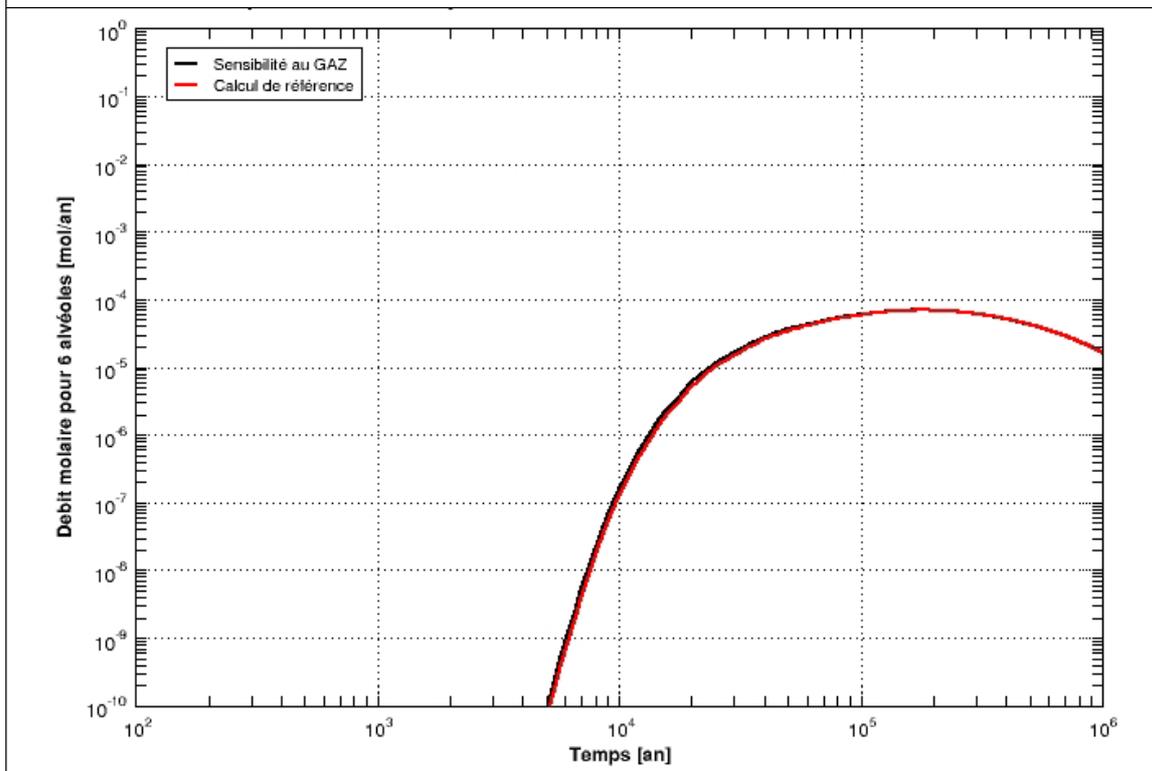


Figure 7.3-9 SEA défaut de colis - calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historiques de débit molaire en sortie de Callovo-Oxfordien pour un motif de 6 alvéoles de CUI - comparaison des cas avec et sans surpressions hydrauliques (¹²⁹I)

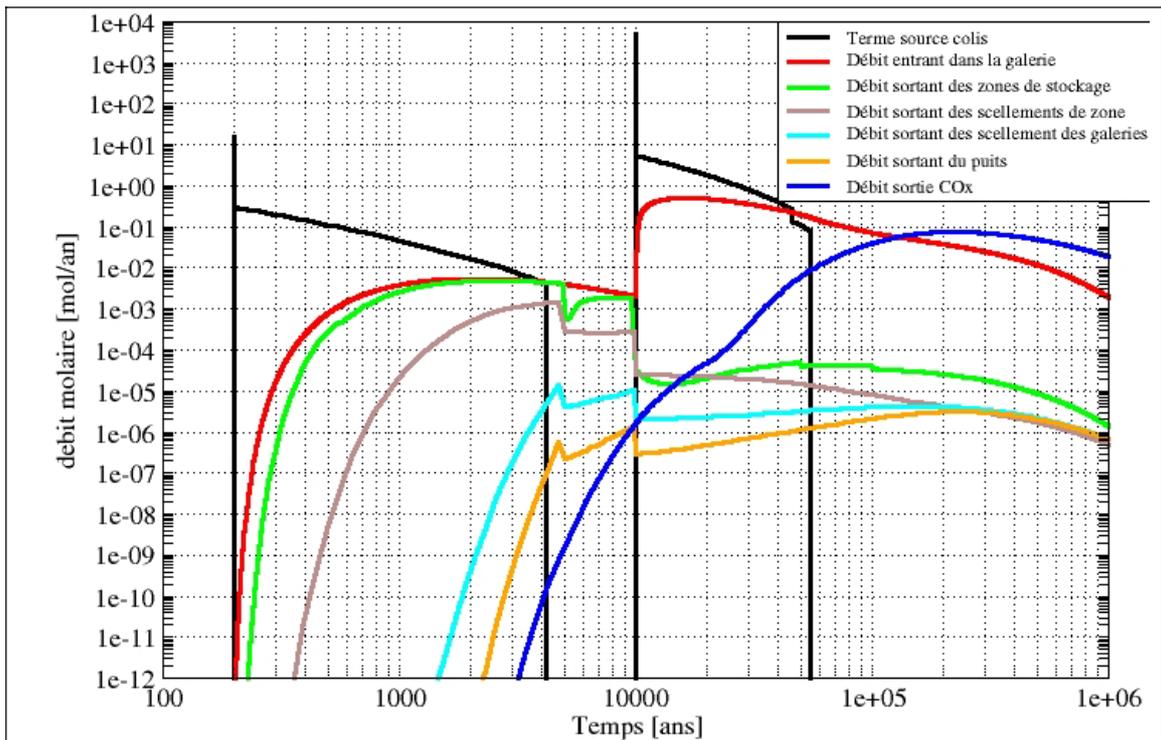


Figure 7.3-10 SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – ^{129}I – combustibles usés CUI. [Calcul de sensibilité]

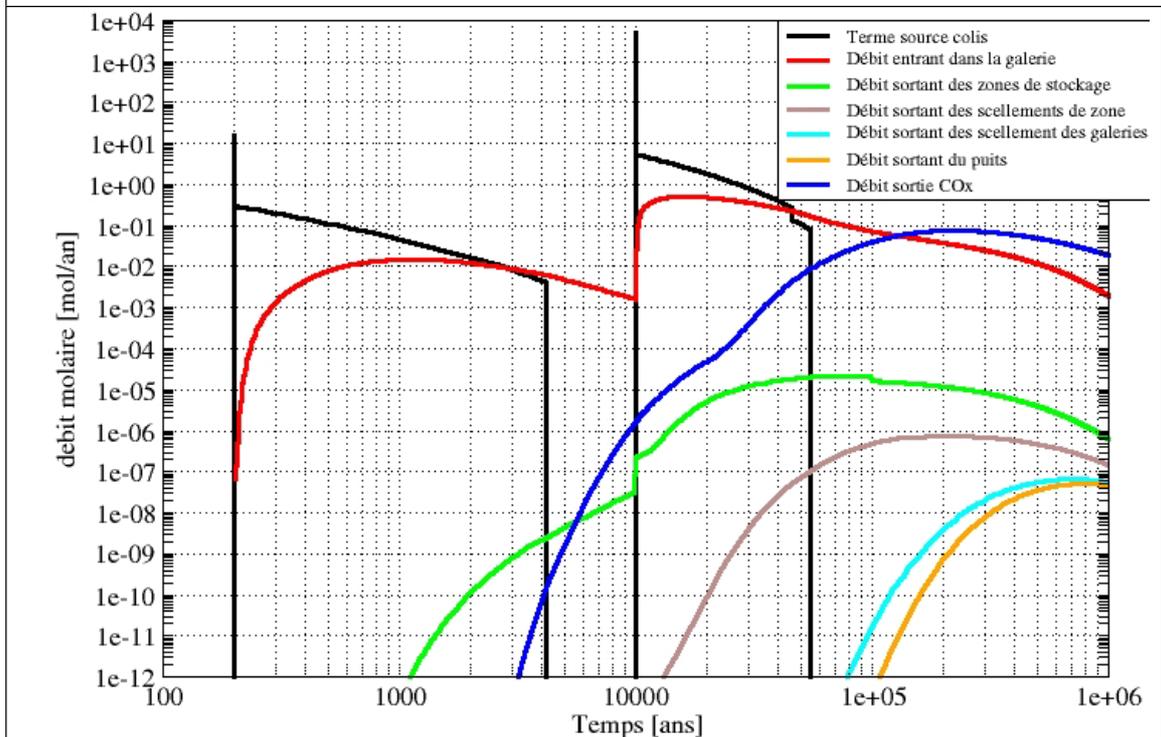


Figure 7.3-10 SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – ^{129}I – combustibles usés CUI. [Calcul de référence]

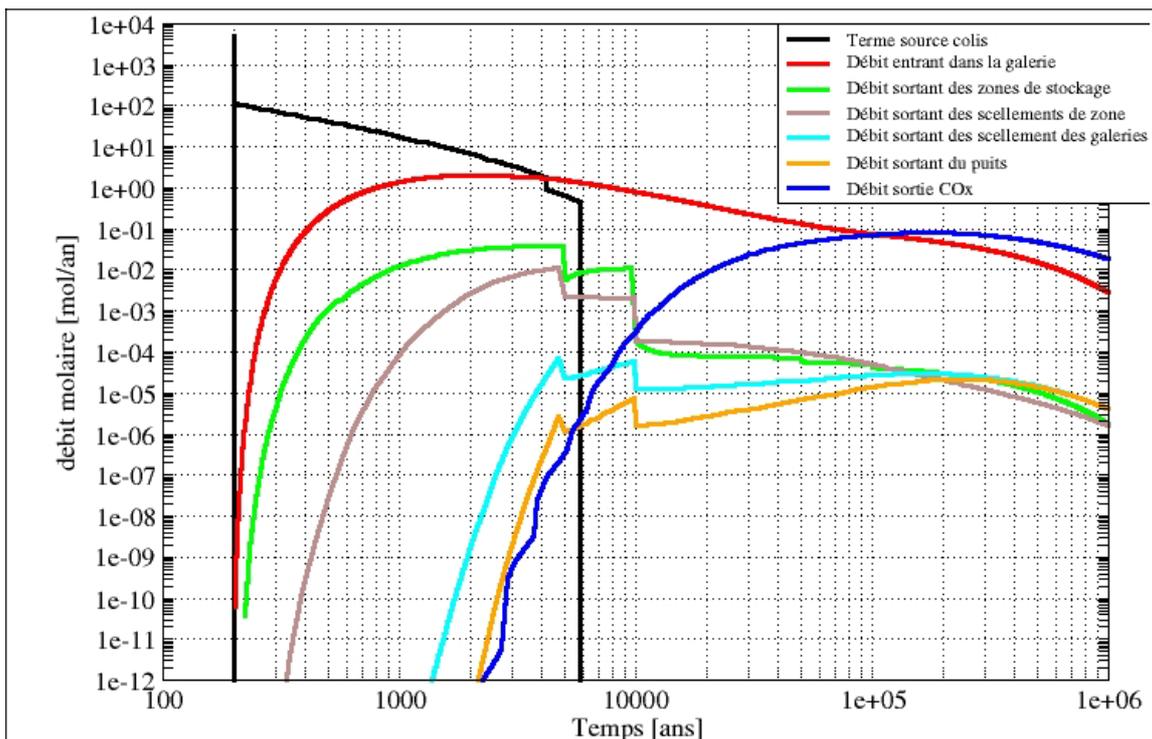


Figure 7.3-11 SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – cas tous colis défaillants- ¹²⁹I – combustibles usés CUI. [Calcul de sensibilité – tous colis défaillants]

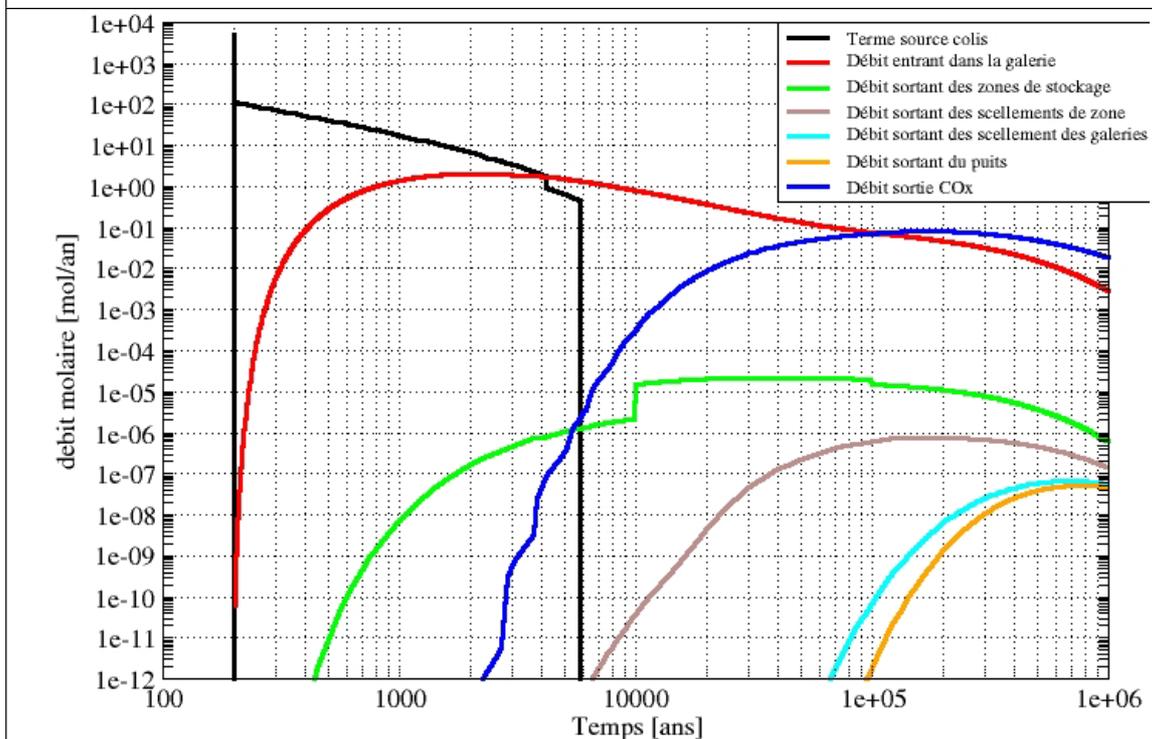


Figure 7.3-11 SEA « défaut de colis » – calcul de référence sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – cas tous colis défaillants- ¹²⁹I – combustibles usés CUI. [Calcul de référence – tous colis défaillants]

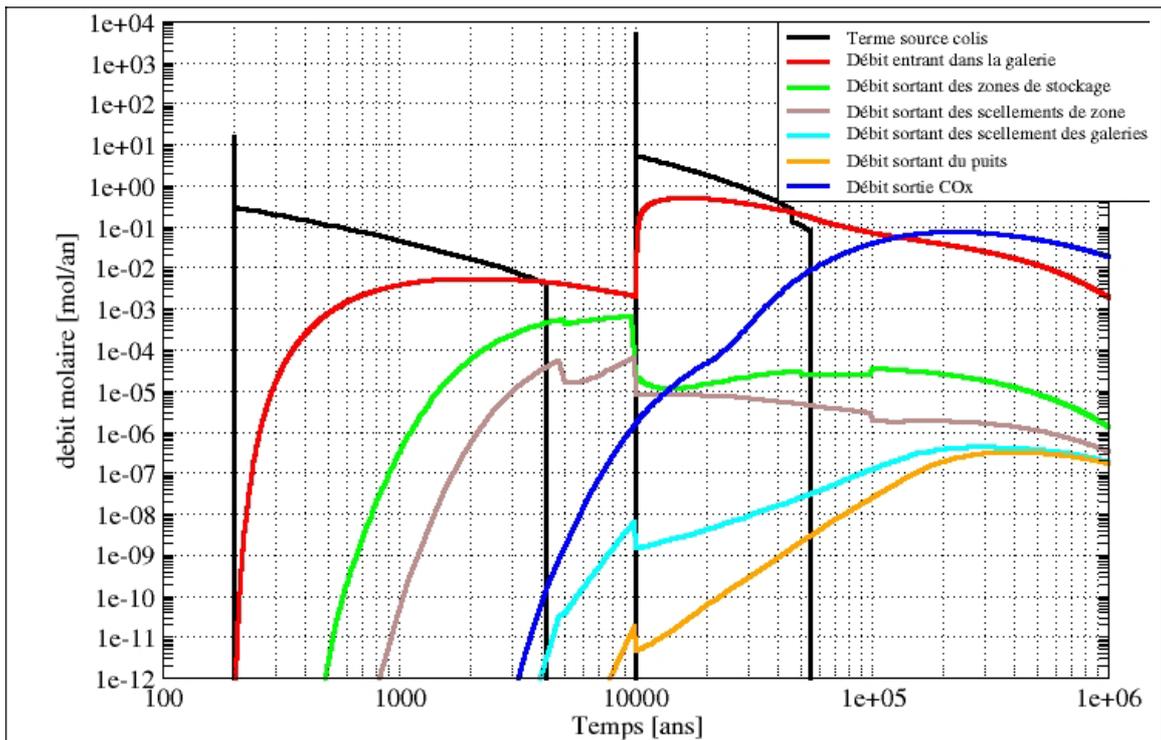


Figure 7.3-12 SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – prise en compte du degré de saturation des ouvrages sur la valeur de la perméabilité - ^{129}I – combustibles usés CUI. [Calcul de sensibilité – Prise en compte du degré de saturation – Fraction de colis défailants]

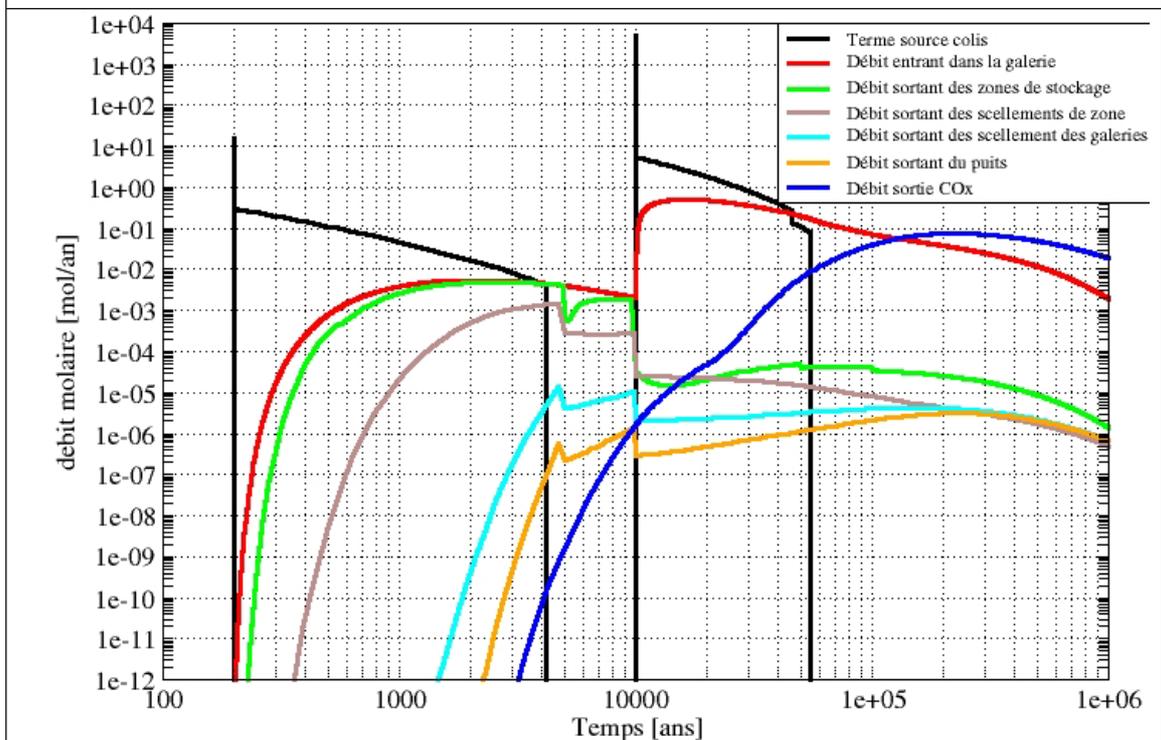


Figure 7.3-12 SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – prise en compte du degré de saturation des ouvrages sur la valeur de la perméabilité - ^{129}I – combustibles usés CUI. [Calcul de sensibilité (cas de base) – Fraction de colis défailants]

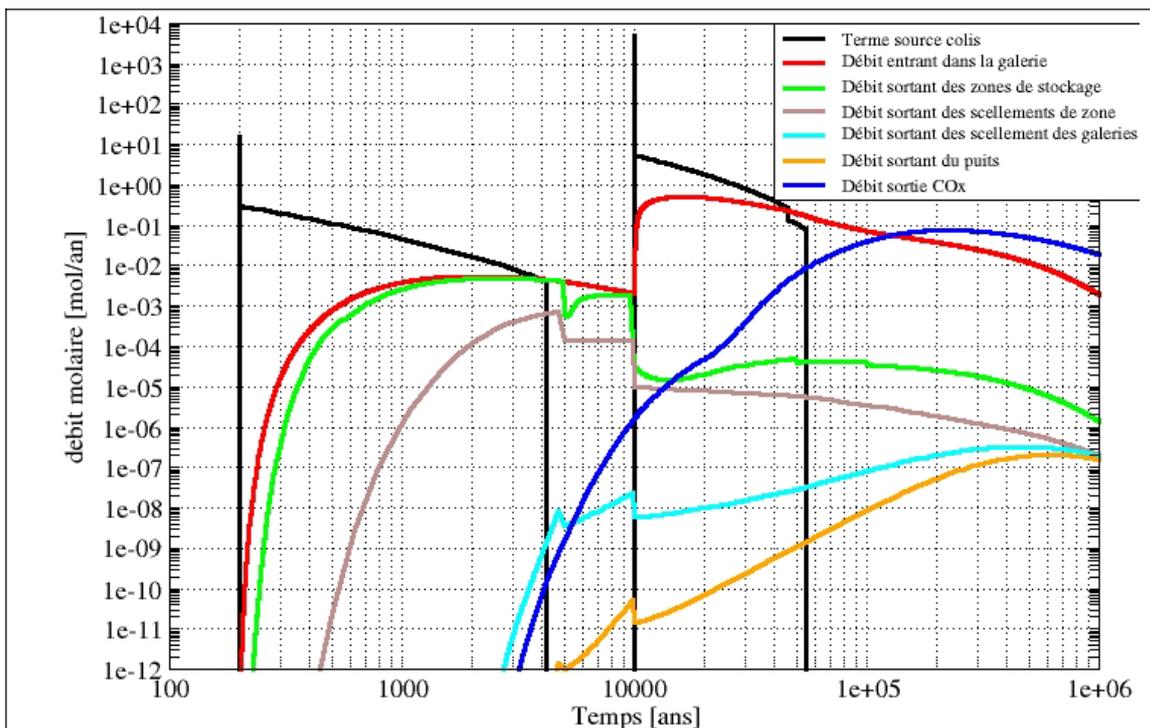


Figure 7.3-13 SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – prise en compte du perméabilité de l'ancrage équivalent des scellements de 10^{-10} m/s - ^{129}I – combustibles usés CUI. [Calcul de sensibilité – Prise en compte d'une perméabilité équivalente des ancrages de 10^{-10} m/s – Fraction de colis défailants]

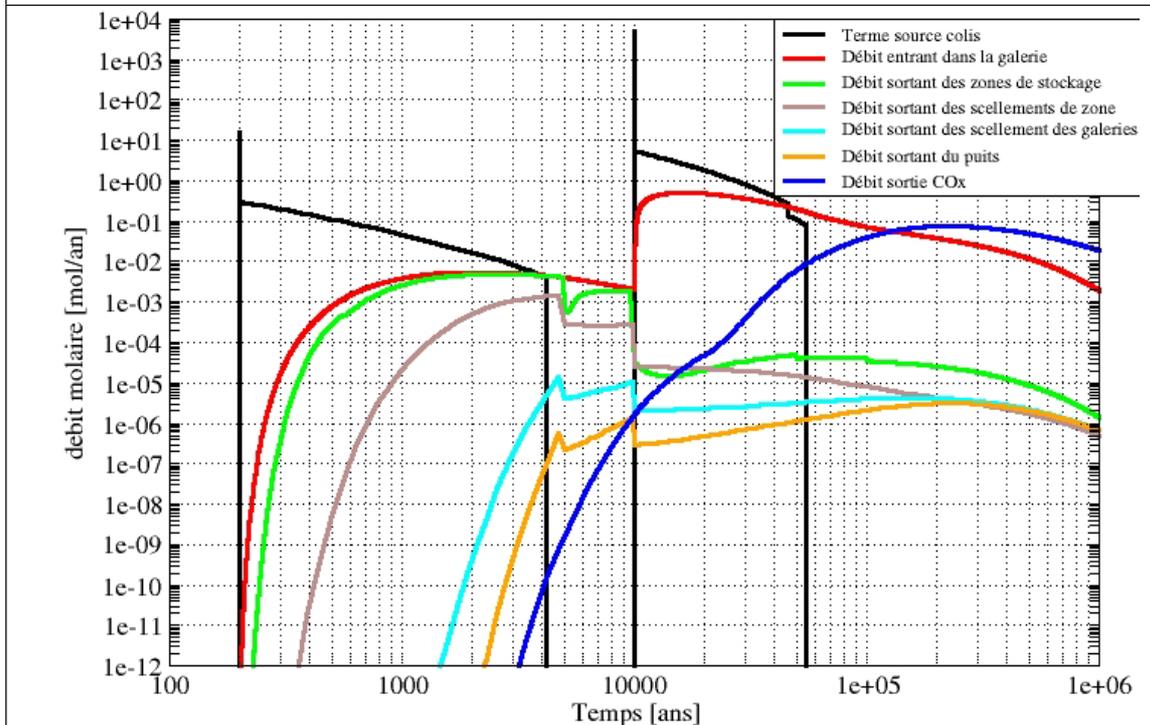


Figure 7.3-13 SEA « défaut de colis » – calcul de sensibilité sur l'influence du transitoire hydraulique – historique de débit molaire – prise en compte du perméabilité de l'ancrage équivalent des scellements de 10^{-10} m/s - ^{129}I – combustibles usés CUI. [Calcul de sensibilité (cas de base) – Perméabilité des ancrages équivalents de 10^{-9} m/s – Fraction de colis défailants]

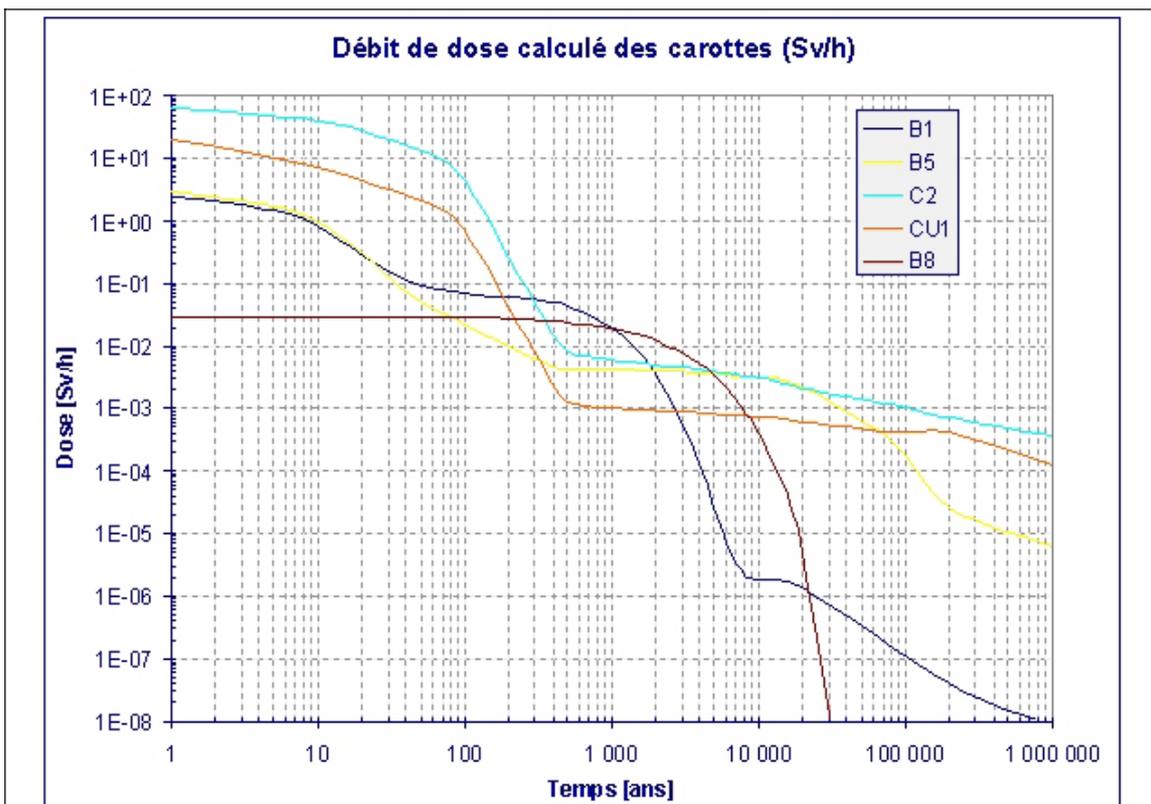


Figure 7.4-1 SEA forage dans le stockage avec remontée de carottes de déchets - Débit de dose des carottes de déchets – colis types B1, B5, C2, CU1, B8

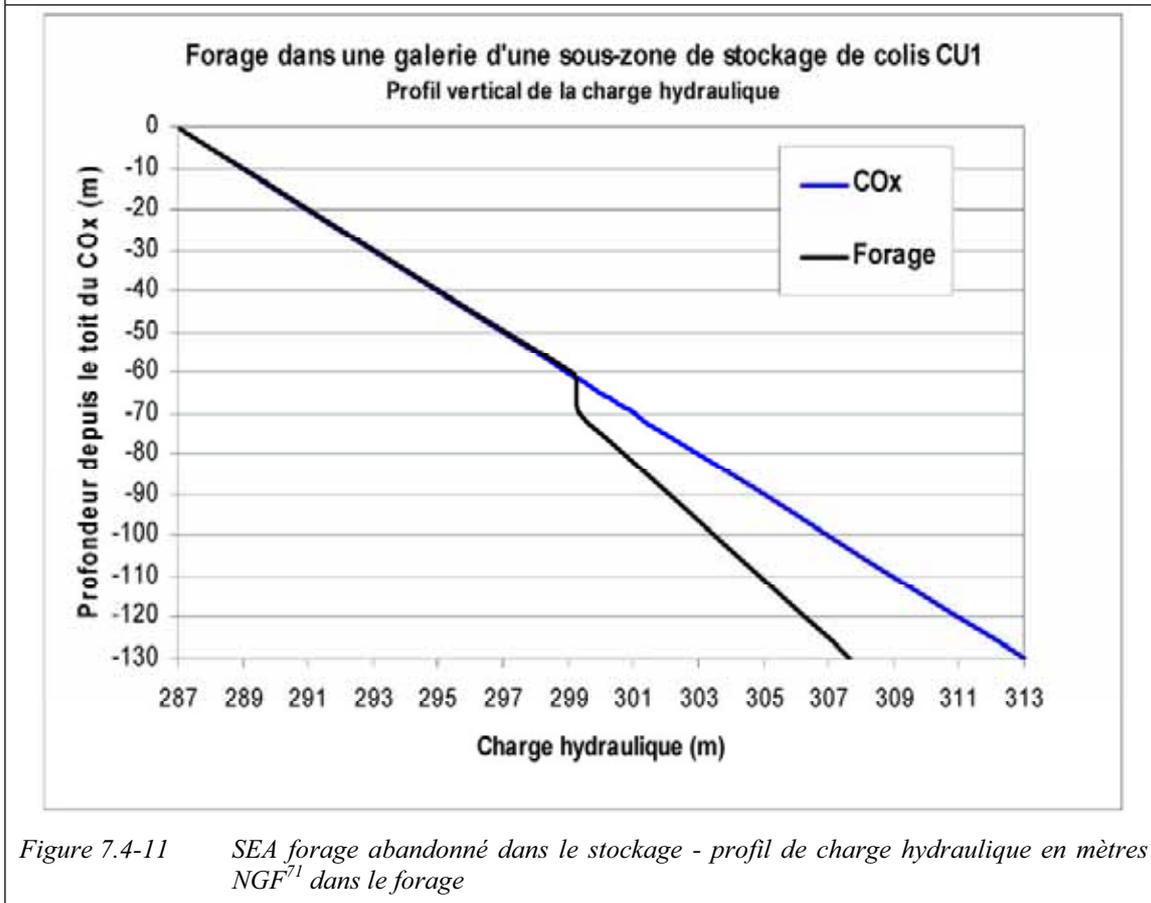


Figure 7.4-11 SEA forage abandonné dans le stockage - profil de charge hydraulique en mètres NGF⁷¹ dans le forage

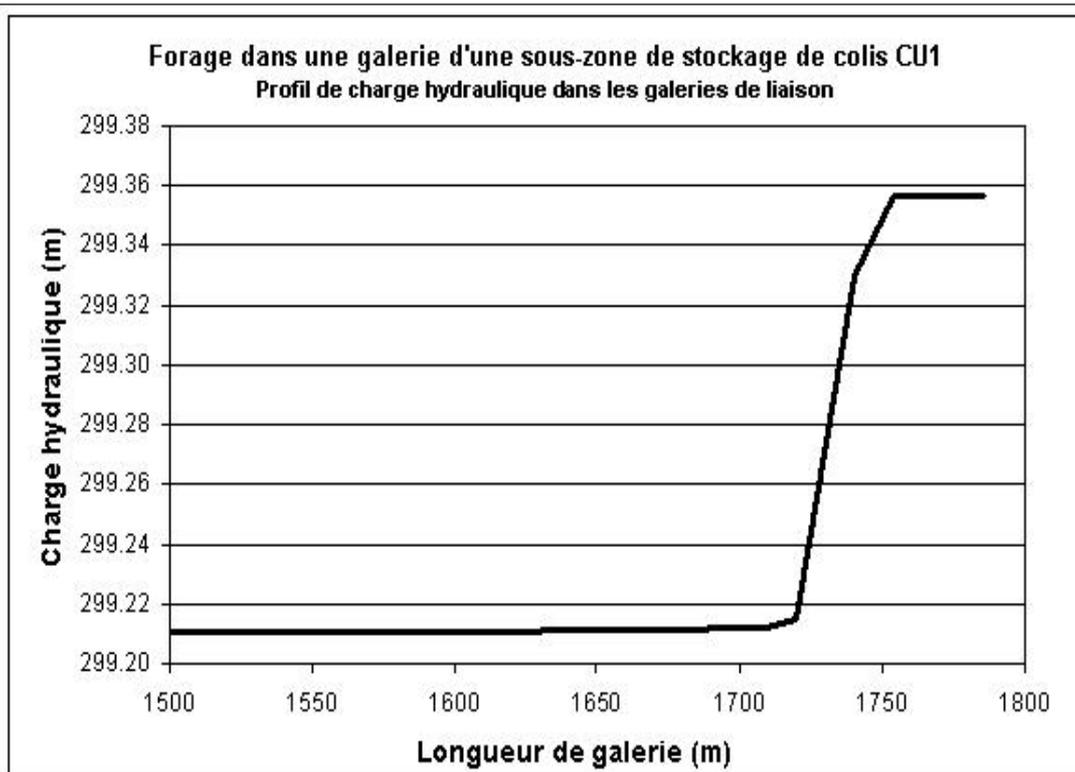


Figure 7.4-12 SEA forage abandonné dans le stockage - profil de charge hydraulique en mètres NGF⁷¹ dans les galeries (l'extrémité droite représente un passage de scellement)

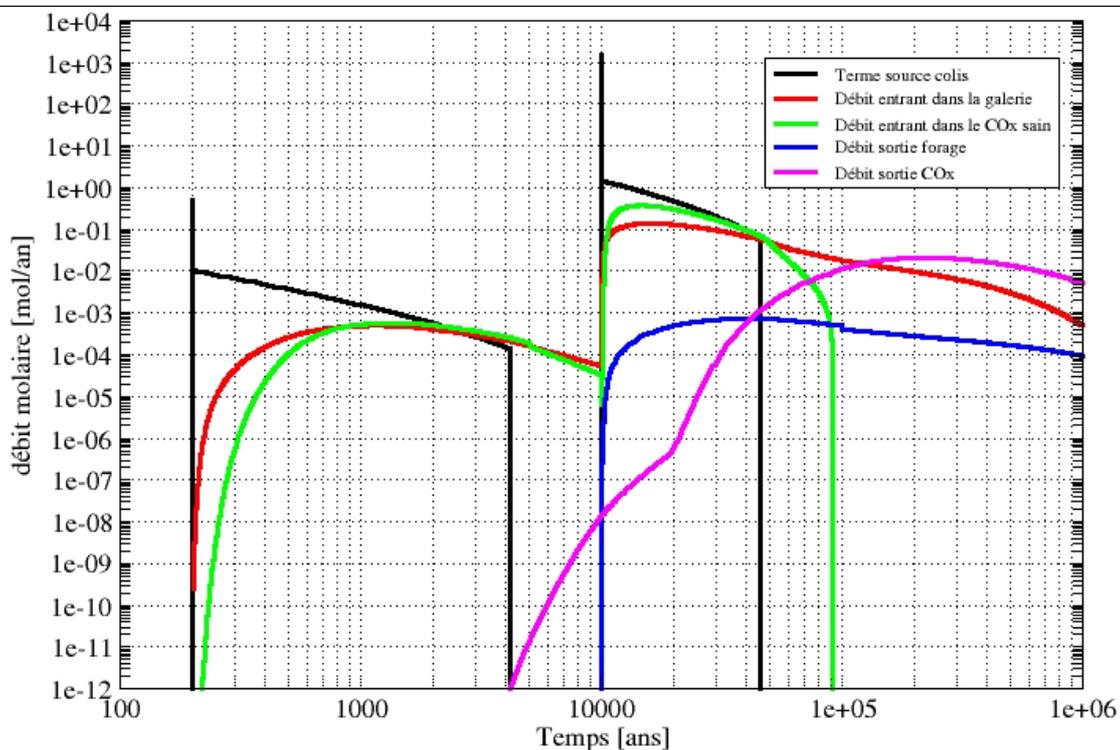


Figure 7.4-16 SEA forage abandonné dans le stockage - Historique de débit molaire en champ proche et détail de répartition des voies de transfert - ¹²⁹I

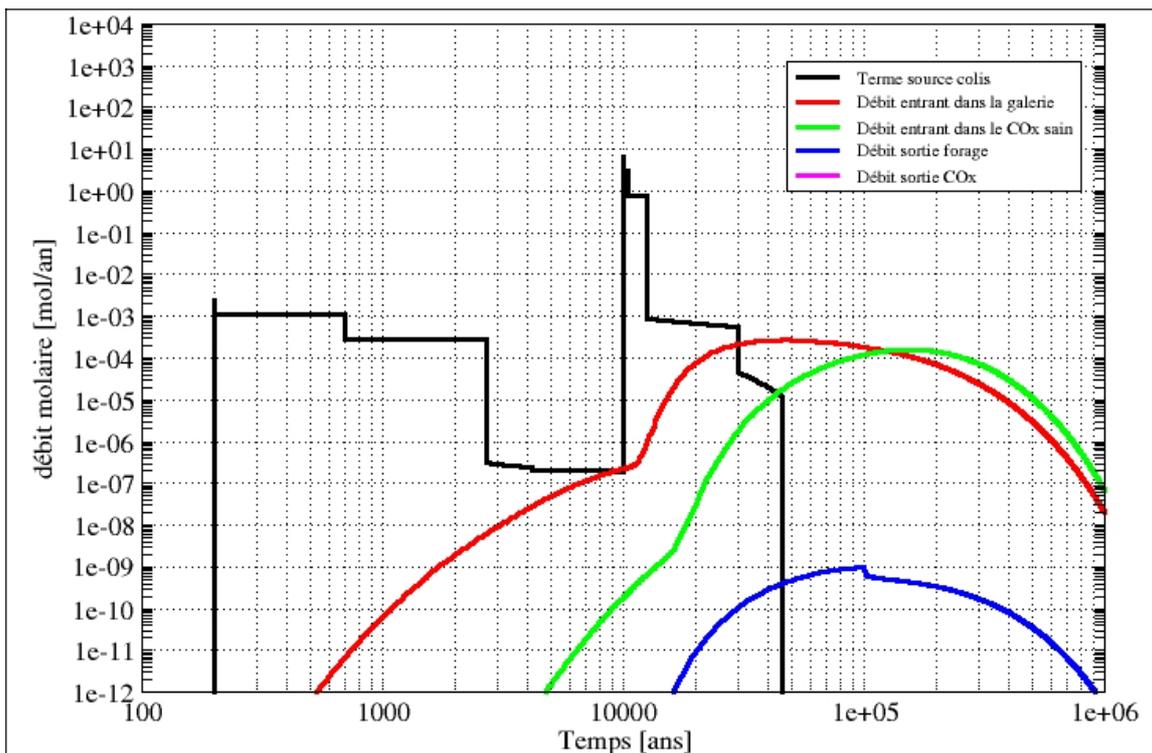


Figure 7.4-17 SEA forage abandonné dans le stockage - Historique de débit molaire en champ proche et détail de répartition des voies de transfert – Nickel 59

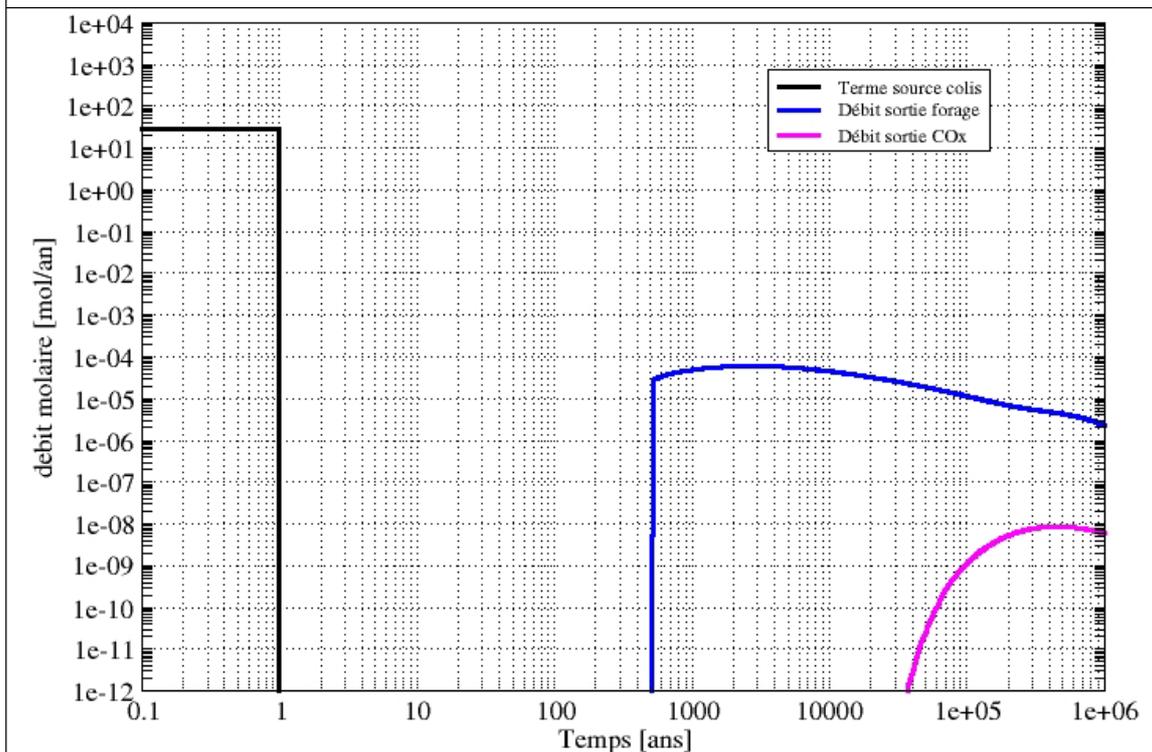


Figure 7.4-19 SEA forage abandonné dans une alvéole de déchets B - Historique de débit molaire en champ proche – colis type B1x – ¹²⁹I

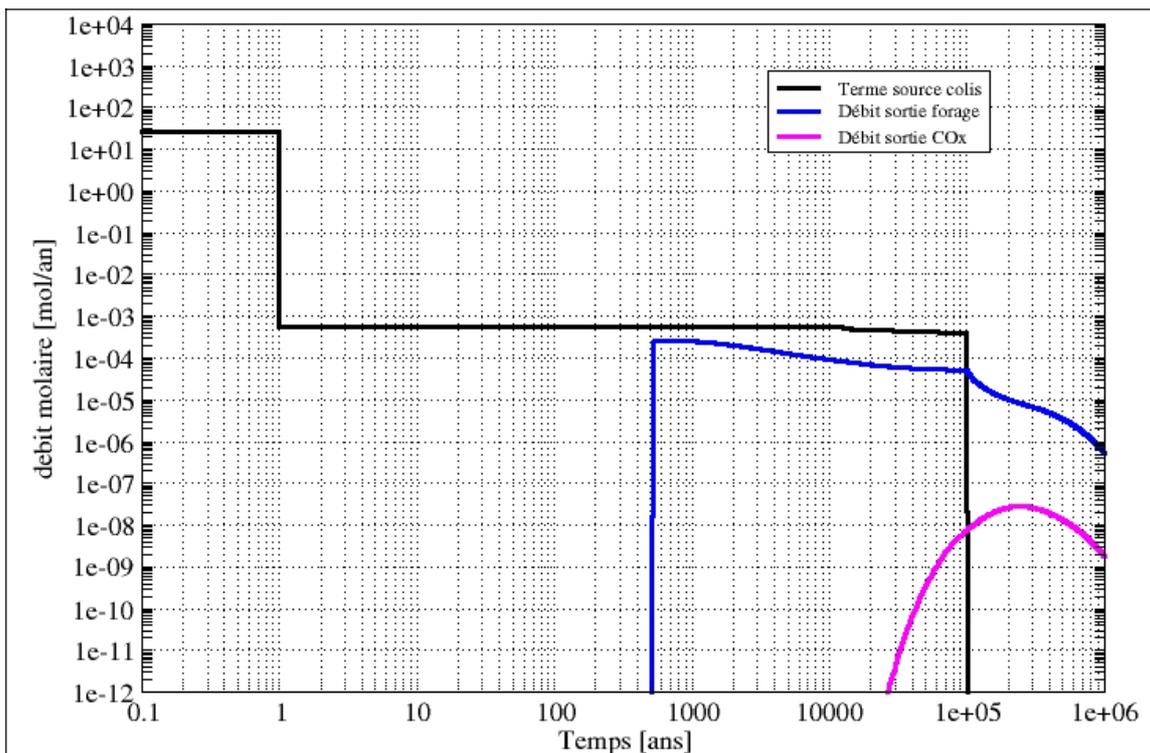


Figure 7.4-20 SEA forage abandonné dans une alvéole de déchets B - Historique de débit molaire en champ proche – colis type B1x – ^{36}Cl

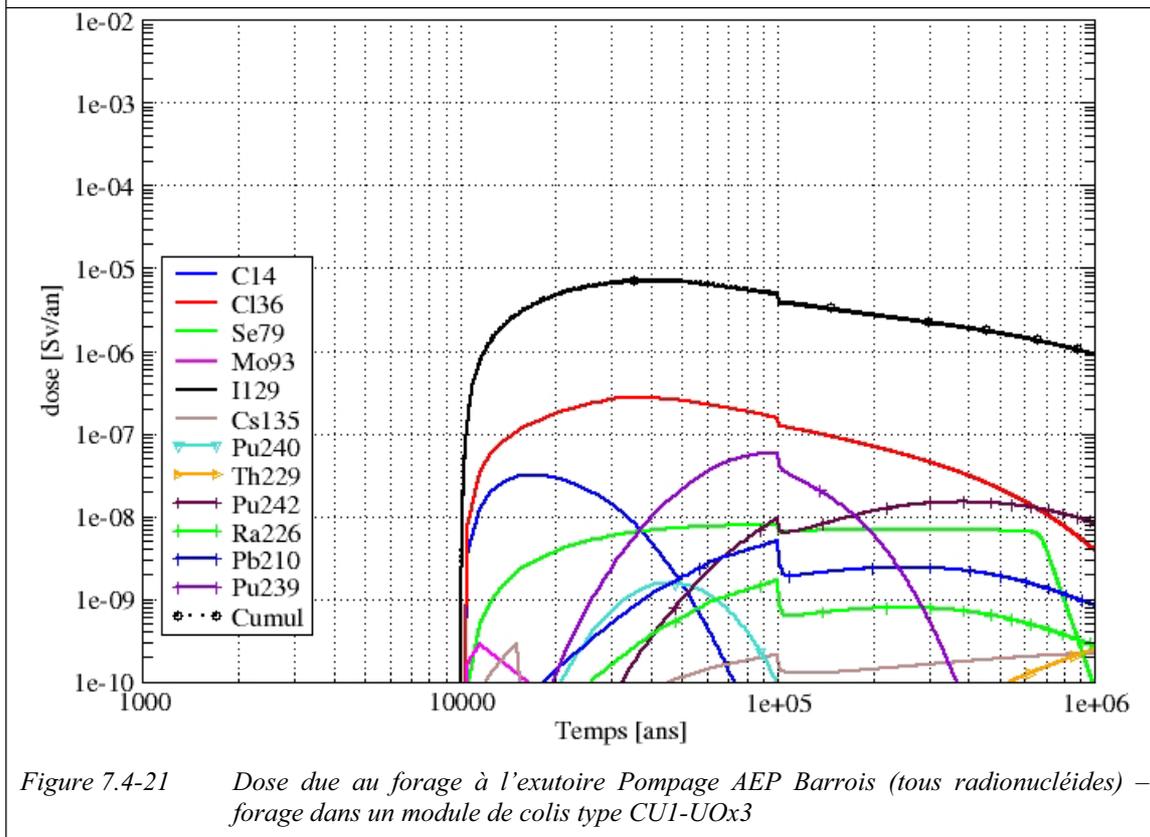


Figure 7.4-21 Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP Barrois (tous radionucléides) – forage dans un module de colis type CU1-UOx3

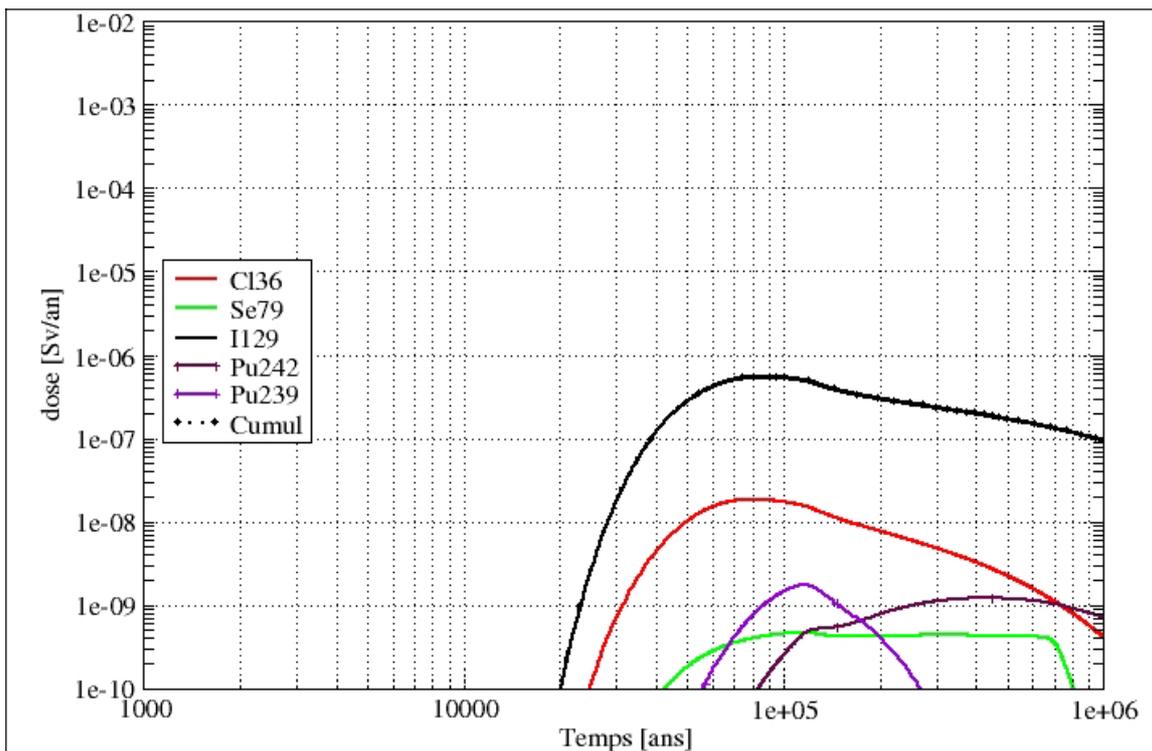


Figure 7.4-22 Dose due au forage à l'exutoire « Saulx » - (Produits de fission et d'activation) – forage dans un module de colis type CUI-UOx3

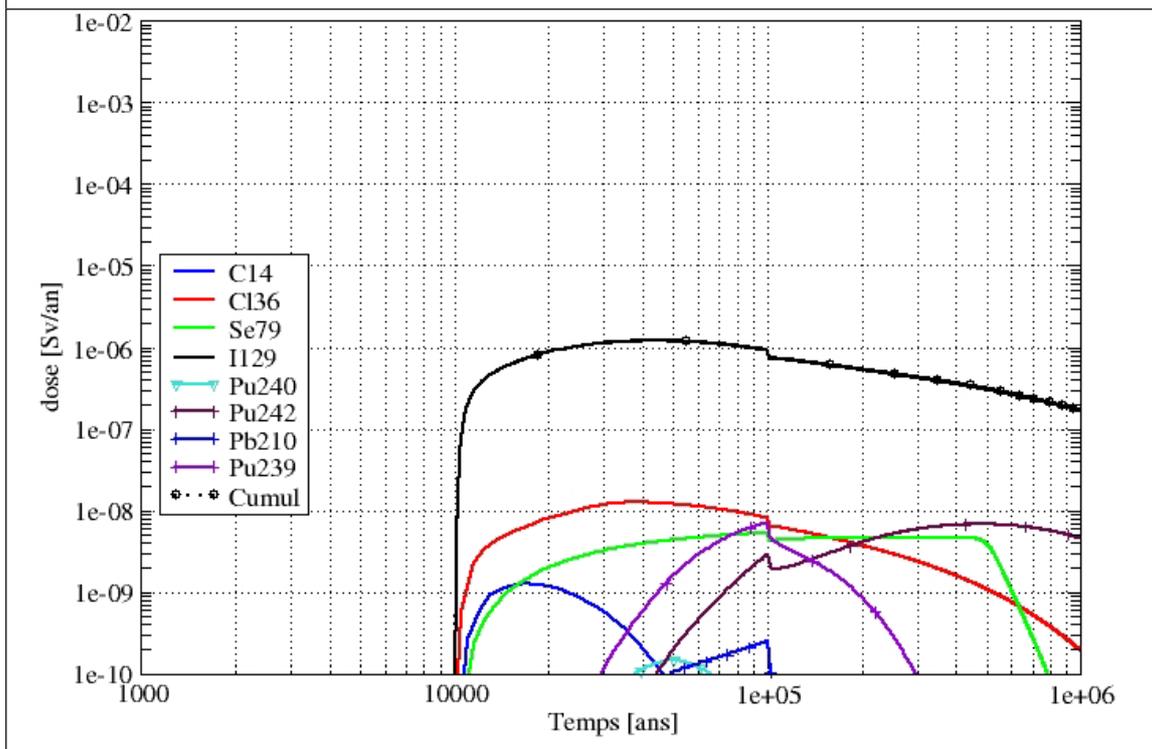


Figure 7.4-23 SEA forage abandonné dans le stockage - Calcul de référence – Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP dans le Barrois (tout radionucléides)- forage dans un module de colis type CU2

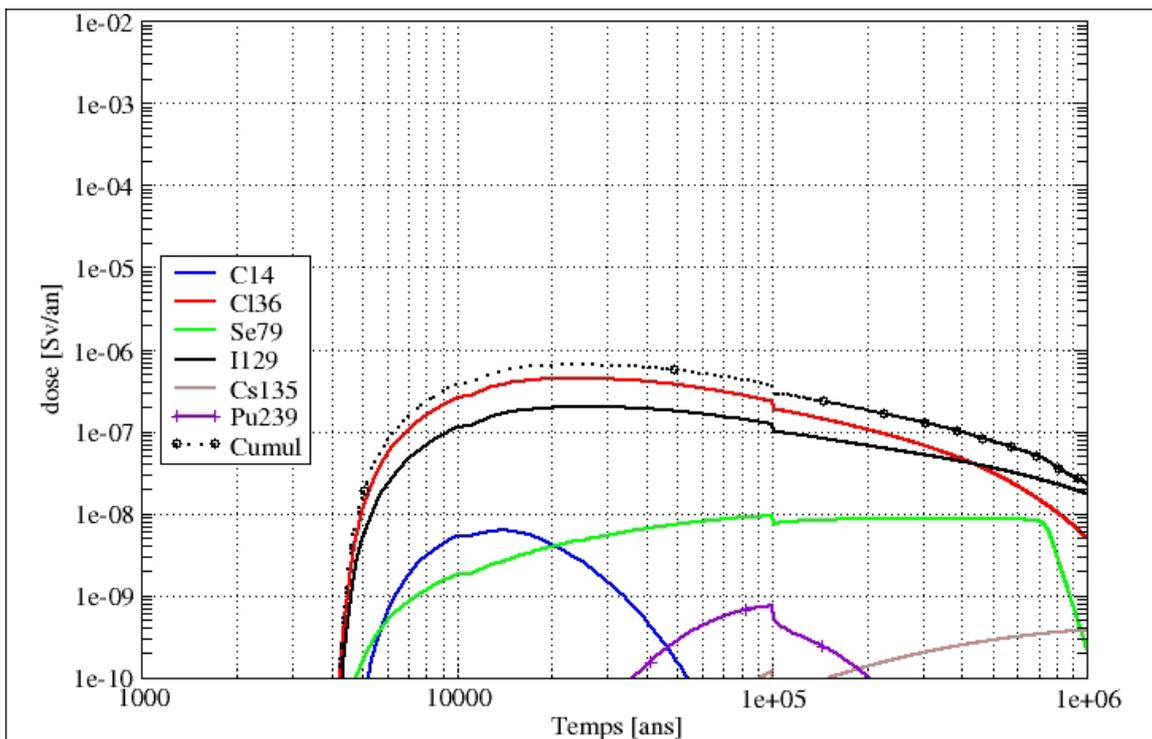


Figure 7.4-24 SEA forage abandonné dans le stockage - Calcul de référence - Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP Barrois (tout radionucléides) - forage dans un module de colis types C2

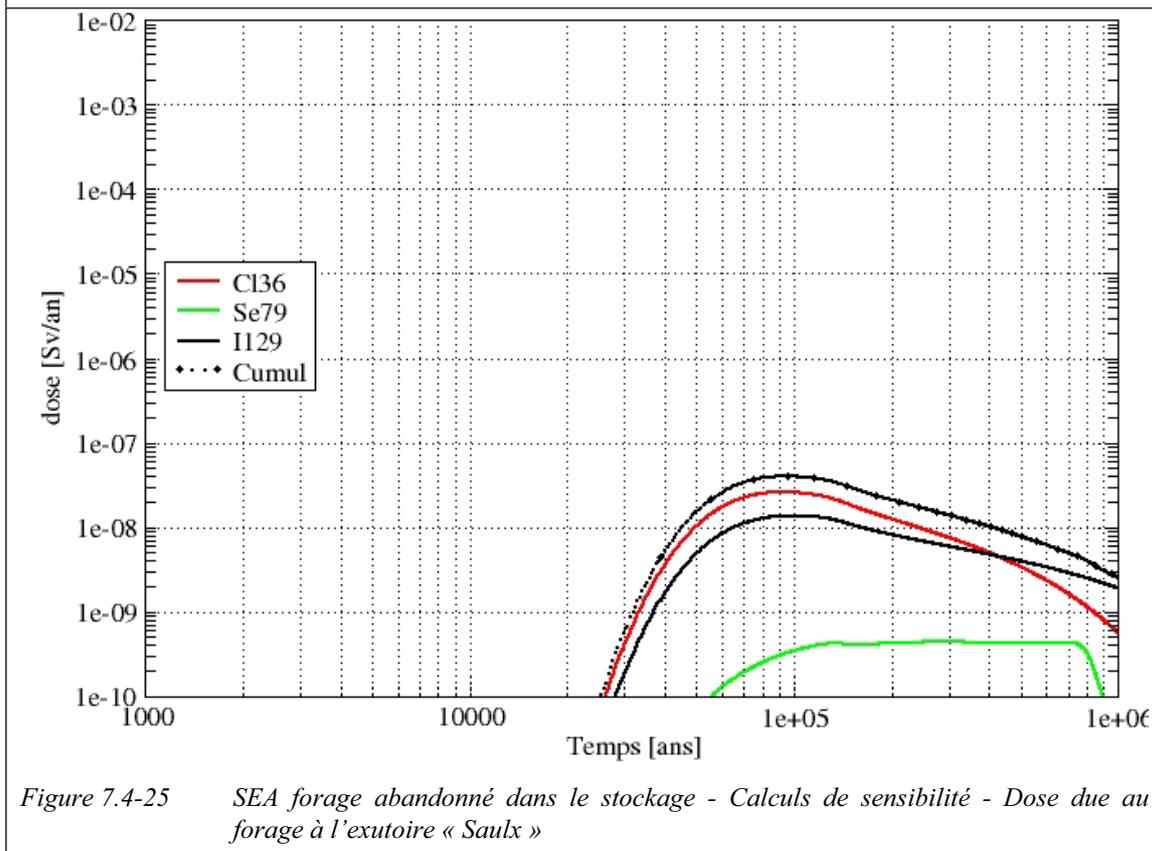


Figure 7.4-25 SEA forage abandonné dans le stockage - Calculs de sensibilité - Dose due au forage à l'exutoire « Saulx »

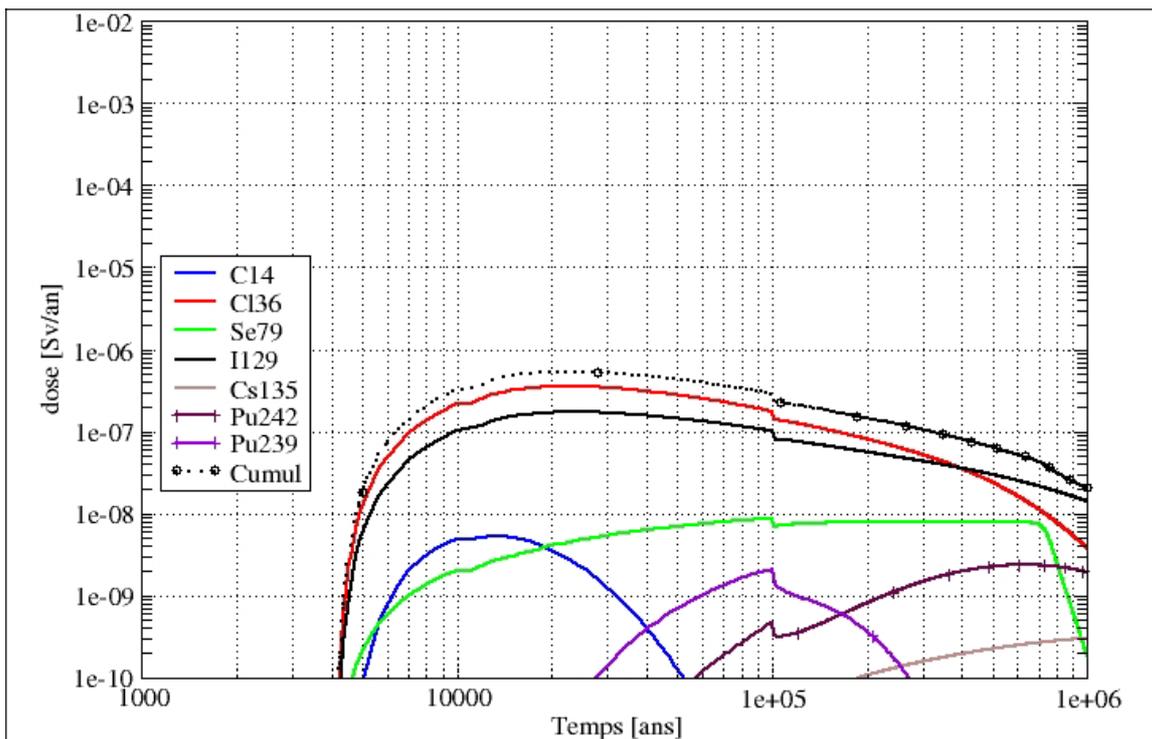


Figure 7.4-26 SEA forage abandonné dans le stockage - Calcul de référence – Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP dans le Barrois (tous radionucléides) - forage dans un module de colis types C4

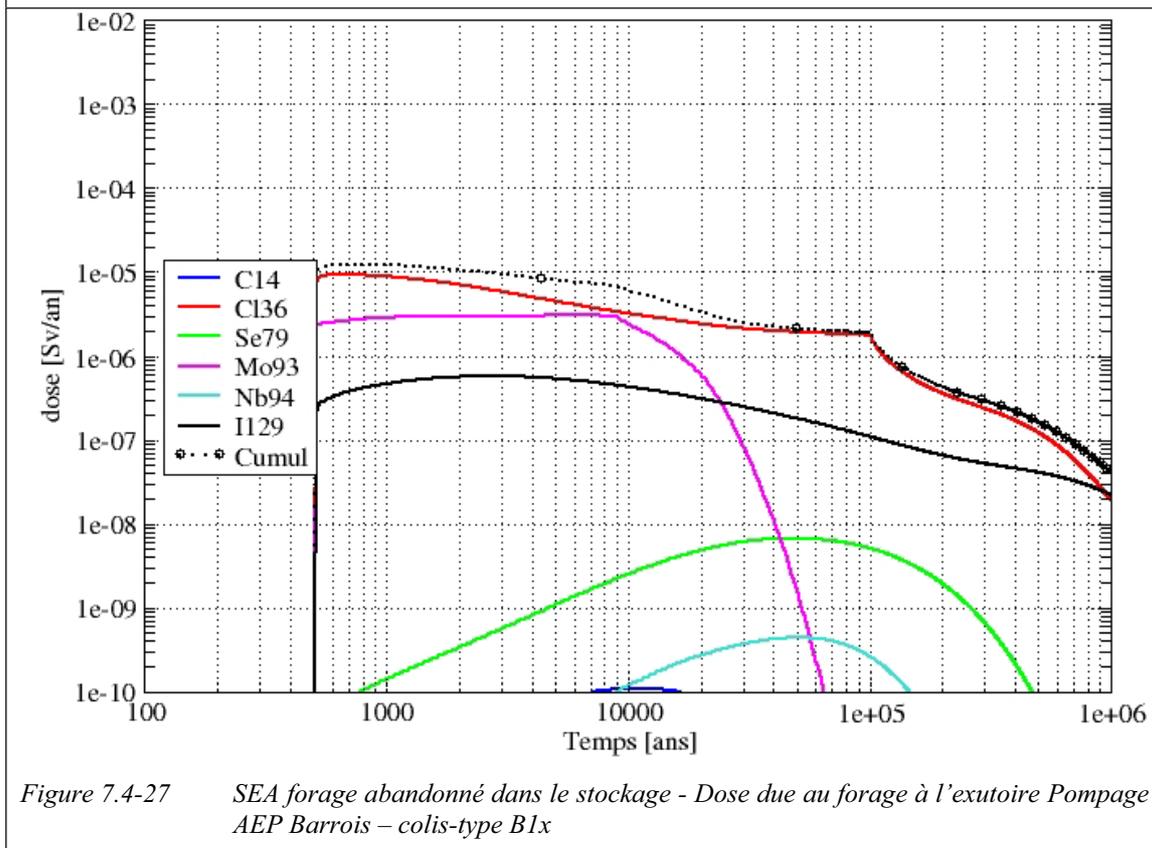


Figure 7.4-27 SEA forage abandonné dans le stockage - Dose due au forage à l'exutoire Pompage AEP Barrois – colis-type B1x

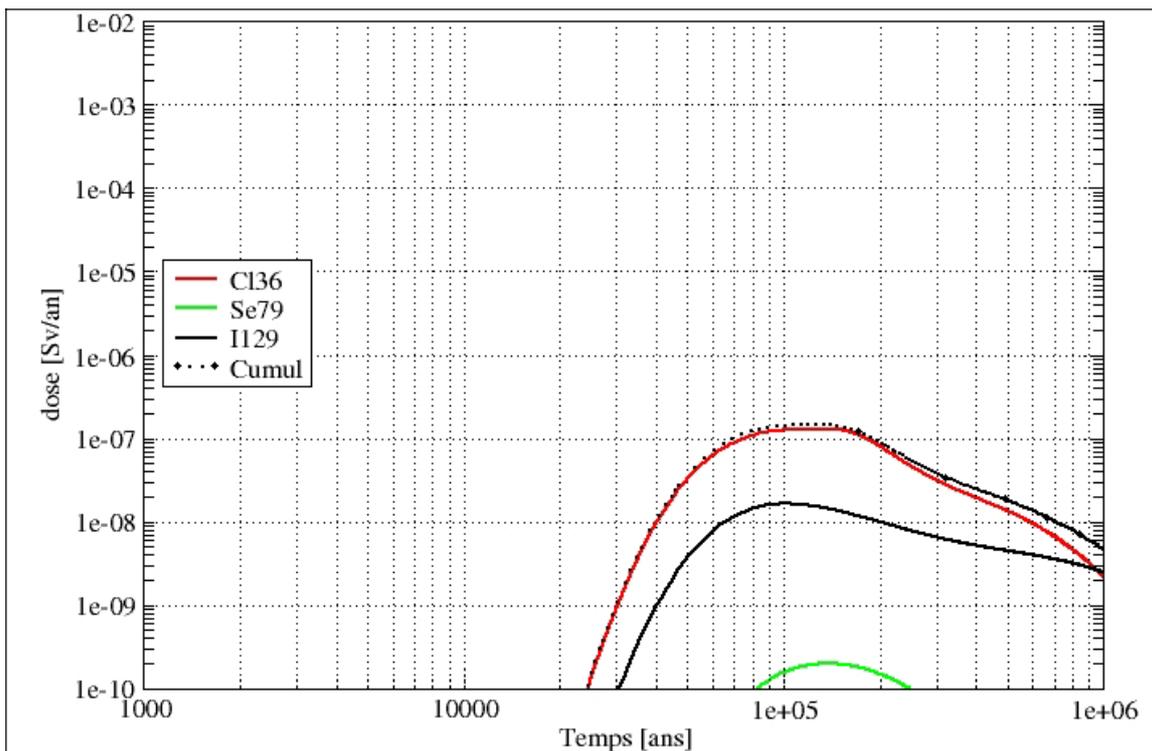


Figure 7.4-28 SEA forage abandonné dans le stockage - Dose due au forage – Exutoire Pompage à proximité de la Saulx – Colis type B1x

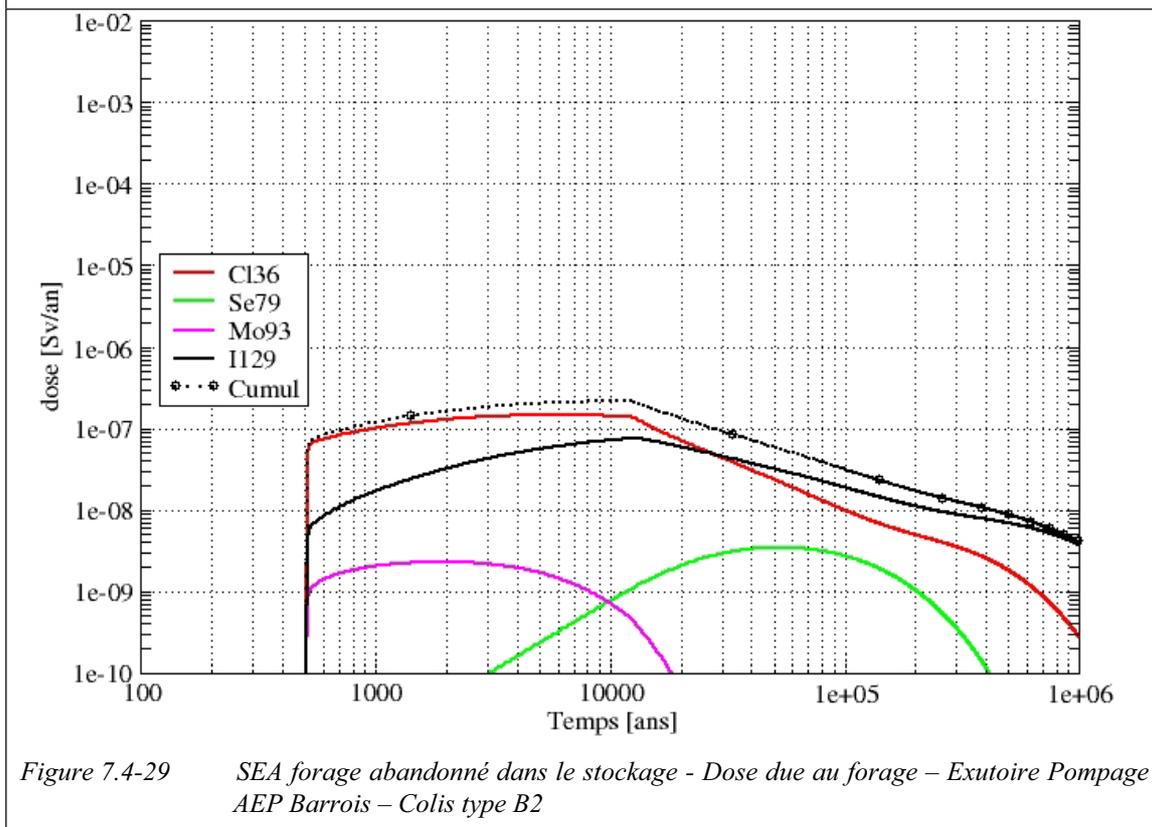


Figure 7.4-29 SEA forage abandonné dans le stockage - Dose due au forage – Exutoire Pompage AEP Barrois – Colis type B2

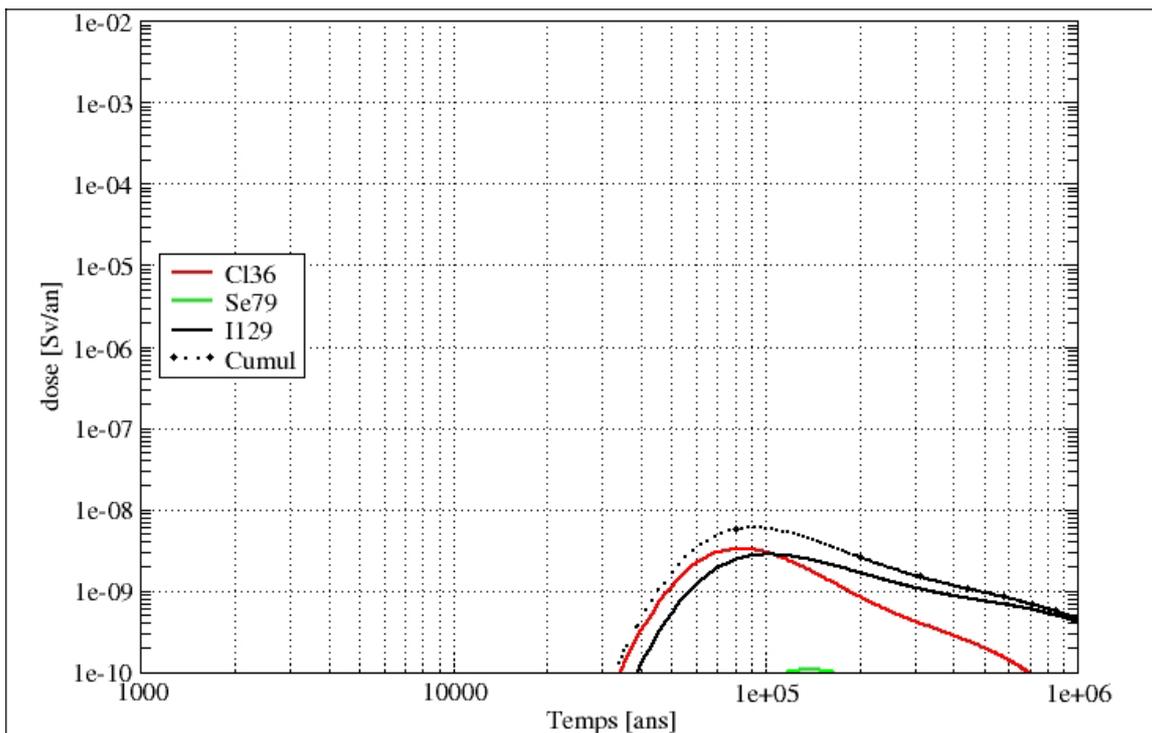


Figure 7.4-30 SEA forage abandonné dans le stockage - Dose due au forage – Exutoire Pompage à proximité de la Saulx – Colis type B2 Bitumes

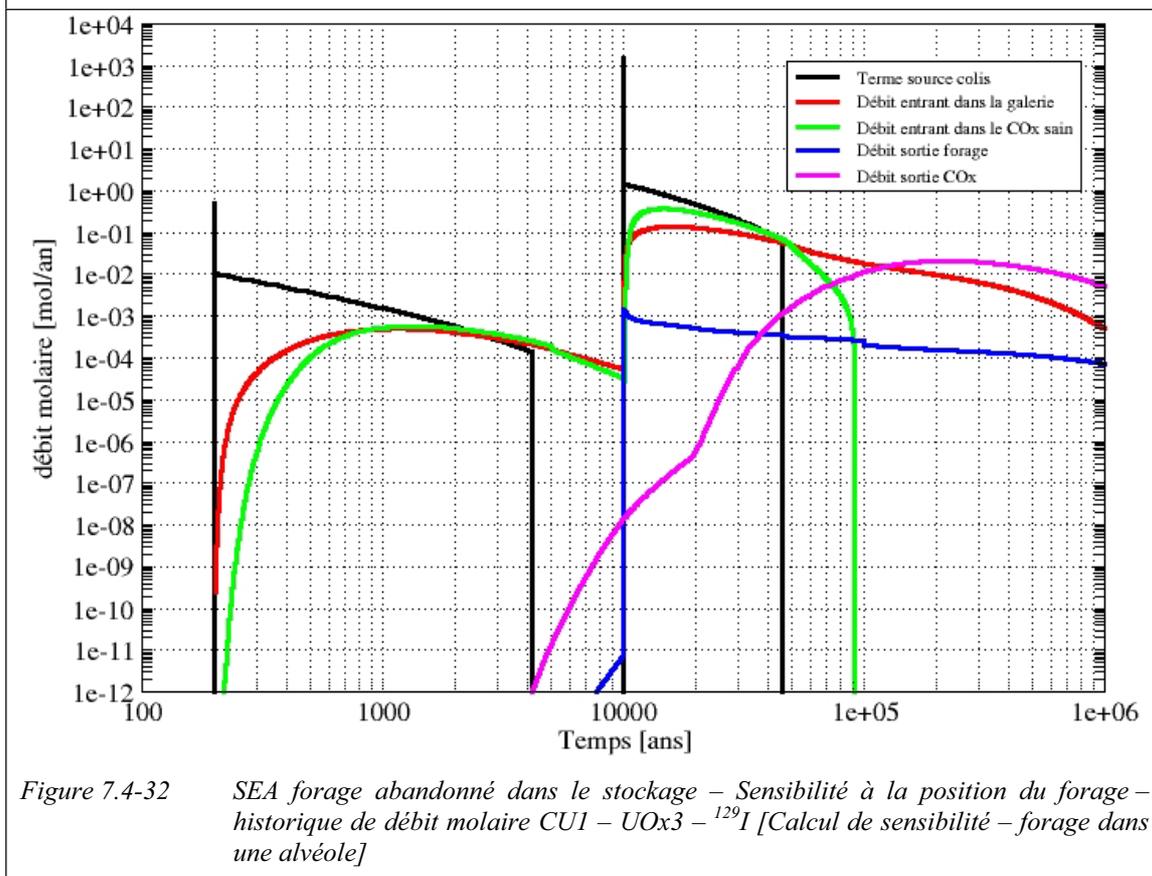


Figure 7.4-32 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire CUI – UOx3 – ¹²⁹I [Calcul de sensibilité – forage dans une alvéole]

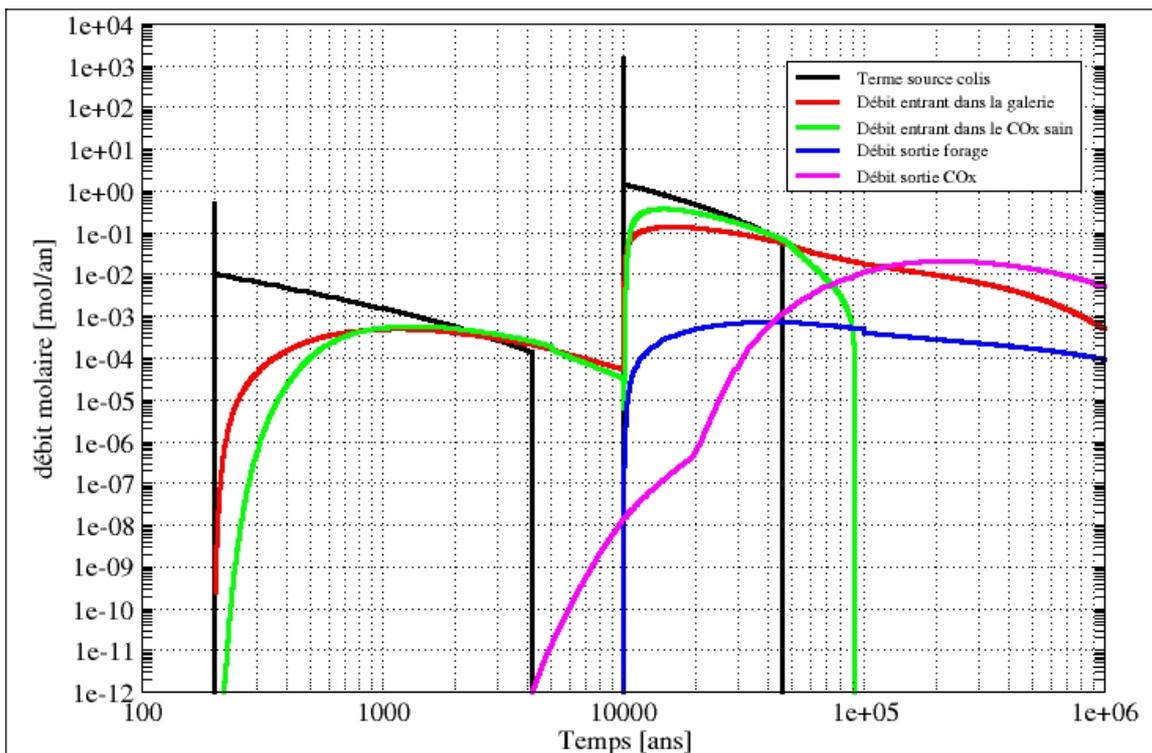


Figure 7.4-32 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire $CU1 - UOx3 - ^{129}I$ [Calcul de référence – forage dans une galerie d'accès]

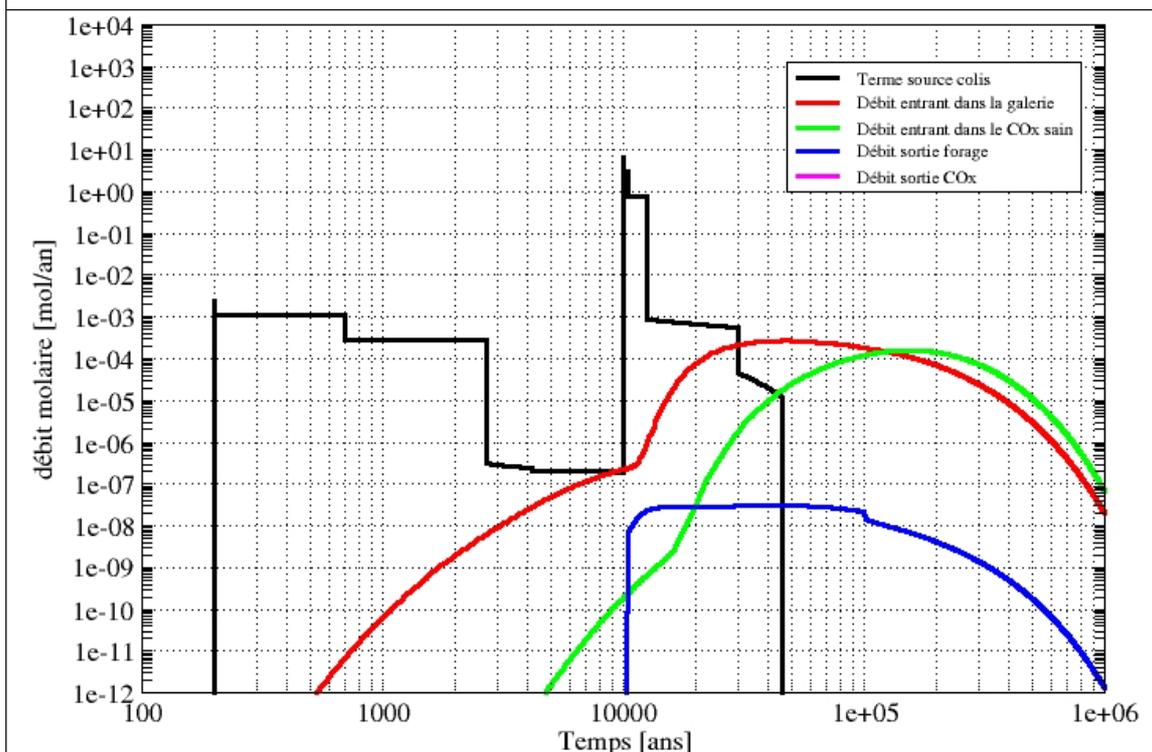


Figure 7.4-33 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire $CU - ^{59}Ni$ [Calcul de sensibilité – forage dans une alvéole]

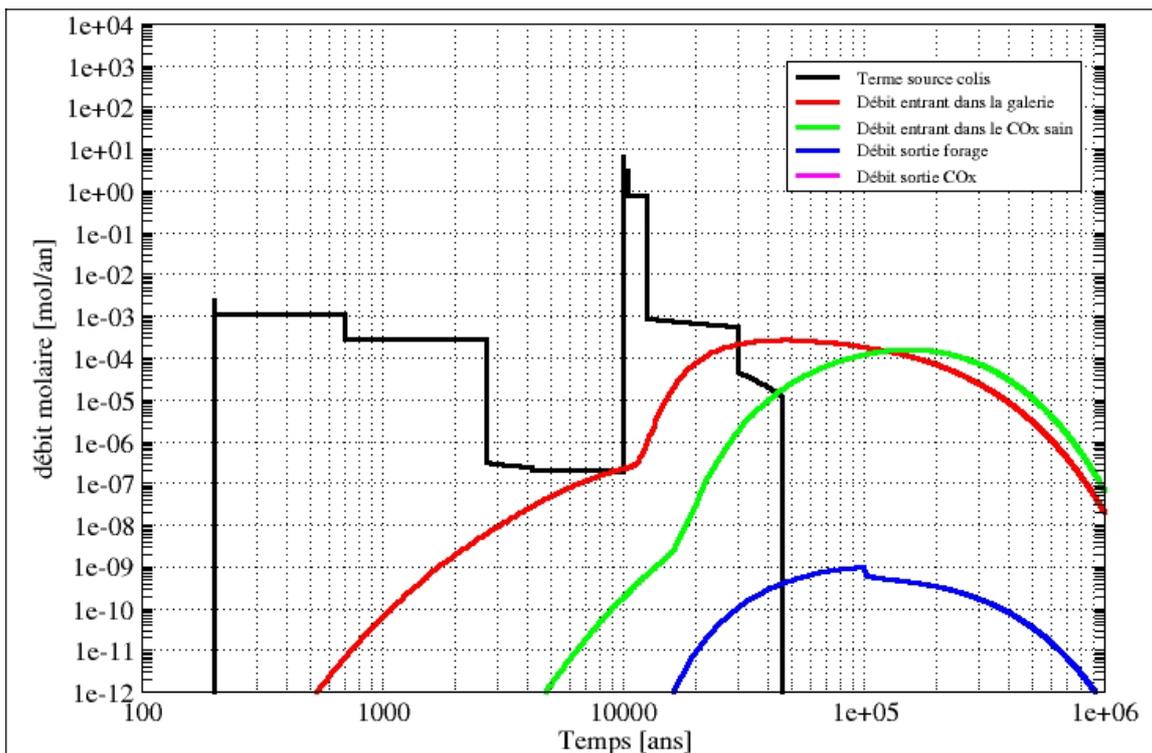


Figure 7.4-33 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire CU – ⁵⁹Ni [Calcul de référence – forage dans une galerie d'accès]

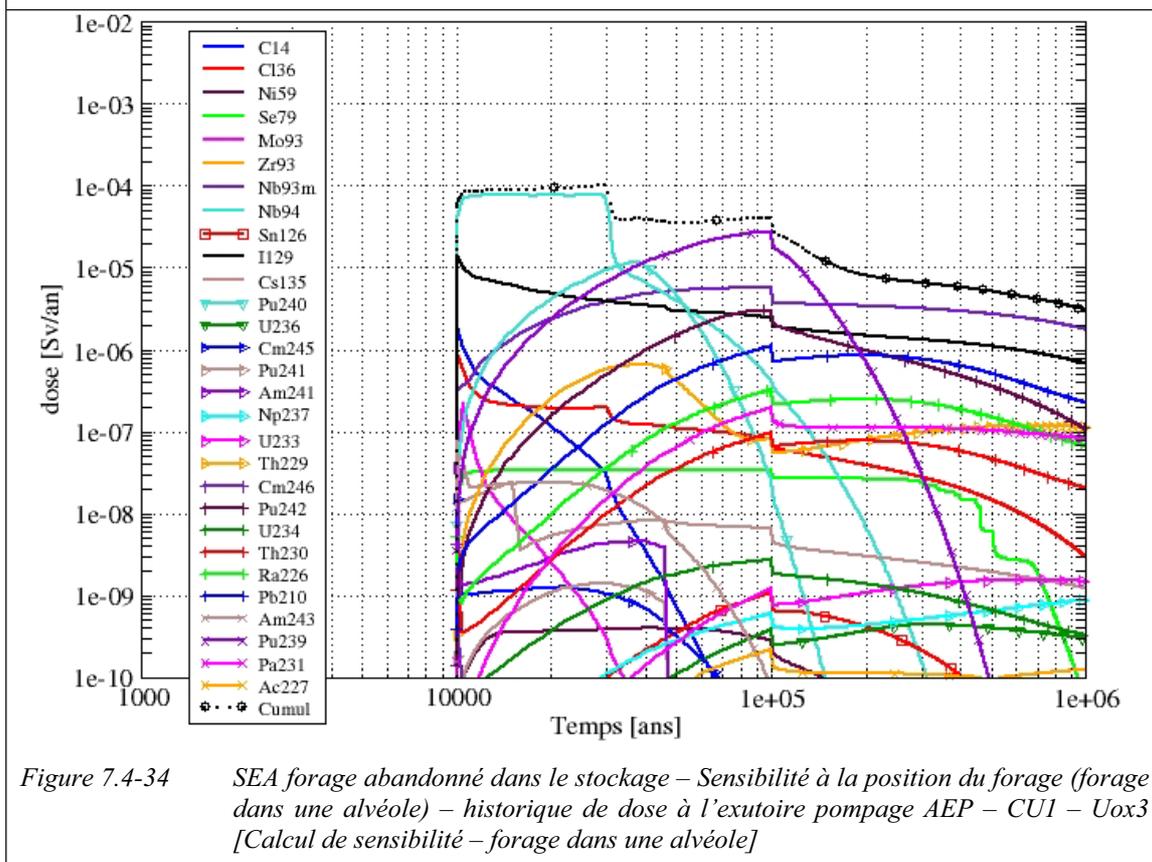


Figure 7.4-34 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage (forage dans une alvéole) – historique de dose à l'exutoire pompage AEP – CU1 – Uox3 [Calcul de sensibilité – forage dans une alvéole]

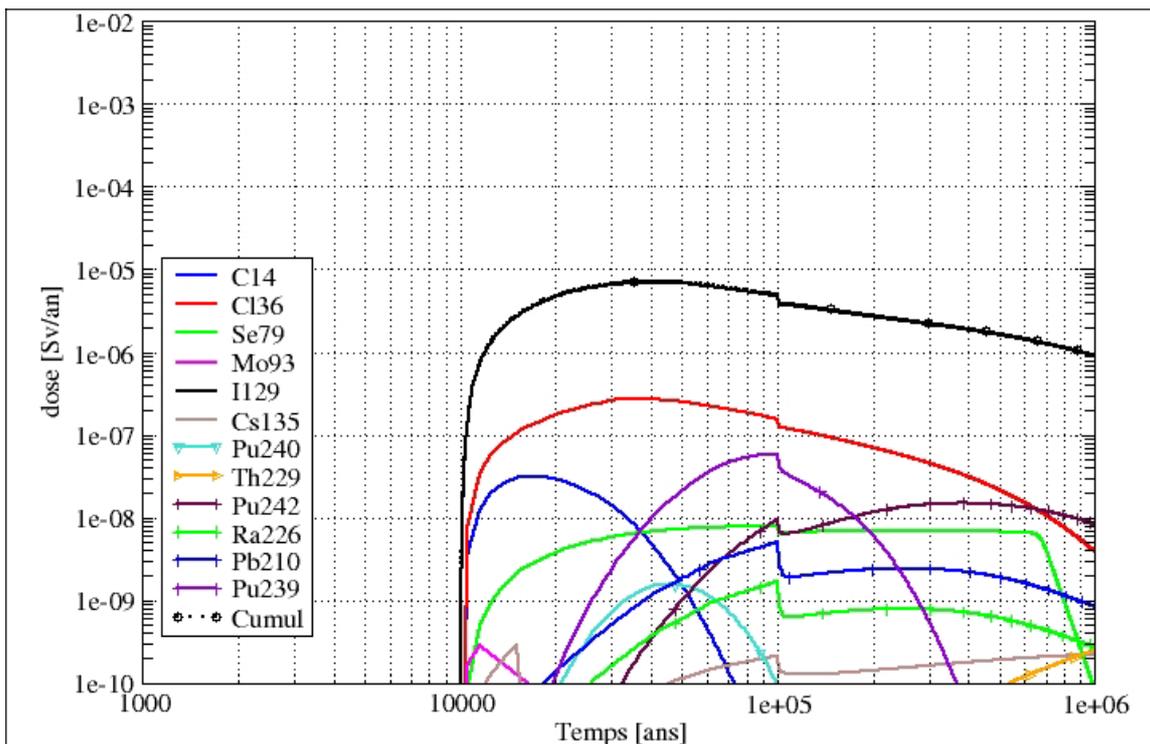


Figure 7.4-34 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage (forage dans une alvéole) – historique de dose à l'exutoire pompage AEP – CU1 – Uox3 [Calcul de référence – forage dans une galerie d'accès]

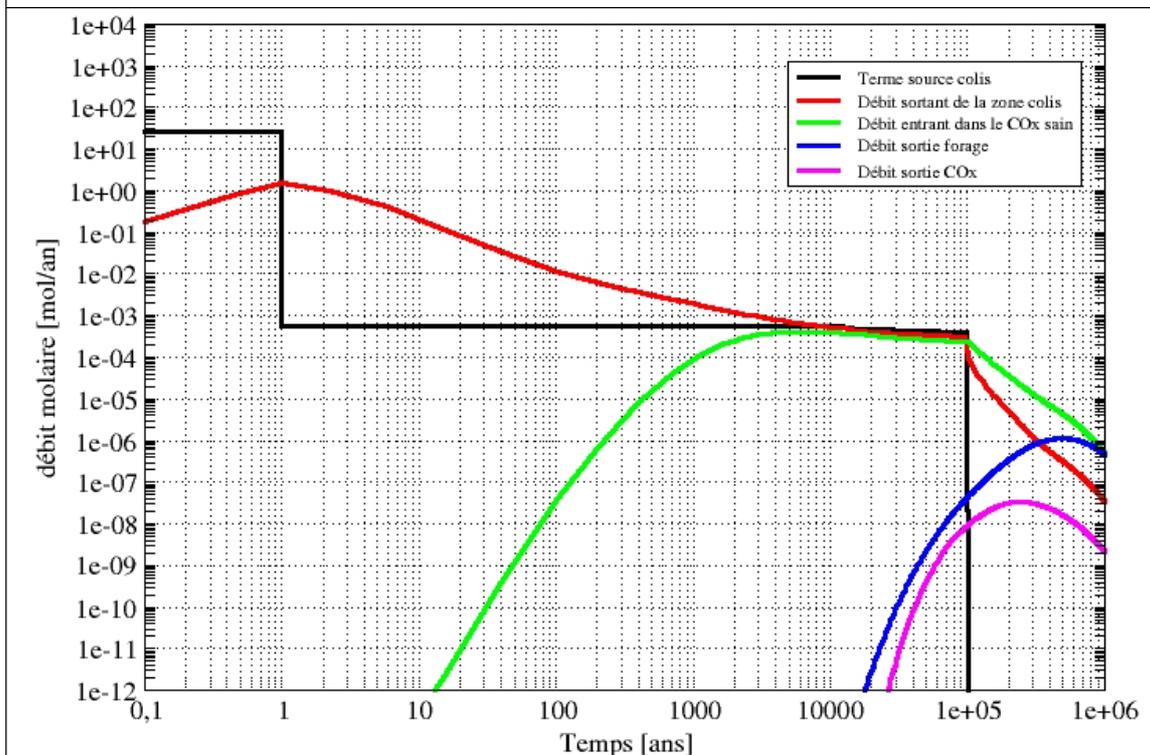


Figure 7.4-36 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ^{36}Cl [Calcul de sensibilité – forage dans une galerie de liaison]

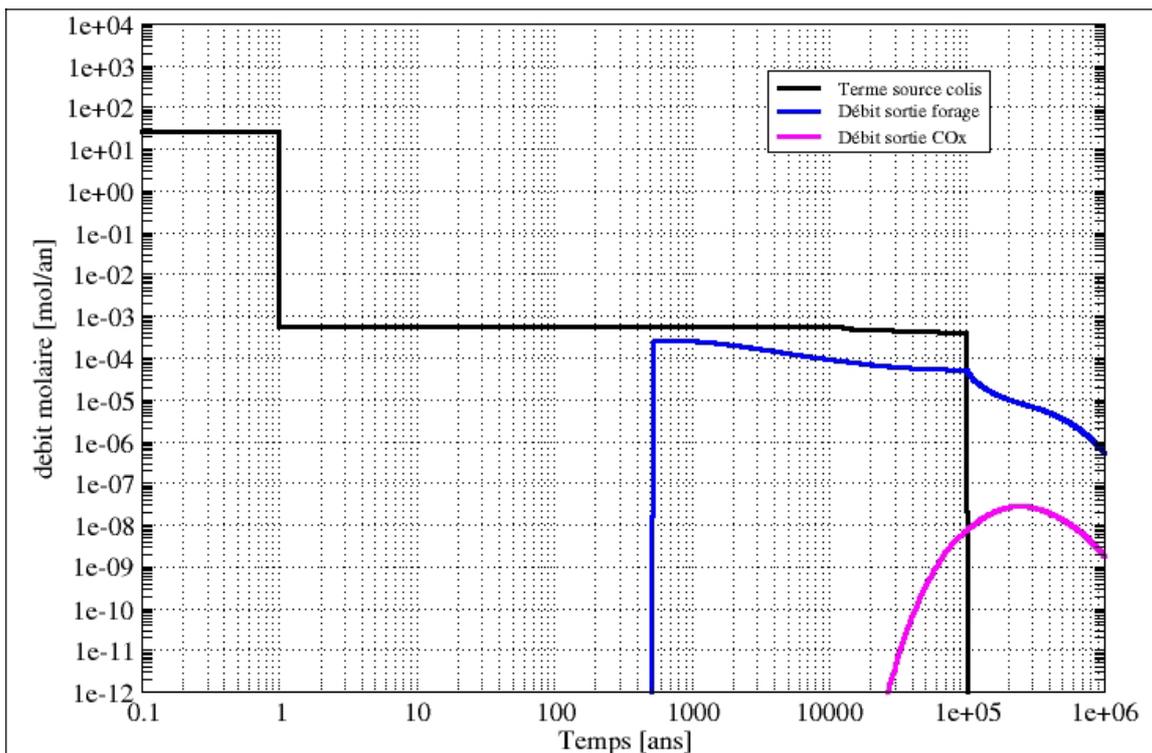


Figure 7.4-36 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d’hydrogène – ³⁶Cl [Calcul de référence – forage dans une alvéole de déchet B]

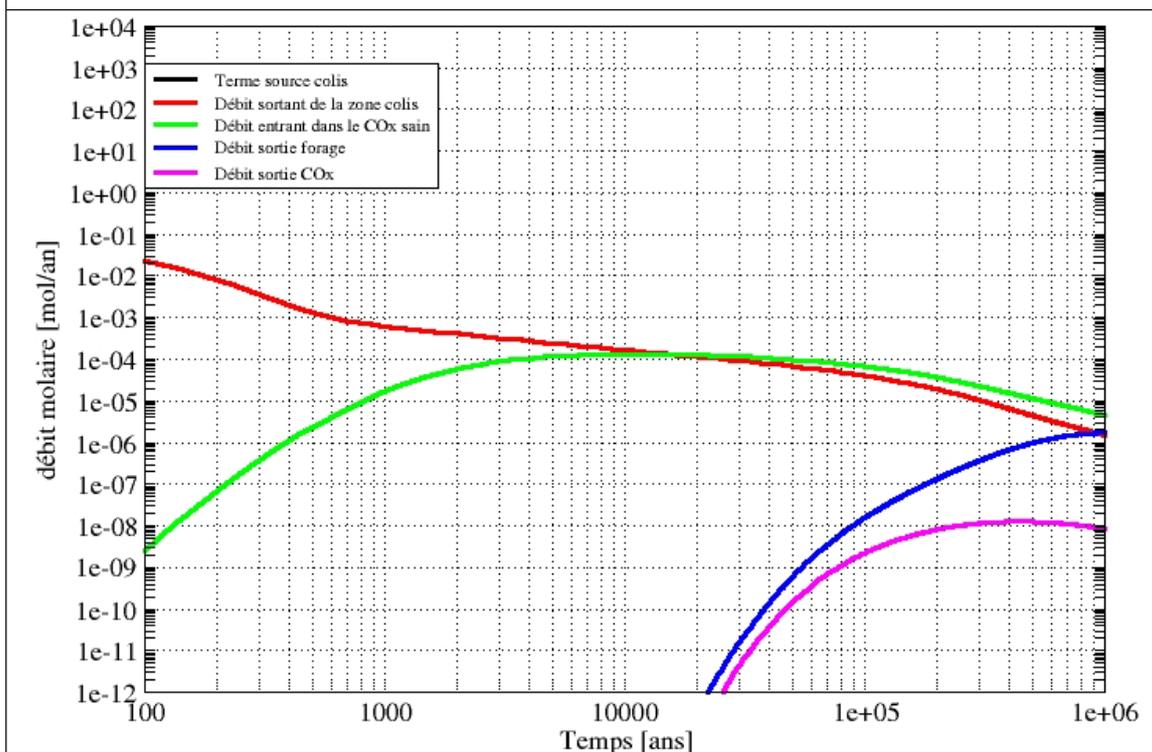


Figure 7.4-37 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d’hydrogène – ¹²⁹I [Calcul de sensibilité – forage dans une galerie de liaison]

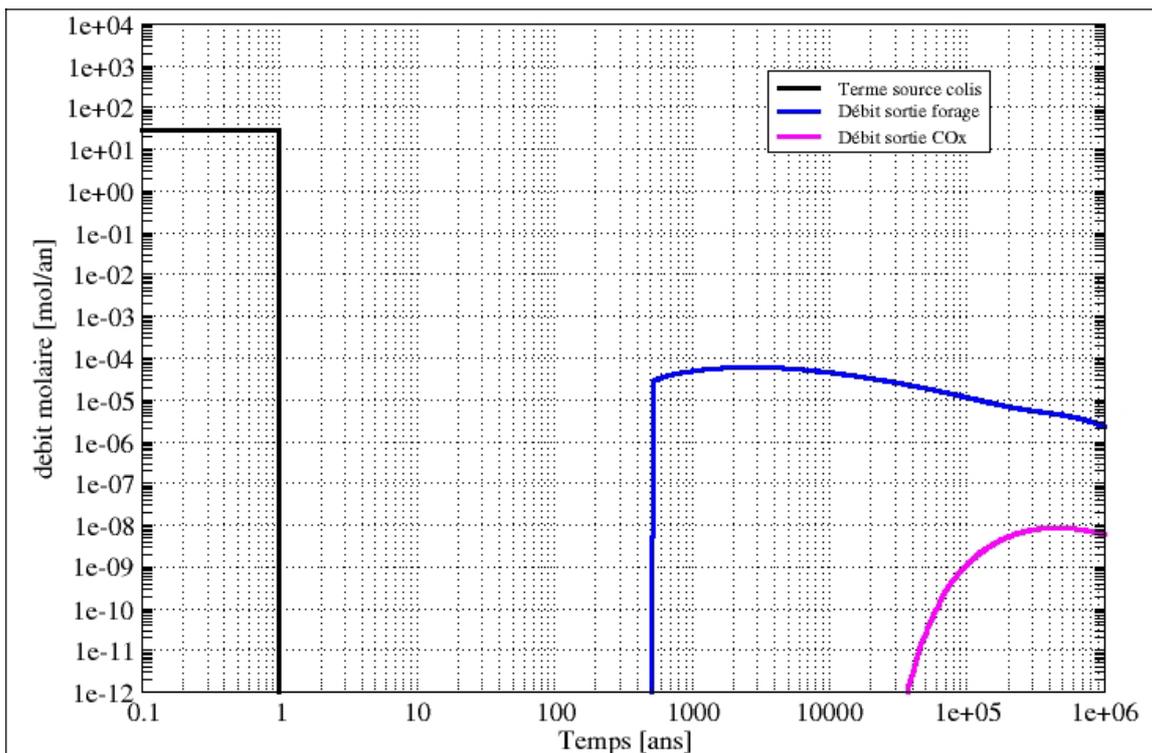


Figure 7.4-37 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ^{129}I [Calcul de référence – forage dans une alvéole de déchet B]

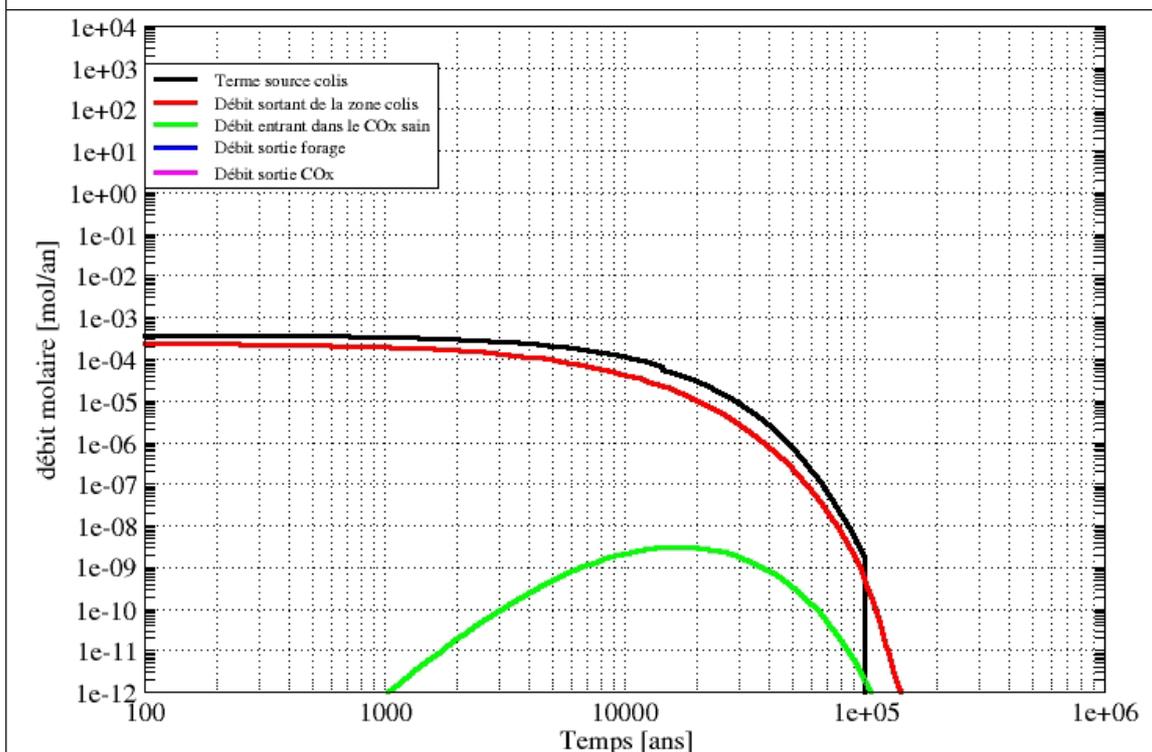


Figure 7.4-38 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ^{14}C [Calcul de sensibilité – forage dans une galerie de liaison]

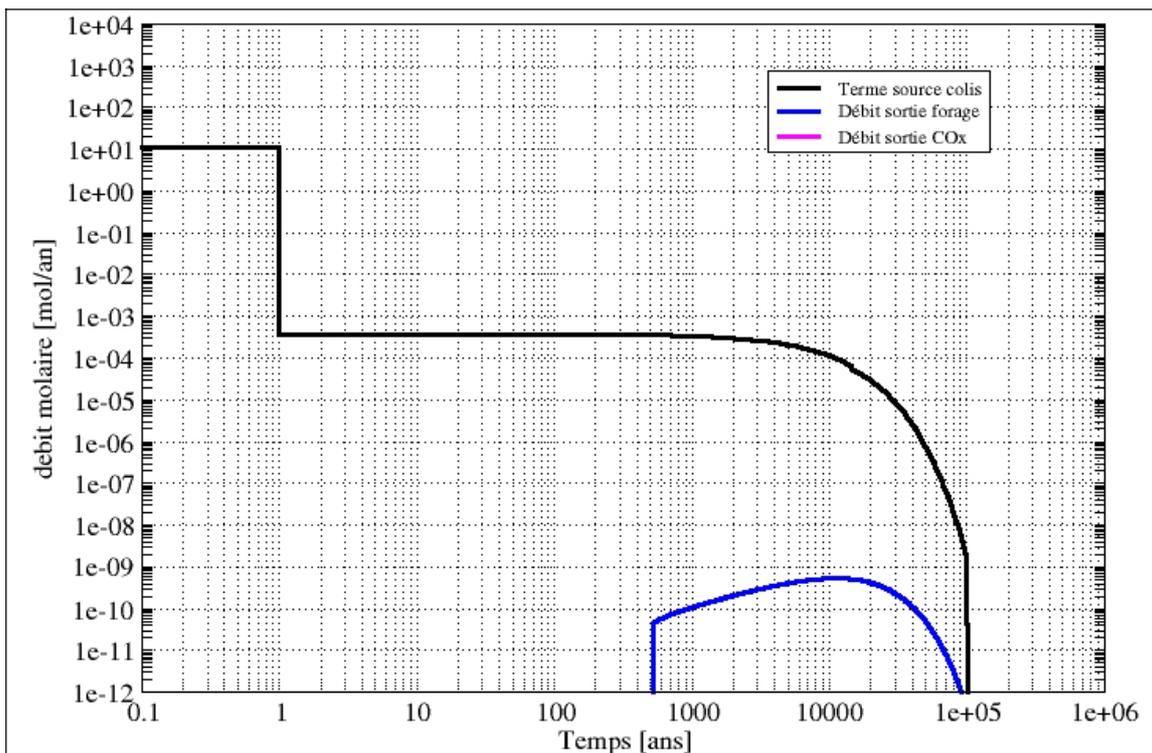


Figure 7.4-38 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d’hydrogène – ^{14}C [Calcul de référence – forage dans une alvéole de déchet B]

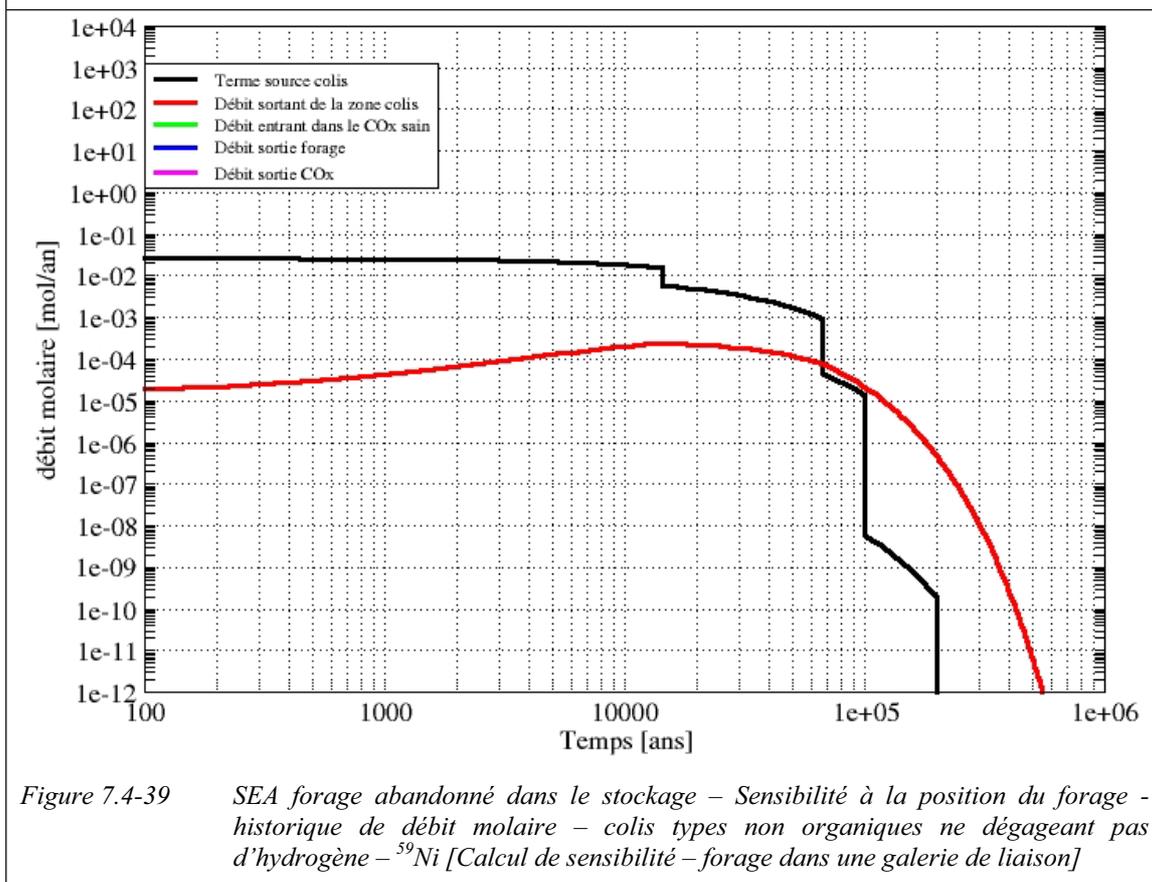


Figure 7.4-39 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage – historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d’hydrogène – ^{59}Ni [Calcul de sensibilité – forage dans une galerie de liaison]

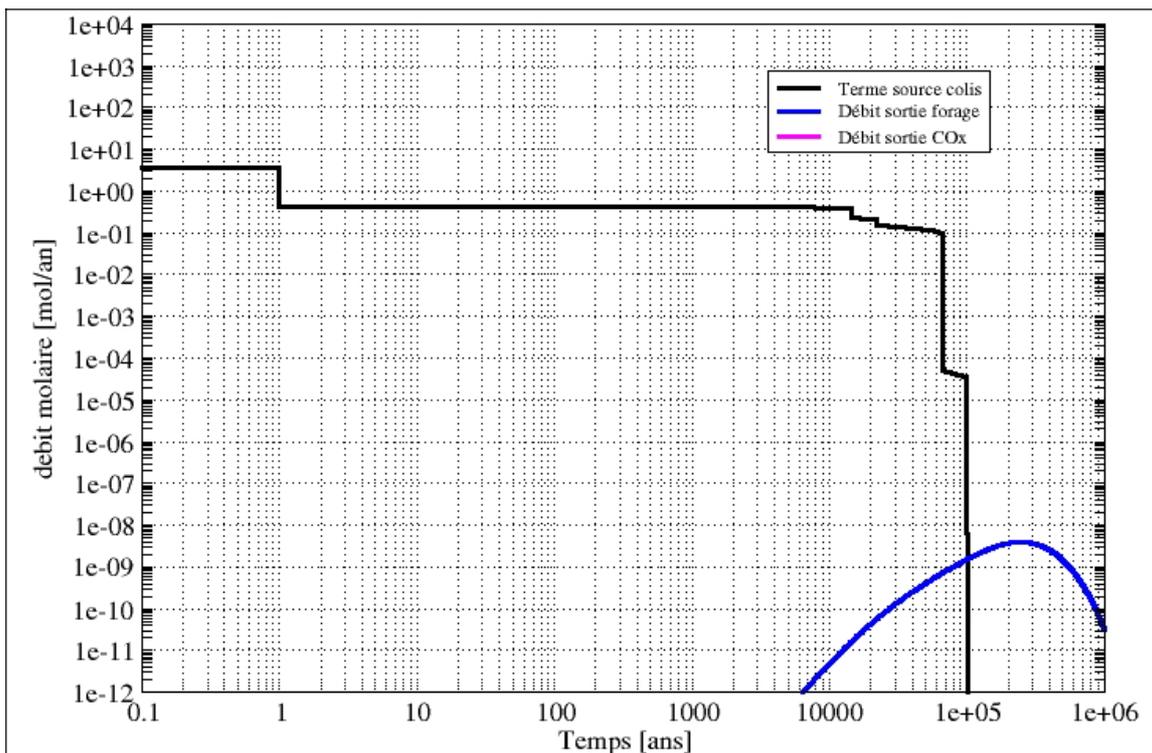


Figure 7.4-39 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage - historique de débit molaire – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène – ⁵⁹Ni [Calcul de référence – forage dans une alvéole de déchet B]

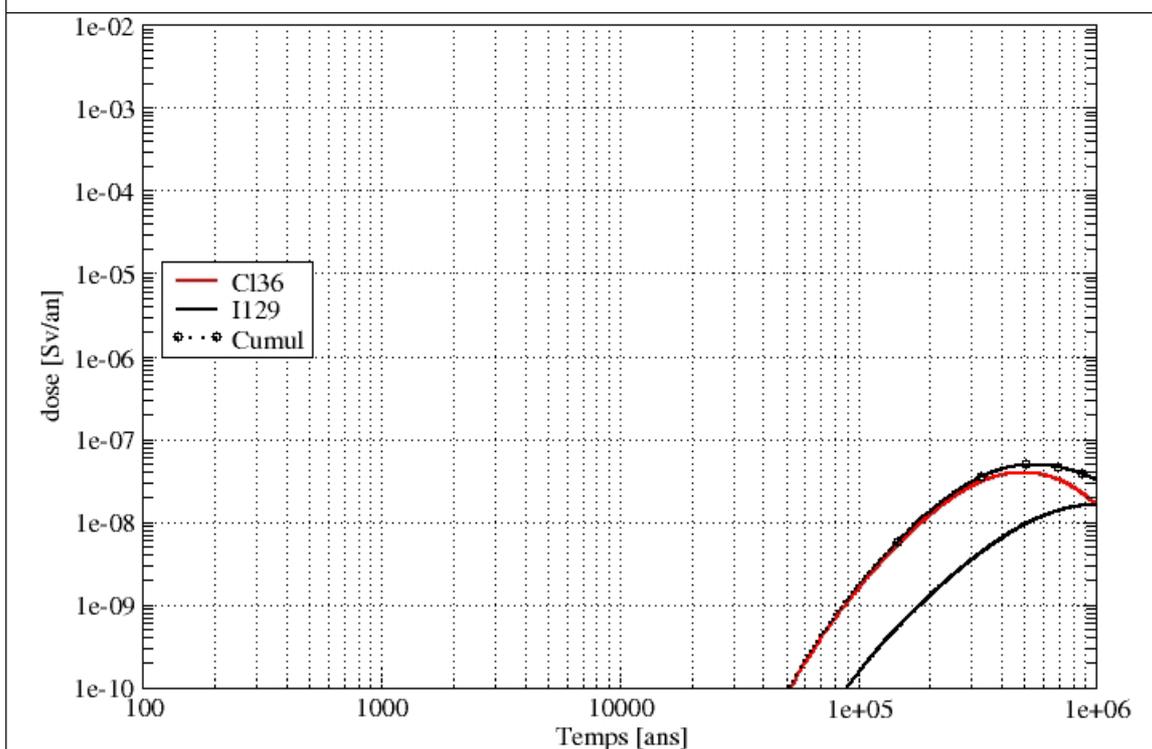


Figure 7.4-40 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à la position du forage (forage dans une galerie de liaison de déchet B) - historique de dose à l'exutoire pompage AEP – colis types non organiques ne dégageant pas d'hydrogène (B1x)

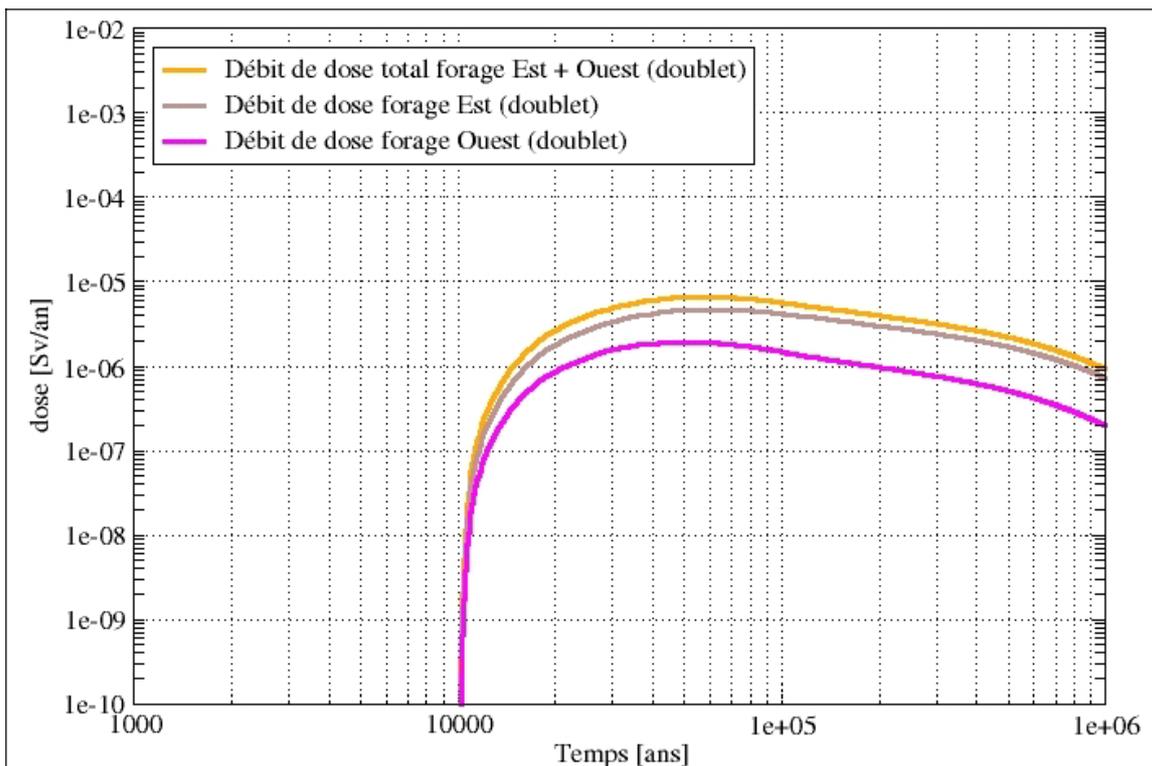


Figure 7.4-23 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité – doublet de forage aux extrémités d’une galerie (situation 1) – historique de dose – combustibles usés $CU1 - {}^{129}I$

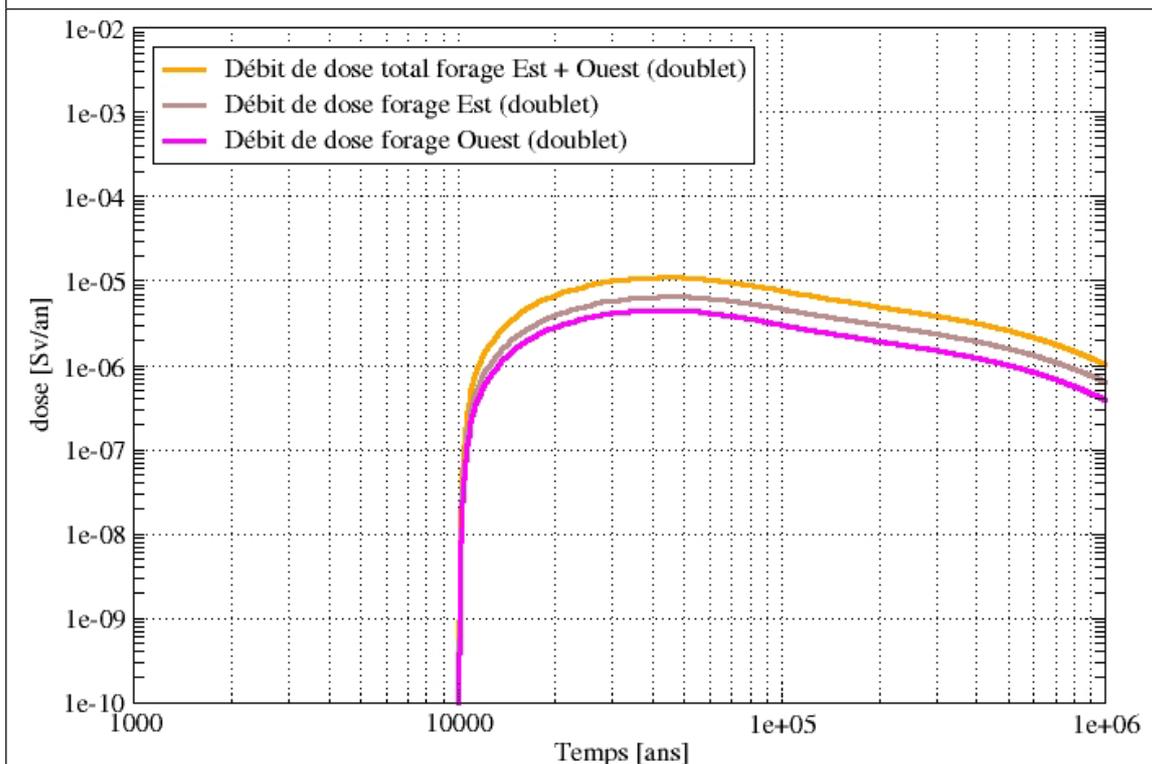


Figure 7.4-44 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité – doublet de forages aux milieux de deux demi-modules de stockage (situation 2) – historique de dose – combustibles usés $CU1 - {}^{129}I$

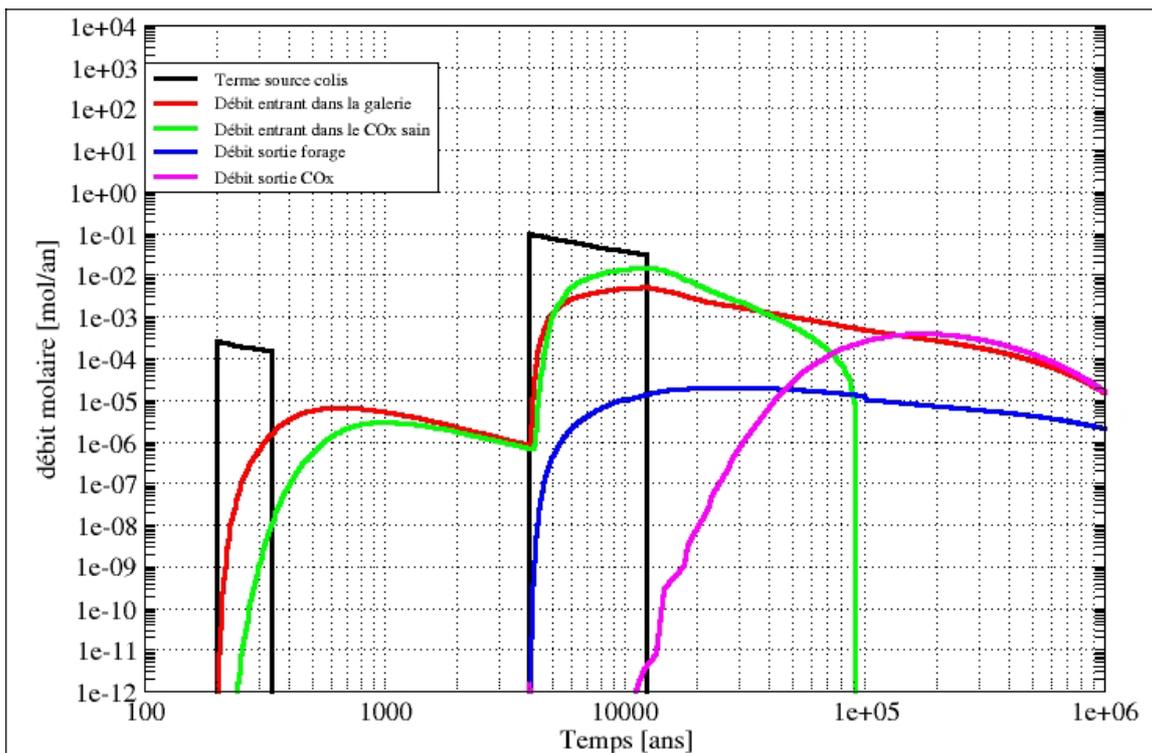


Figure 7.4-45 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) – historique de débit molaire – colis type de C2 - ^{129}I [Calcul de sensibilité : Tunnel court avec barrière ouvragée]

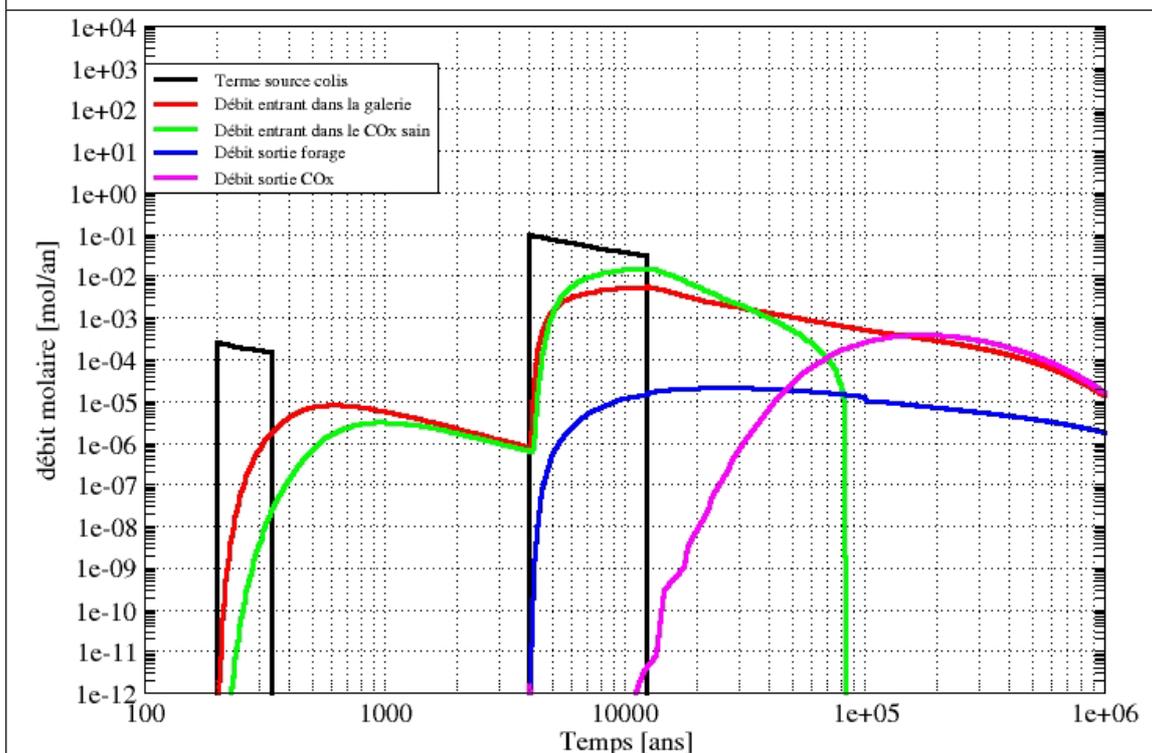


Figure 7.4-45 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) – historique de débit molaire – colis type de C2 - ^{129}I [Calcul de référence : Tunnel court sans barrière ouvragée]

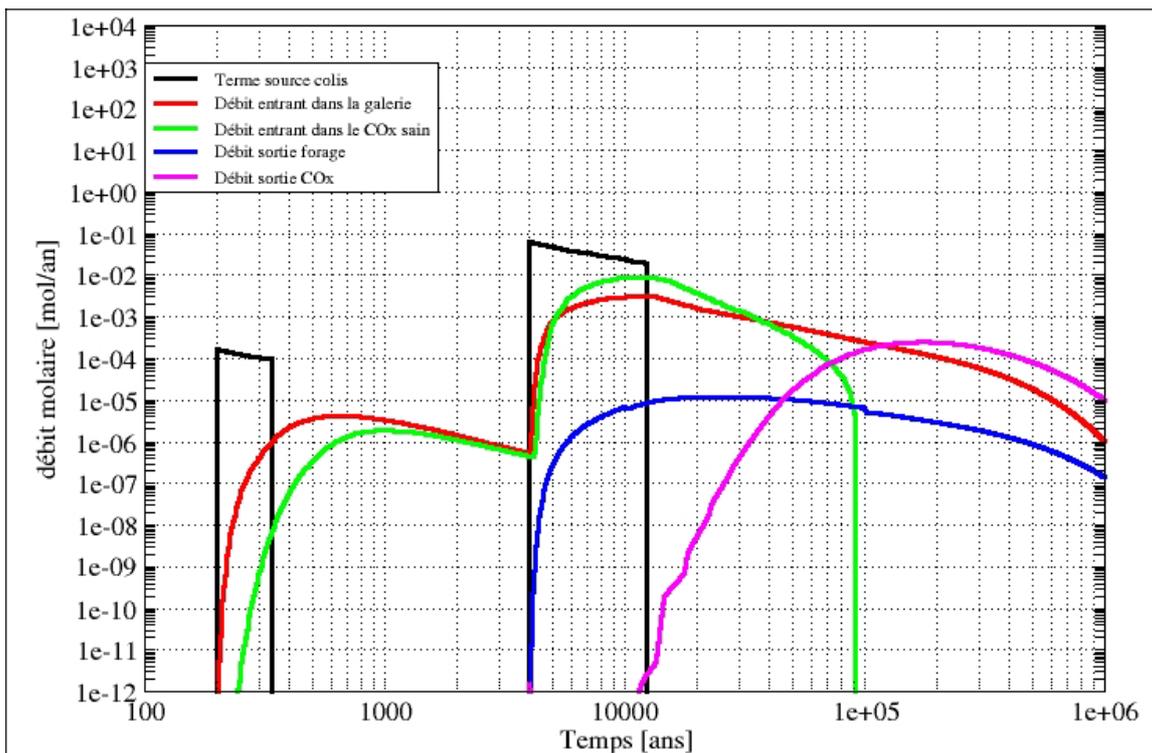


Figure 7.4-46 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) – historique de débit molaire – colis type de C2 - ^{36}Cl [Calcul de sensibilité : Tunnel court avec barrière ouvragée]

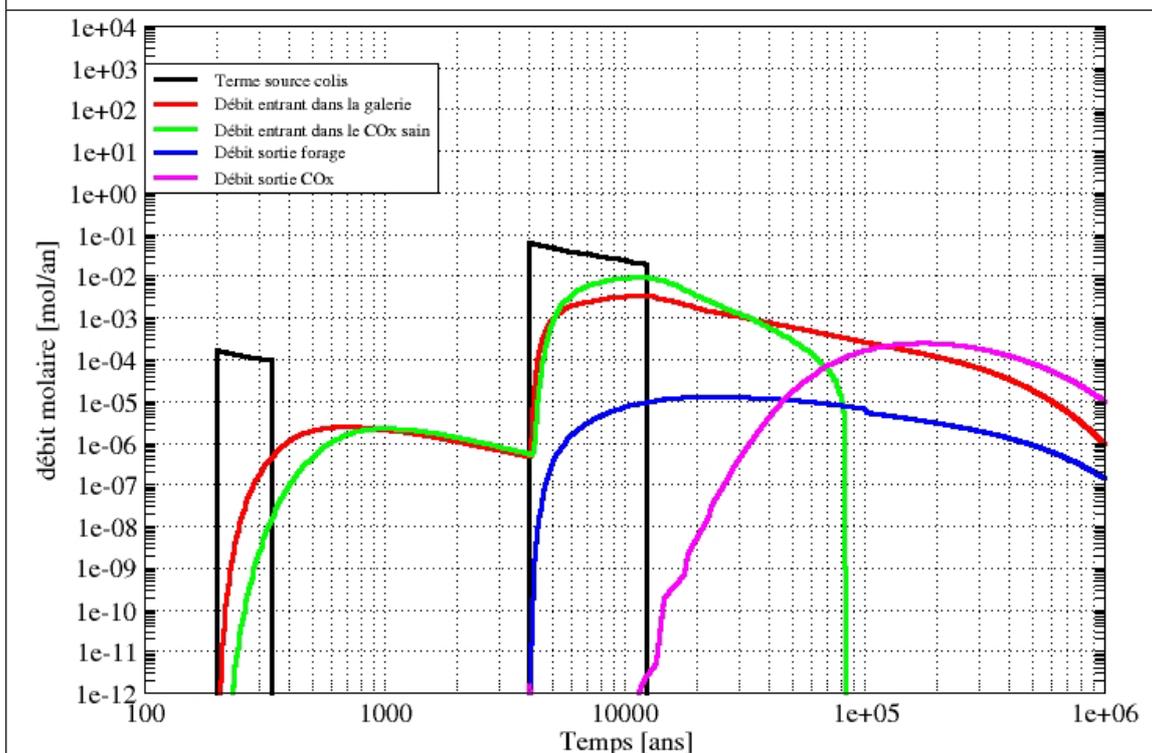


Figure 7.4-46 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) – historique de débit molaire – colis type de C2 - ^{36}Cl [Calcul de référence : Tunnel court sans barrière ouvragée]

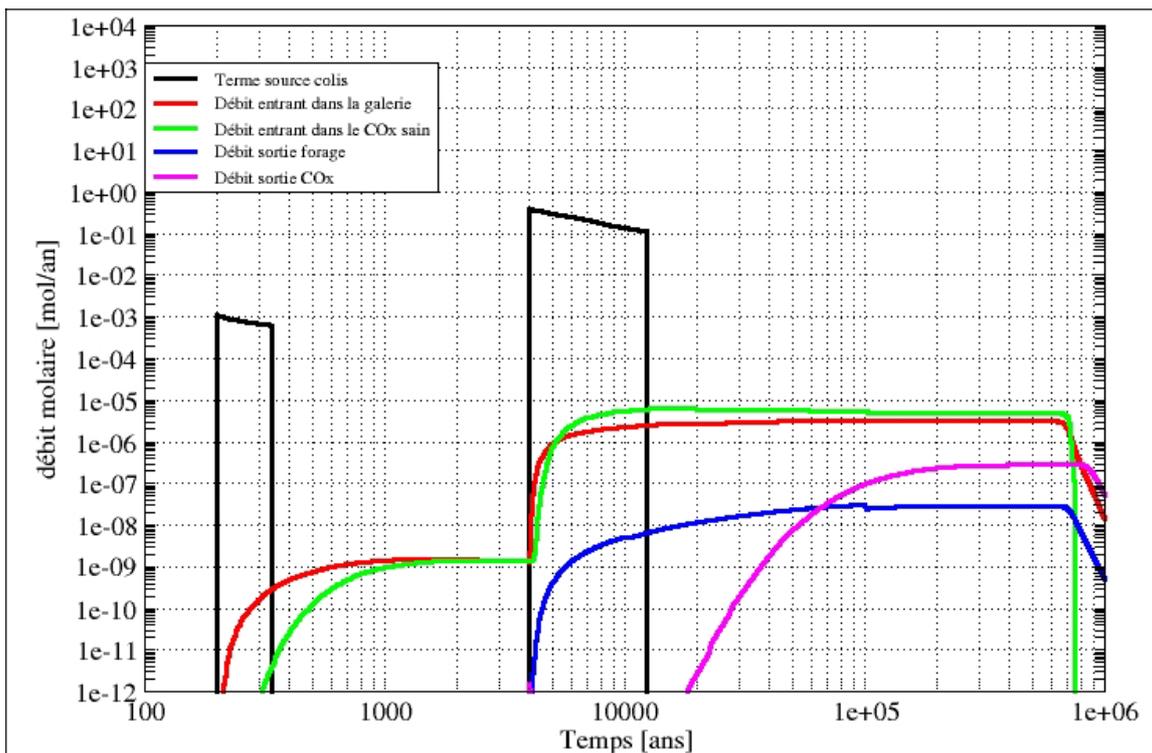


Figure 7.4-47 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) - historique de débit molaire – colis type de C2 - ^{129}I [Calcul de sensibilité : Tunnel court avec barrière ouvragée]

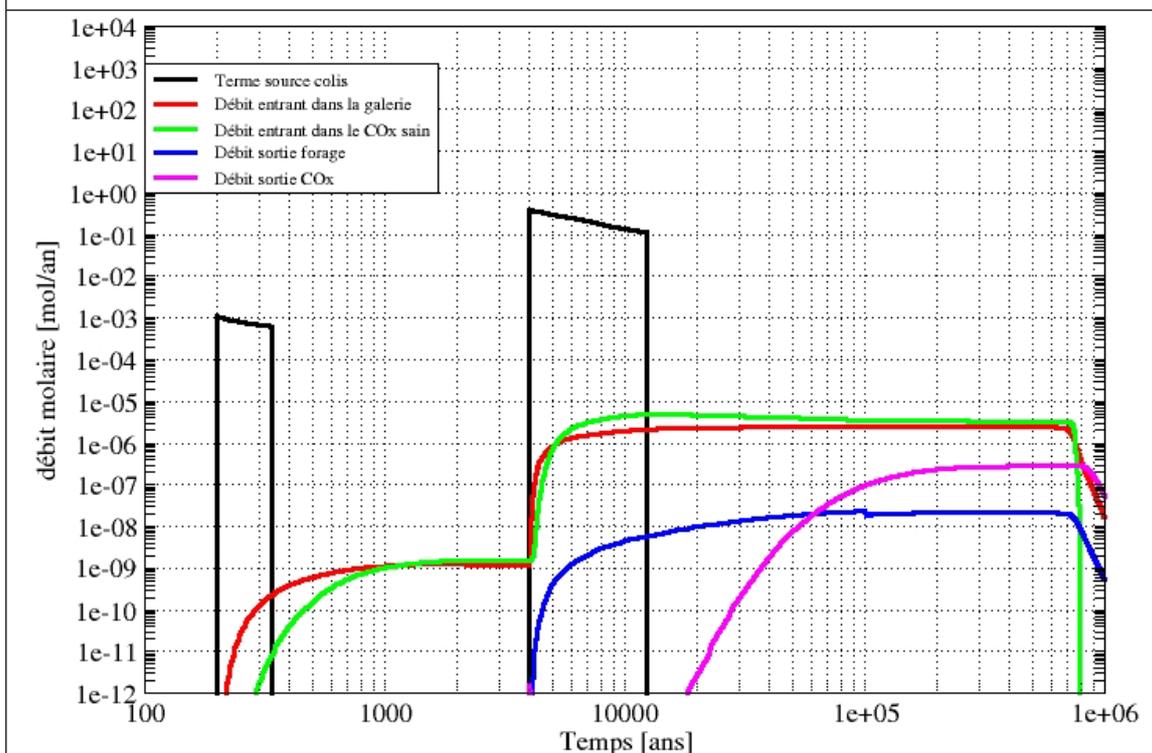


Figure 7.4-47 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au concept de déchet C (concept alternatif avec barrière ouvragée) - historique de débit molaire – colis type de C2 - ^{129}I [Calcul de référence : Tunnel court sans barrière ouvragée]

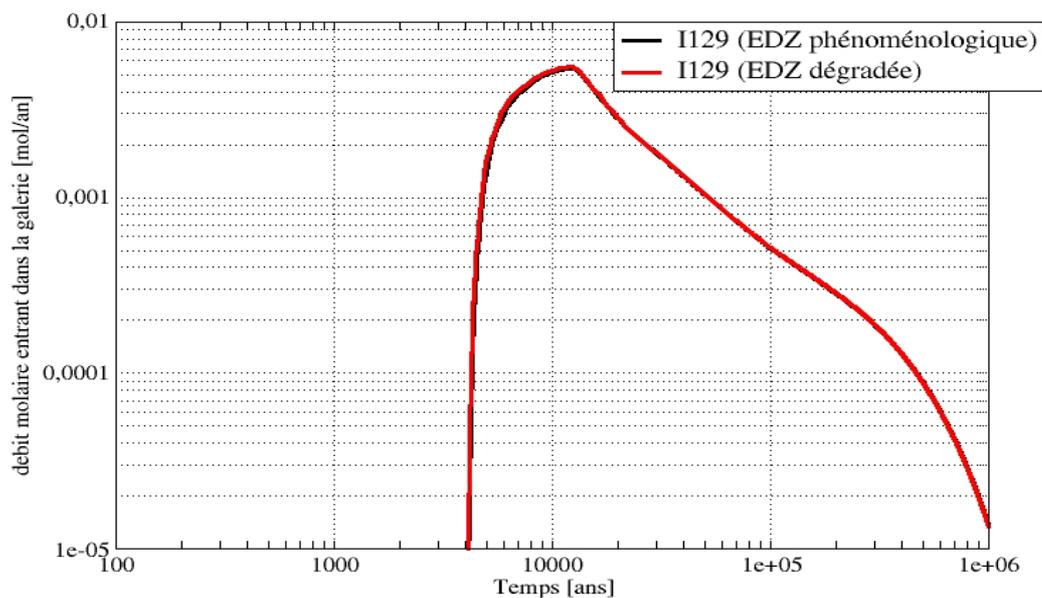


Figure 7.4-48 SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Comparaison entre le modèle EDZ (best-estimate) et EDZ (dégradée)

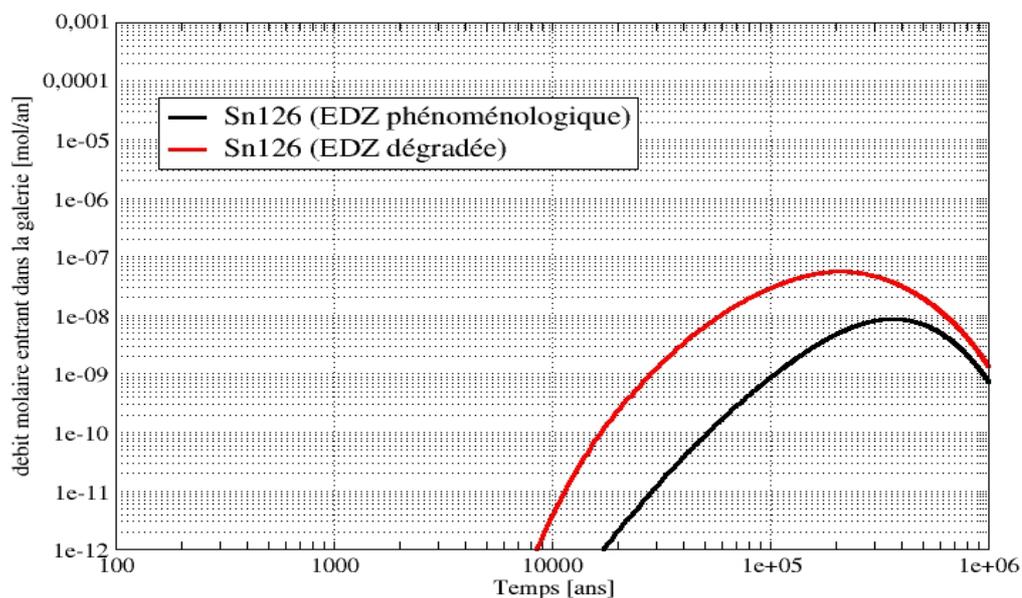


Figure 7.4-49 SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – Sn126 – C2 – Comparaison entre le modèle EDZ (best-estimate) et EDZ (dégradée)

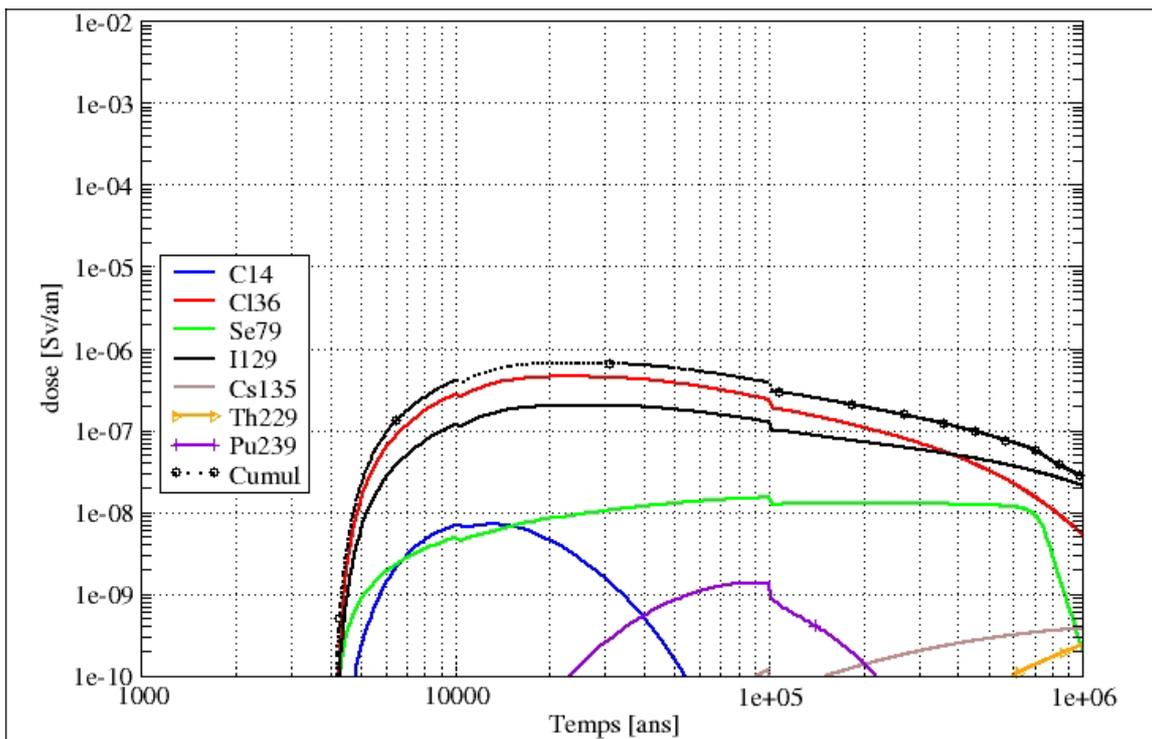


Figure 7.4-50 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité à l’EDZ « dégradée » - dose due au forage à l’exutoire pompage AEP – colis type C2

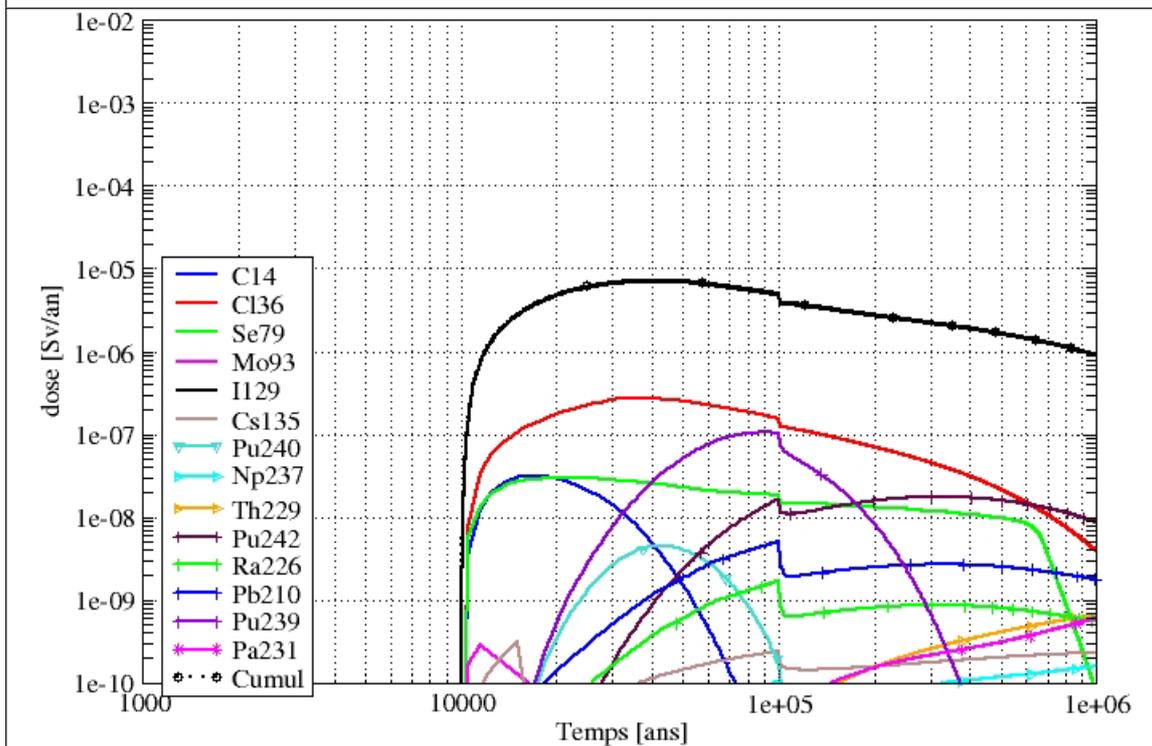


Figure 7.4-51 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres géochimiques conservatifs de la bentonite – dose due au forage à l’exutoire pompage AEP – colis type CU1

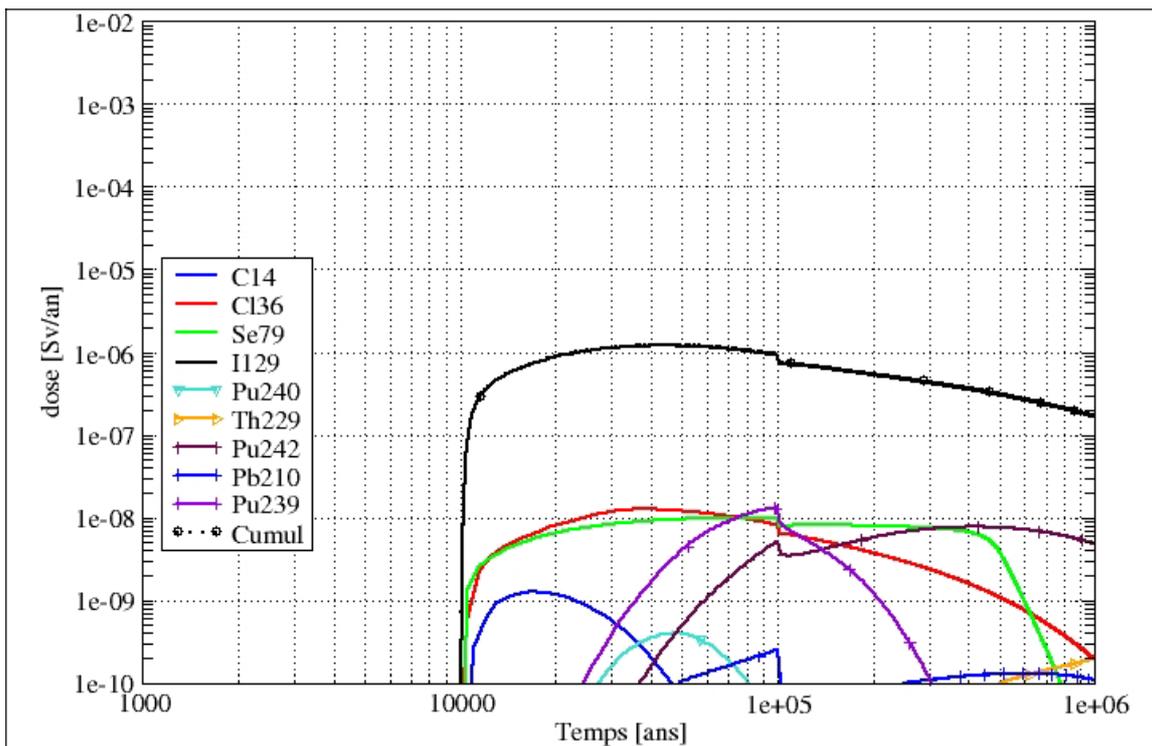


Figure 7.4-52 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres géochimiques conservatifs de la bentonite – dose due à l'exutoire pompage AEP au forage – colis type CU2

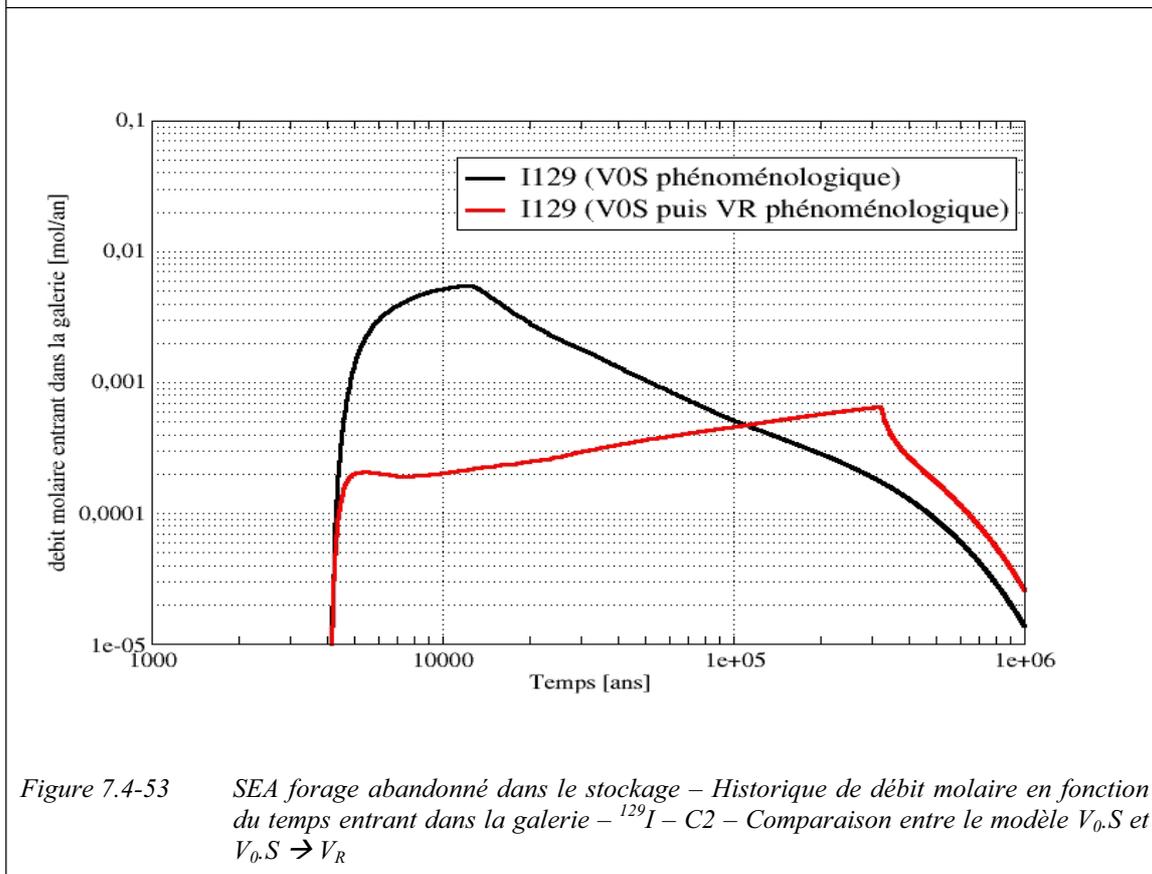


Figure 7.4-53 SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Comparaison entre le modèle $V_0.S$ et $V_0.S \rightarrow V_R$

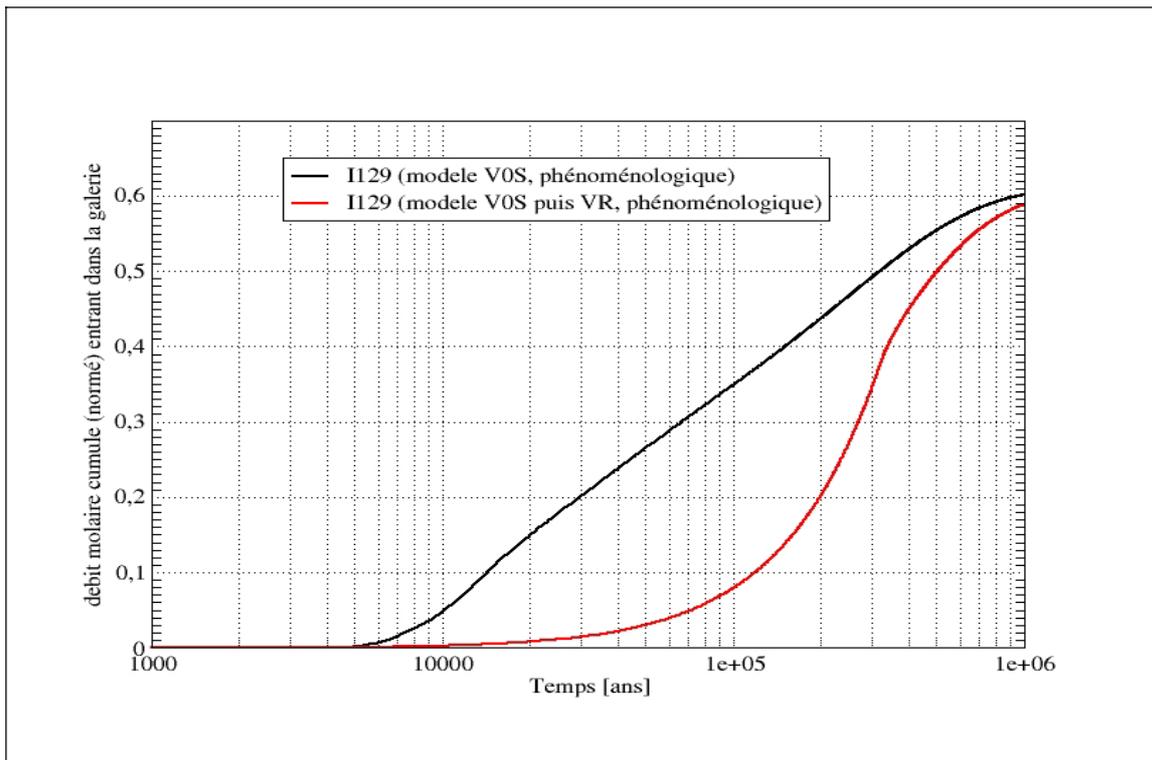


Figure 7.4-54 SEA forage abandonné dans le stockage – débit molaire cumulé et normé en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Comparaison entre le modèle $V_0.S$ et $V_0.S \rightarrow V_r$

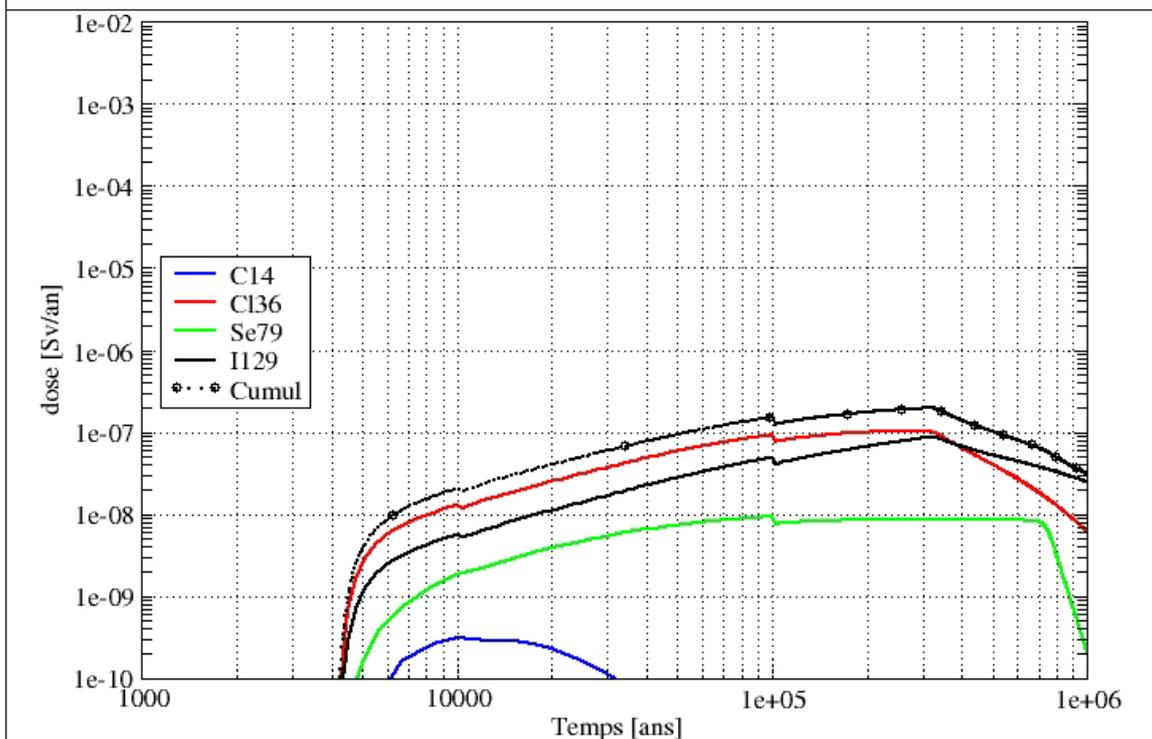


Figure 7.4-55 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité au modèle de relâchement des verres » - dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type C2

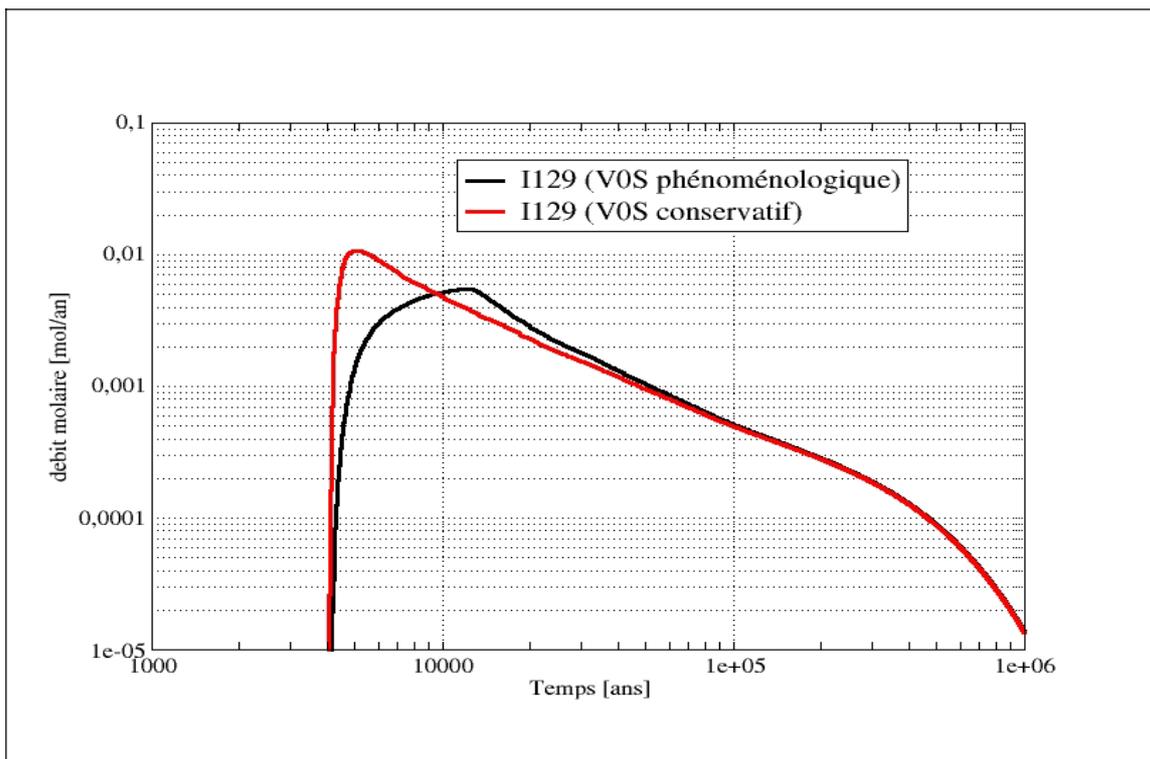


Figure 7.4-56 SEA forage abandonné dans le stockage – Historique de débit molaire en fonction du temps entrant dans la galerie – ^{129}I – C2 – Sensibilité aux paramètres conservatifs du modèle de relâchement V_0S des verres

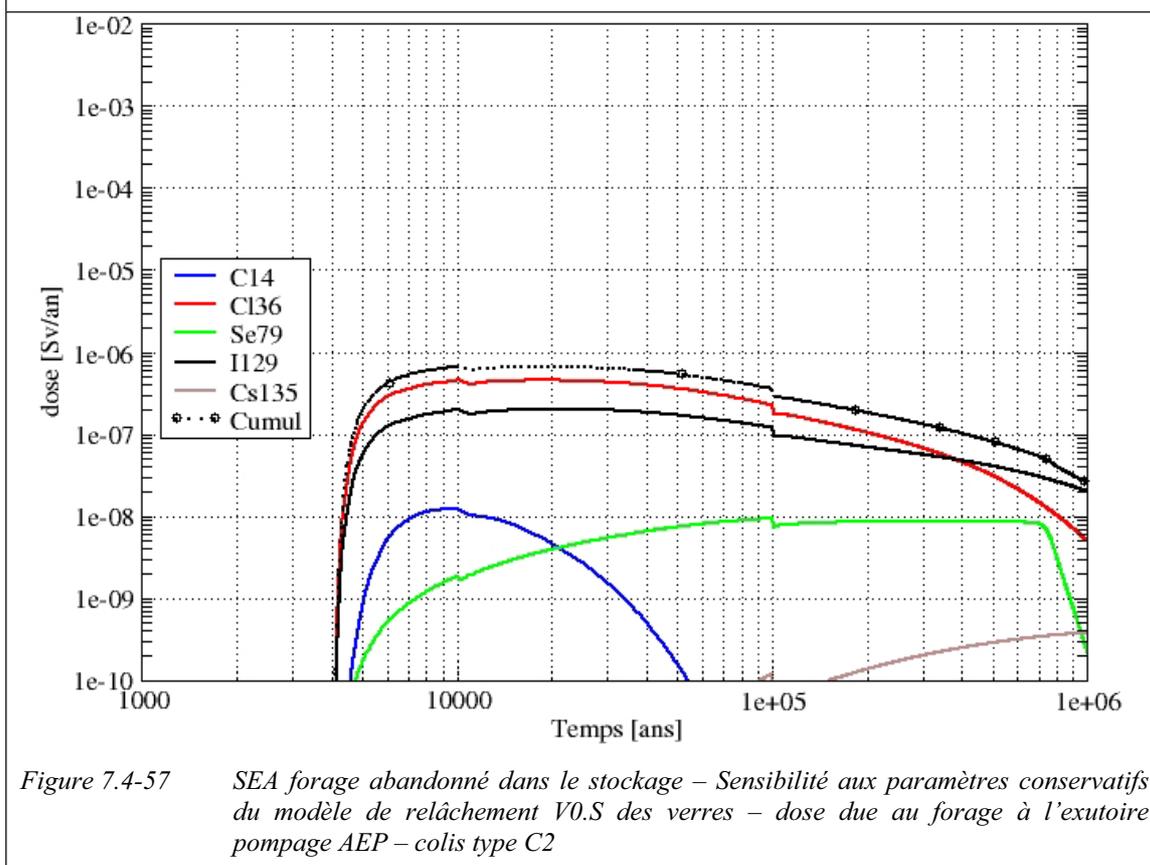


Figure 7.4-57 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres conservatifs du modèle de relâchement V_0S des verres – dose due au forage à l'exutoire pompe AEP – colis type C2

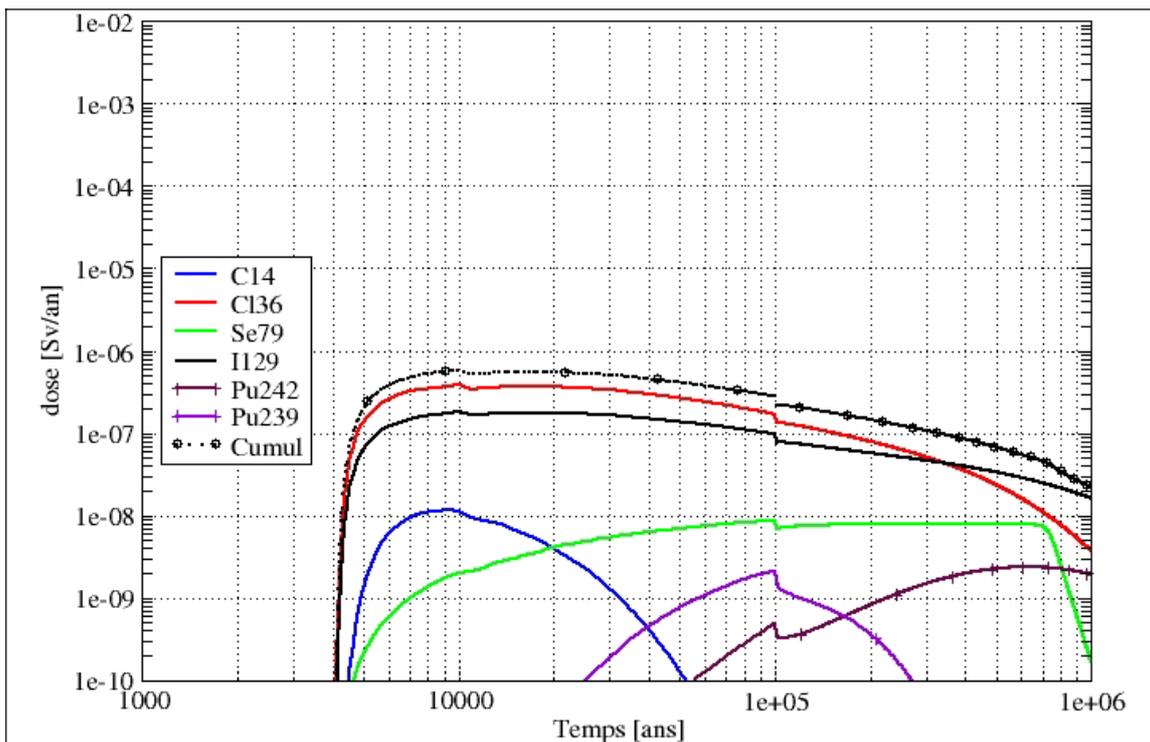


Figure 7.4-58 SEA forage abandonné dans le stockage – Sensibilité aux paramètres conservatifs du modèle de relâchement V0.S des verres - dose due au forage à l'exutoire pompage AEP – colis type C4

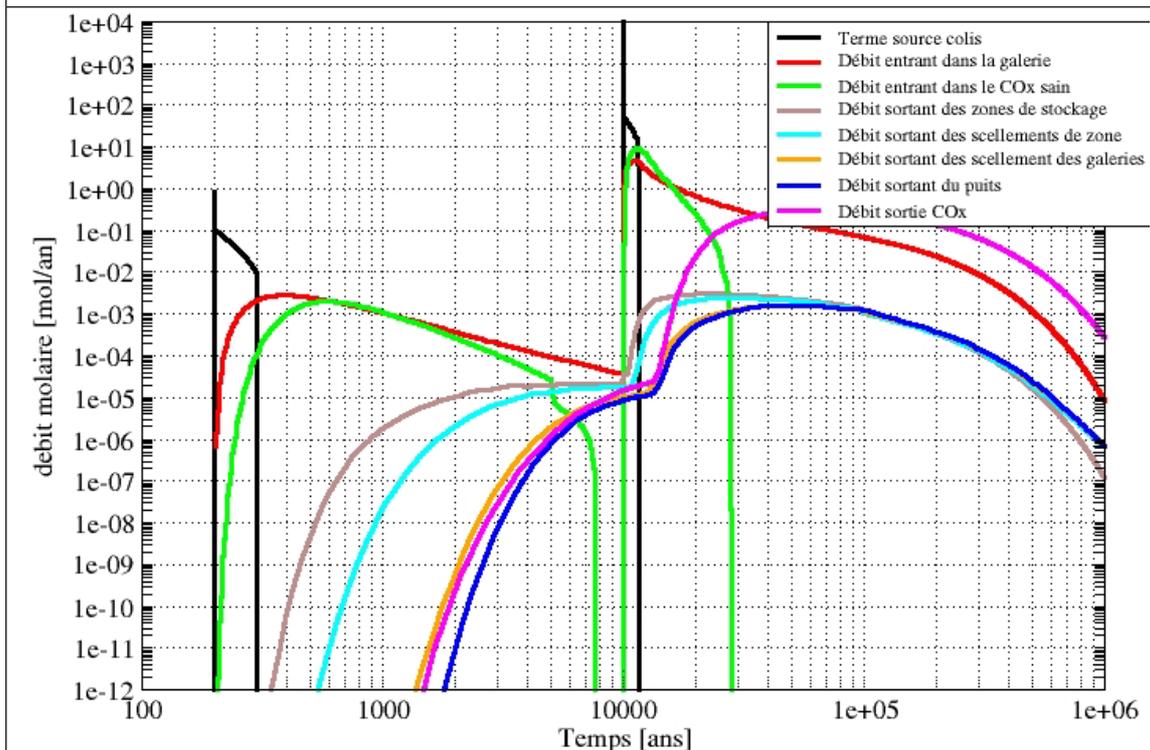


Figure 7.5-4 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CU1 – ^{129}I – Historique de débits molaire [SEA « fonctionnement très dégradé »]

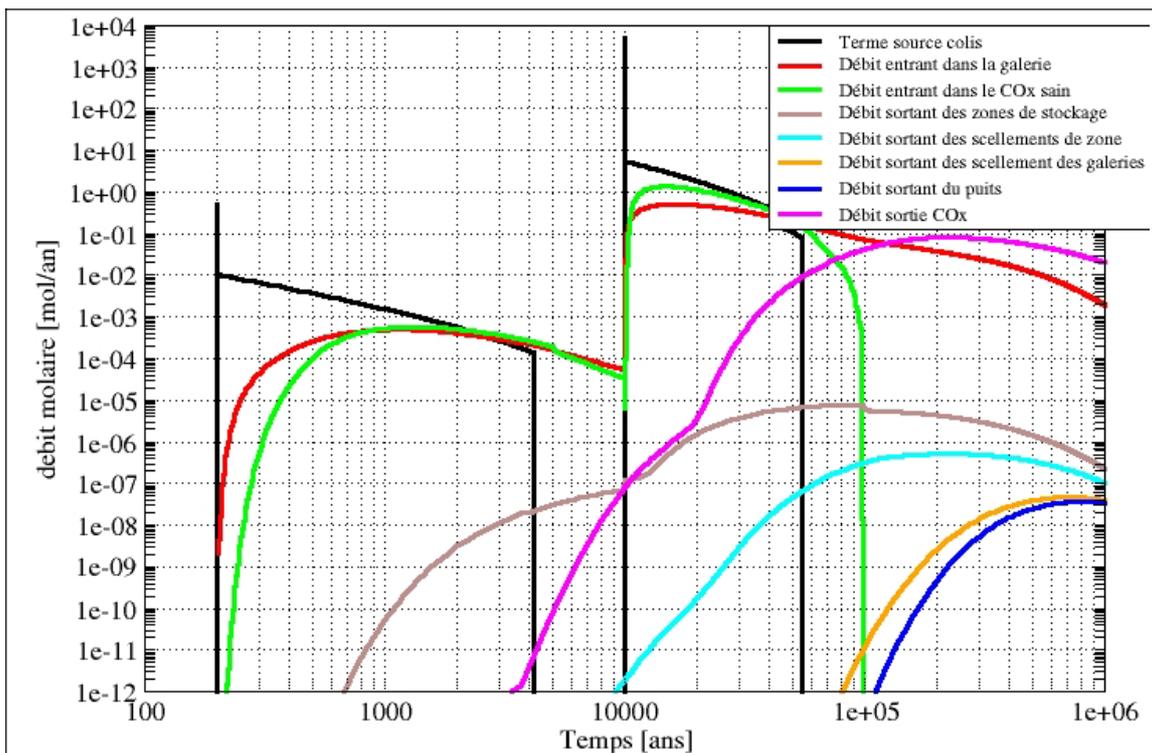


Figure 7.5-4 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CU1 - ^{129}I - Historique de débits molaire [SEN]

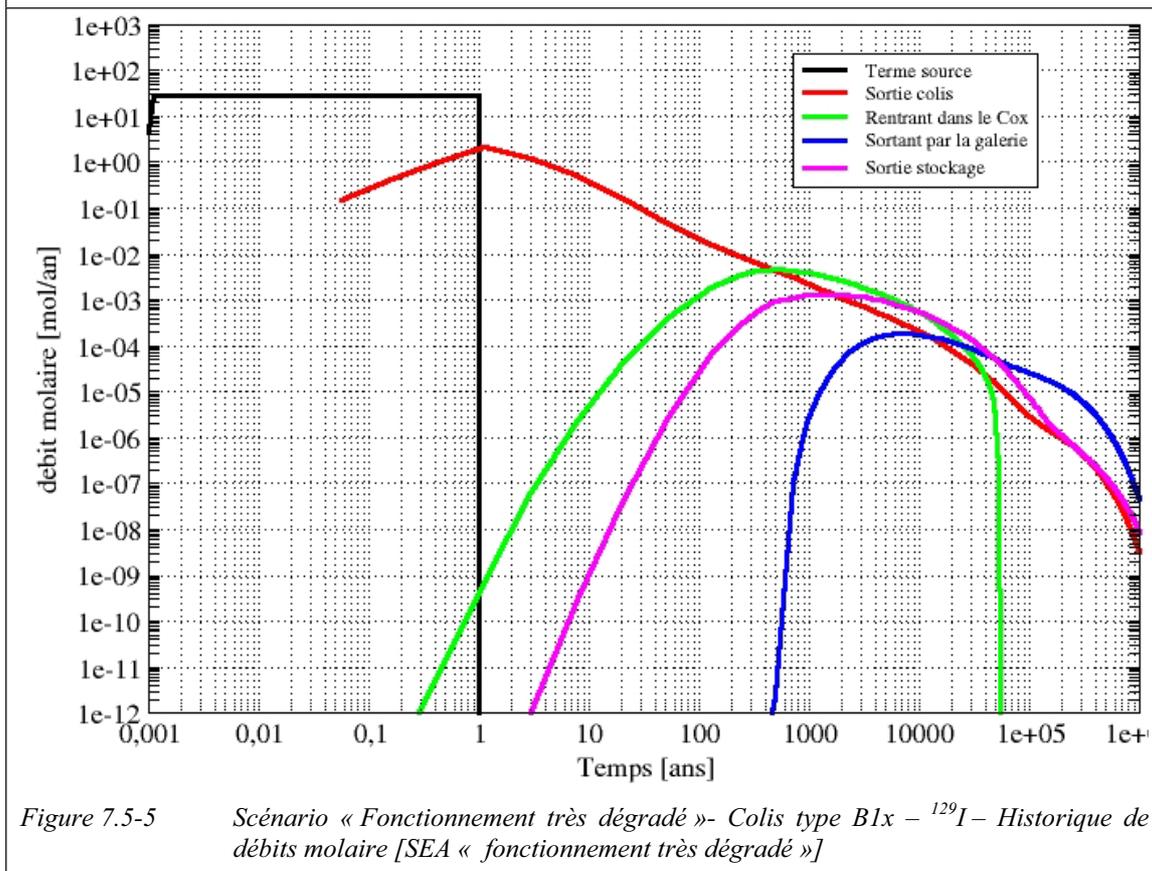


Figure 7.5-5 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type B1x - ^{129}I - Historique de débits molaire [SEA « fonctionnement très dégradé »]

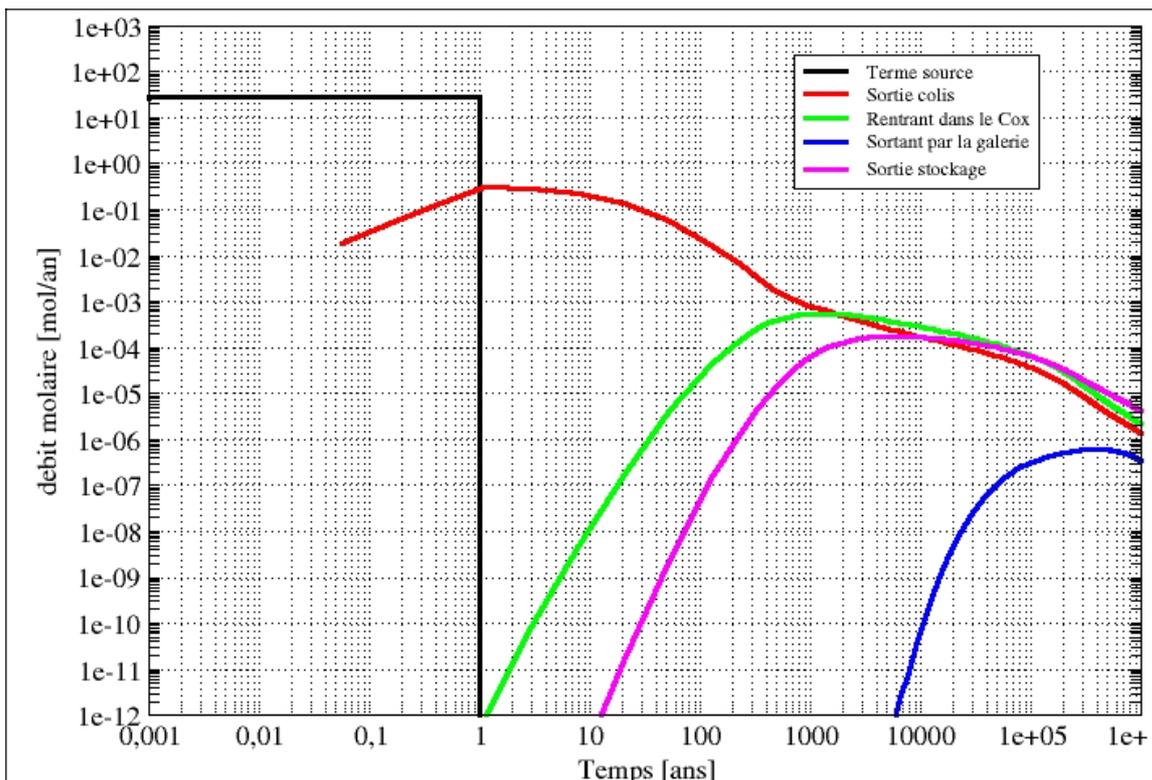


Figure 7.5-5 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type B1x – ¹²⁹I – Historique de débits molaire [SEN]

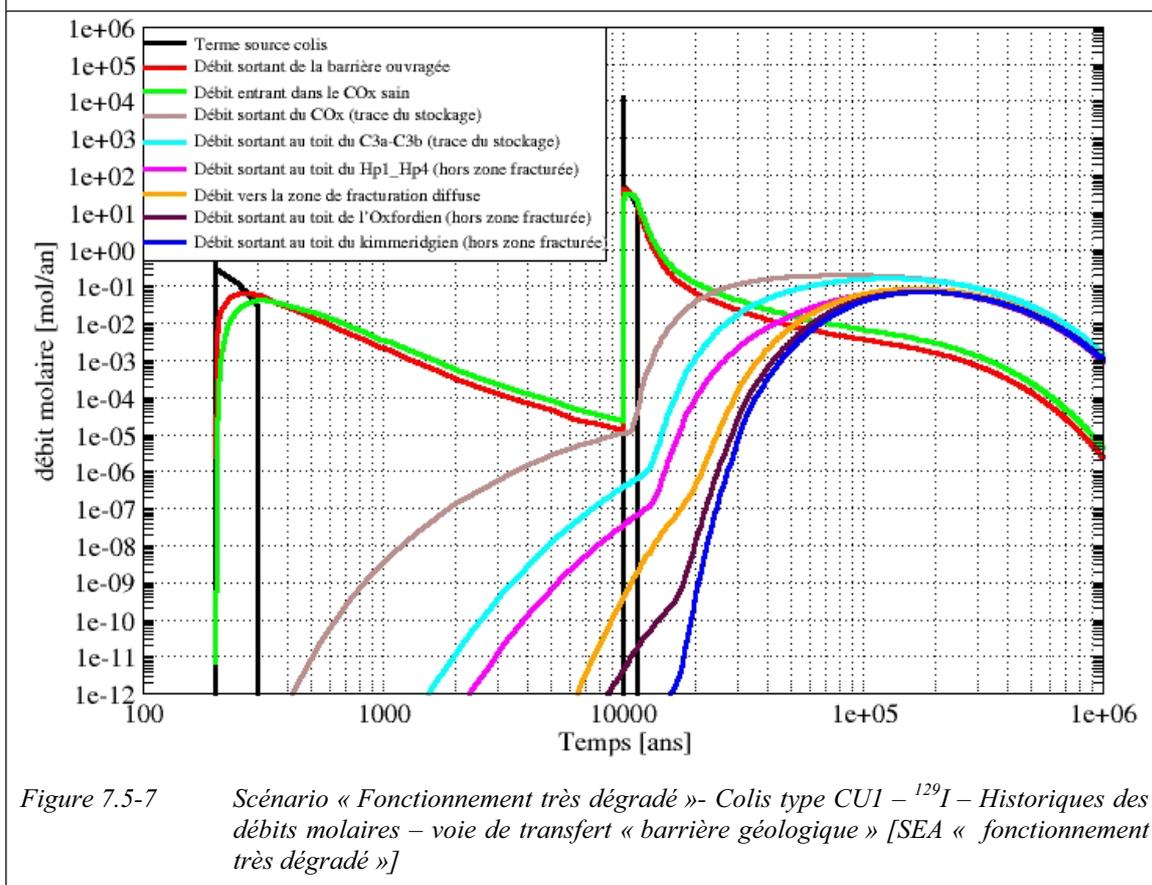


Figure 7.5-7 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CUI – ¹²⁹I – Historiques des débits molaire – voie de transfert « barrière géologique » [SEA « fonctionnement très dégradé »]

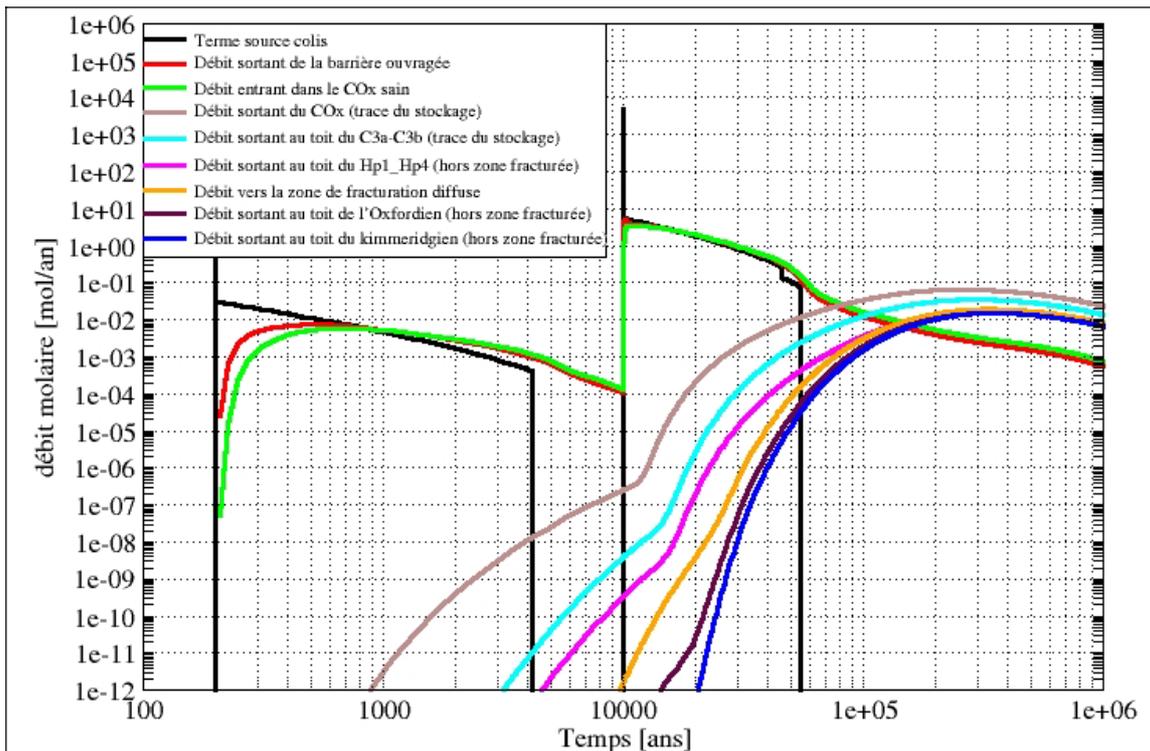


Figure 7.5-7 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CU1 - ^{129}I - Historiques des débits molaires - voie de transfert « barrière géologique » [SEN]

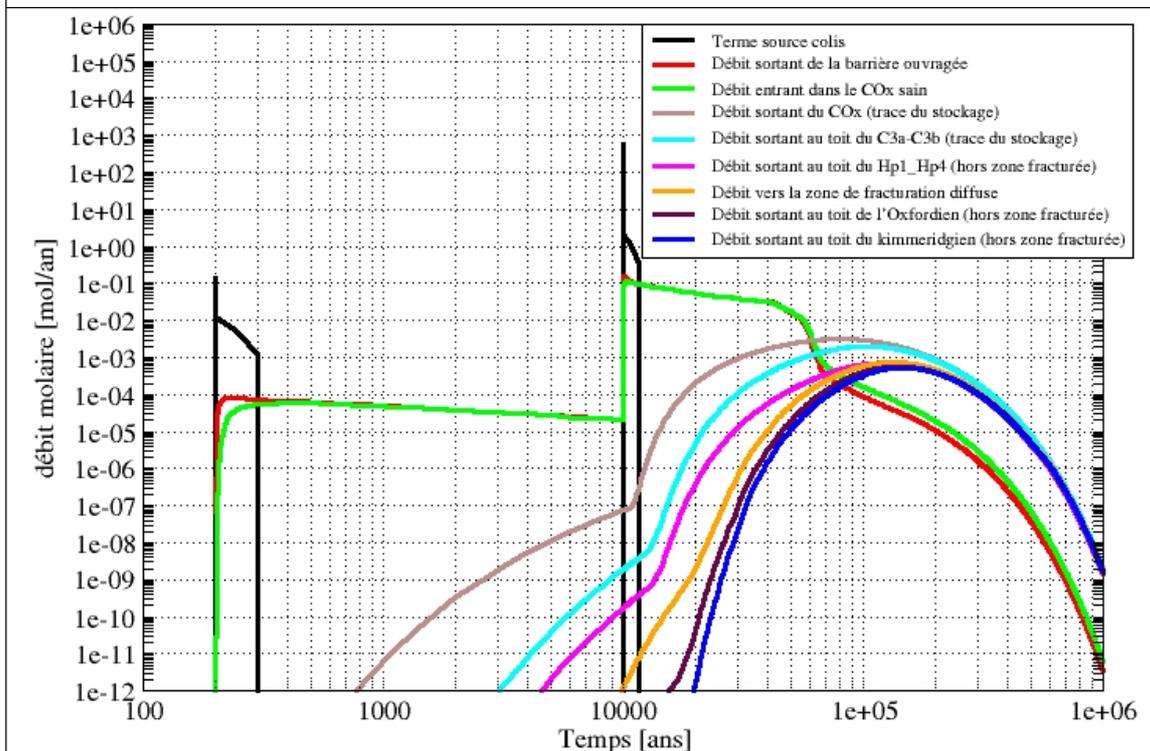


Figure 7.5-8 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CU1 - ^{79}Se - Historiques des débits molaires - voie de transfert « barrière géologique » [SEA « fonctionnement très dégradé »]

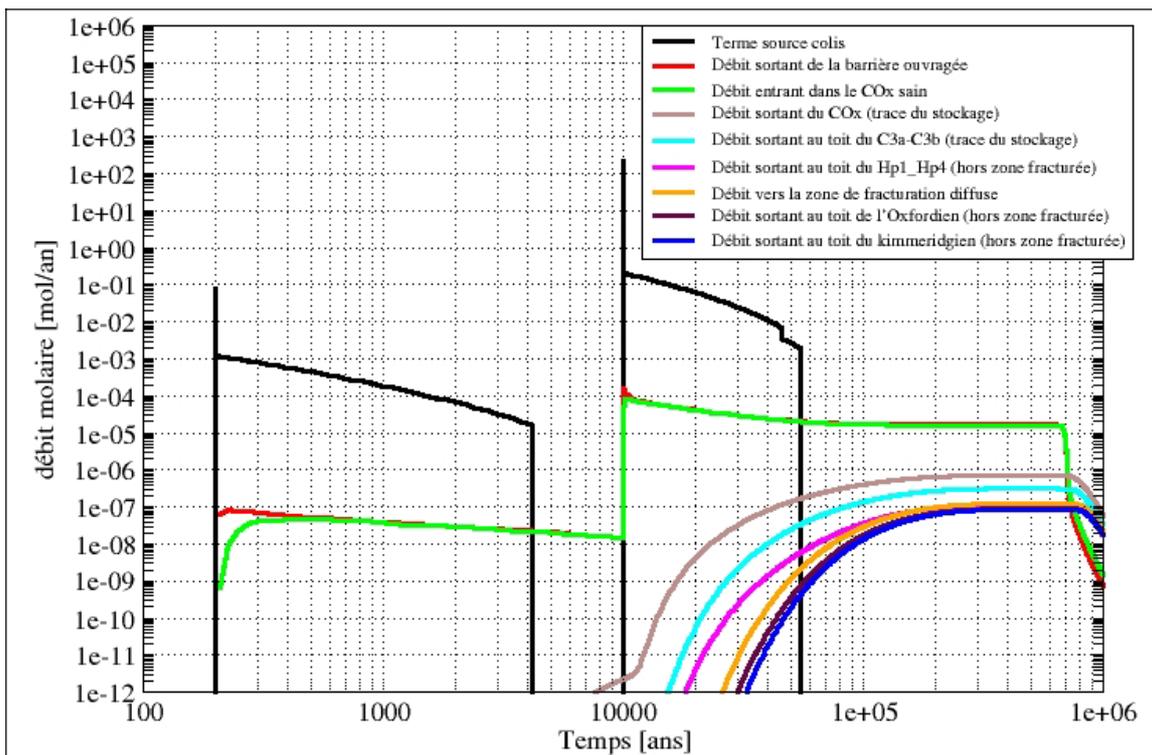


Figure 7.5-8 Scénario « Fonctionnement très dégradé »- Colis type CU1 – ⁷⁹Se – Historiques des débits molaires – voie de transfert « barrière géologique » [SEN]

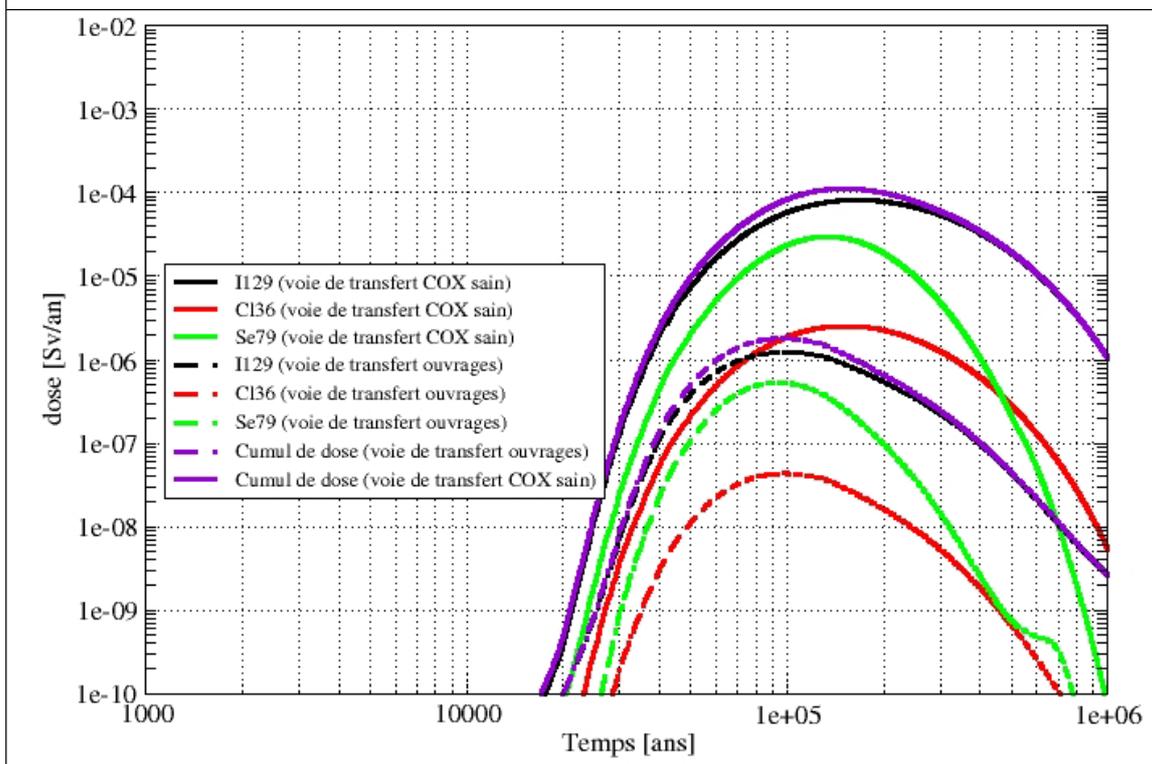


Figure 7.5-9 SEA fonctionnement très dégradé – Comparaison des doses à l'exutoire de référence Saulx du colis type CU1 pour les voies de transfert ouvrages (modèle à l'actuel) et barrière géologique saine (modèle à 1 million d'années)

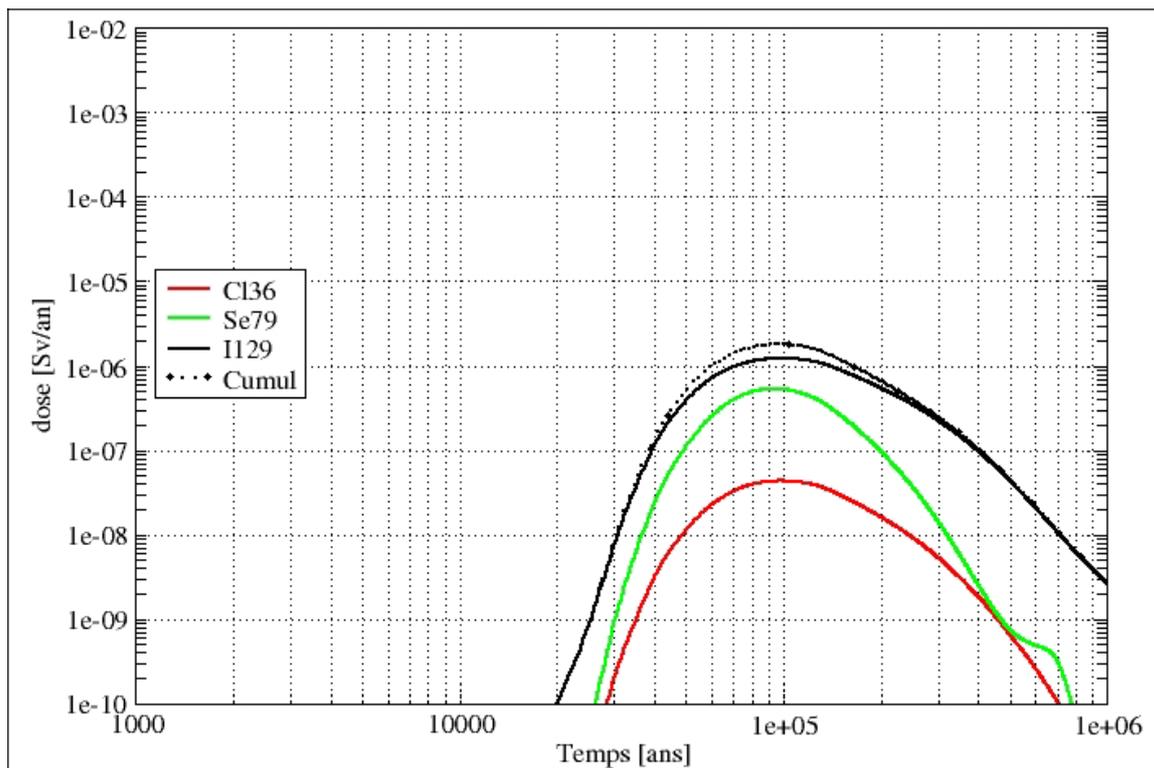


Figure 7.5-10 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types de combustibles usés CUI [Voie de transfert par les ouvrages]

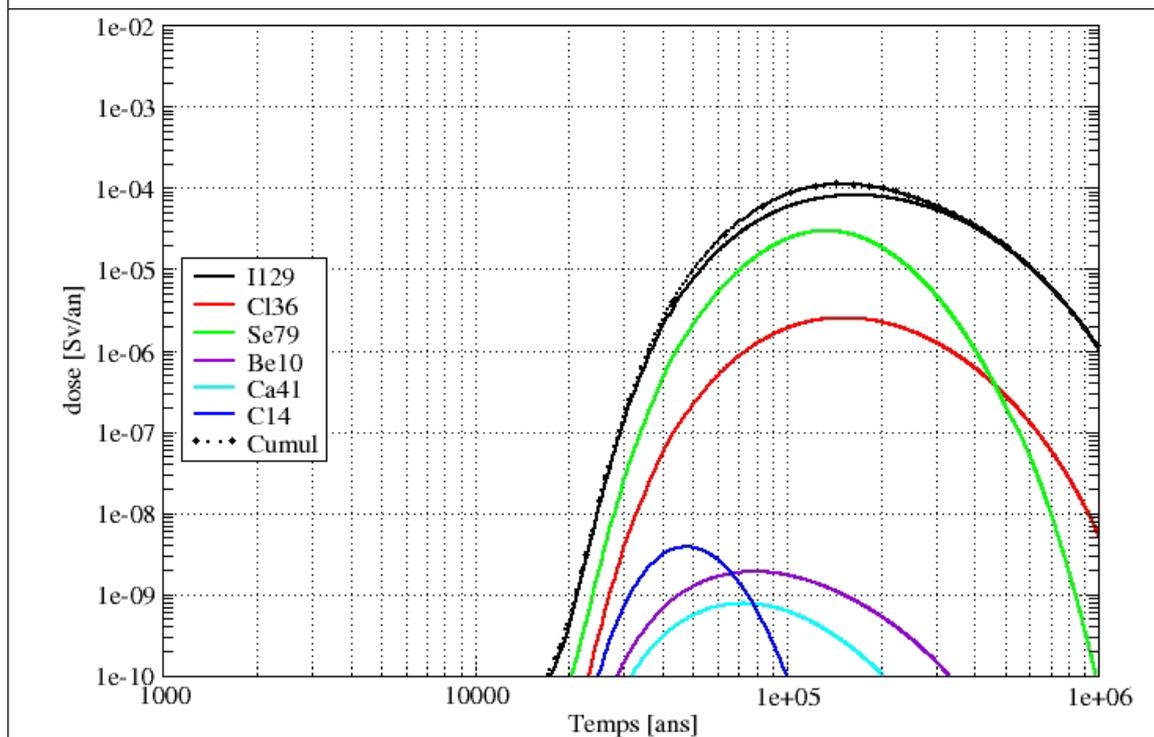


Figure 7.5-10 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types de combustibles usés CUI [Voie de transfert par la formation hôte]

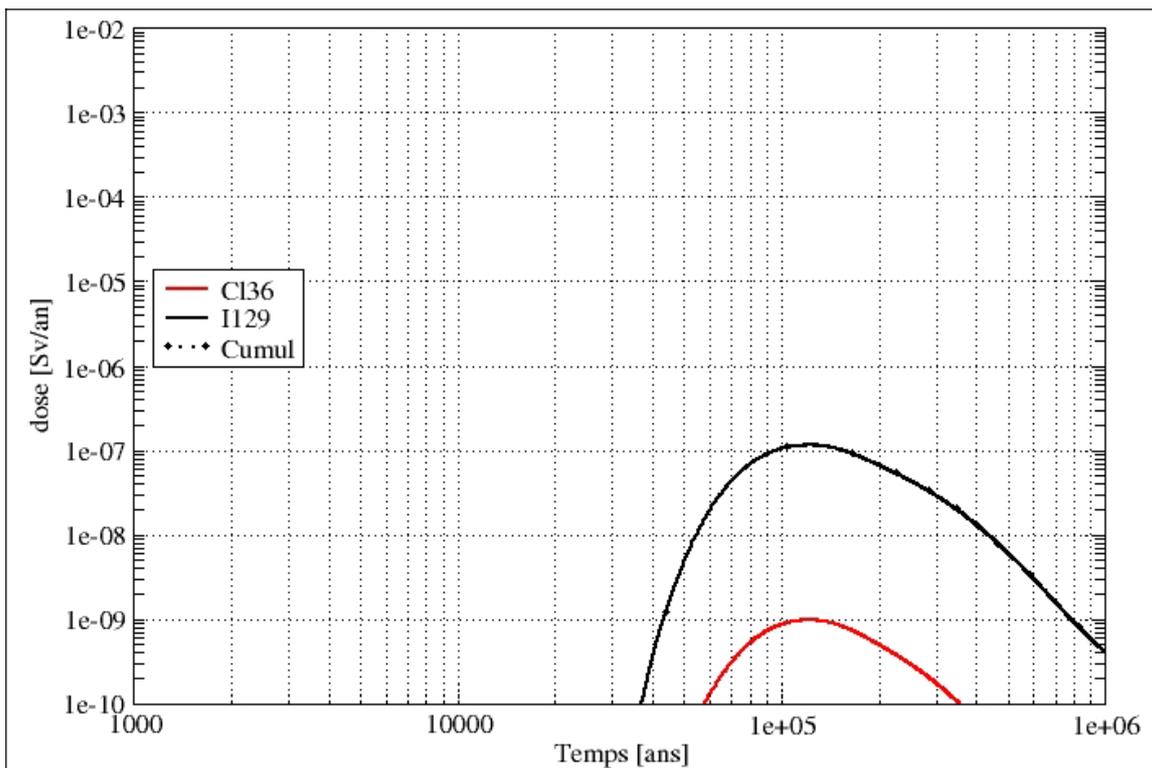


Figure 7.5-11 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types de combustibles usés CU2 [Voie de transfert par les ouvrages]

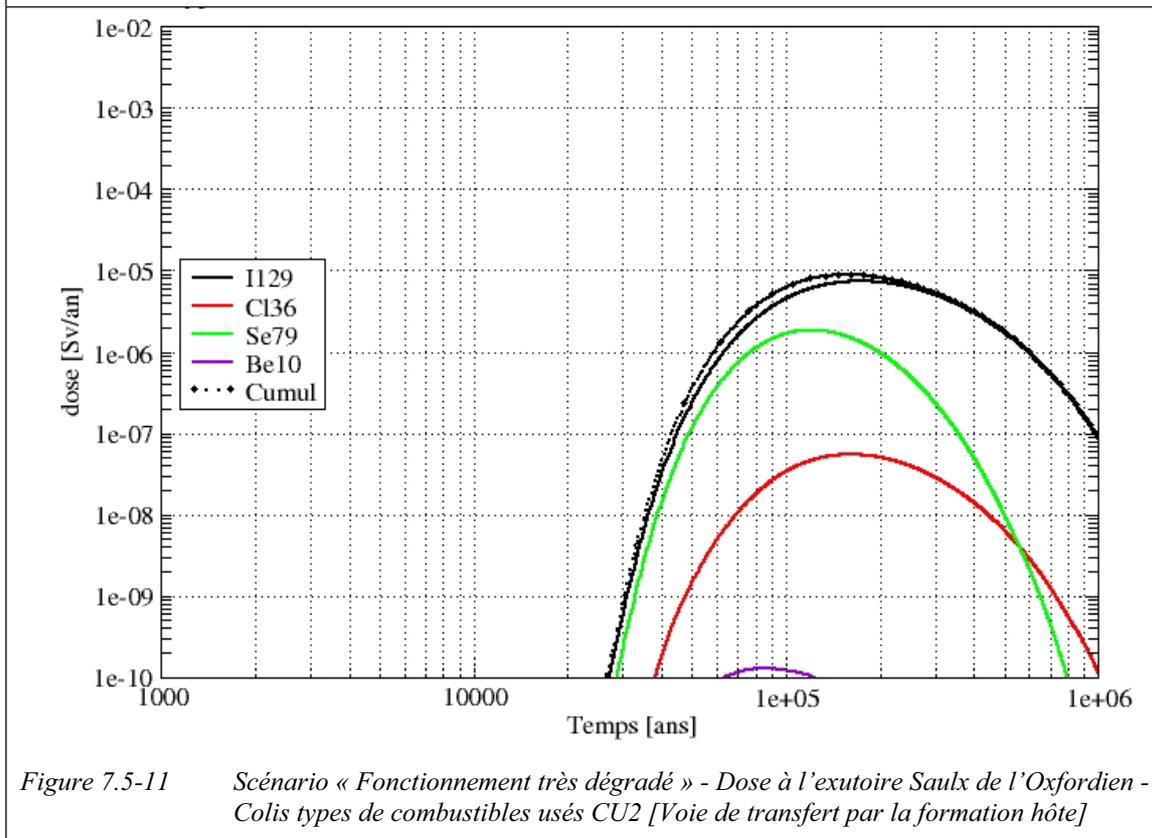


Figure 7.5-11 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types de combustibles usés CU2 [Voie de transfert par la formation hôte]

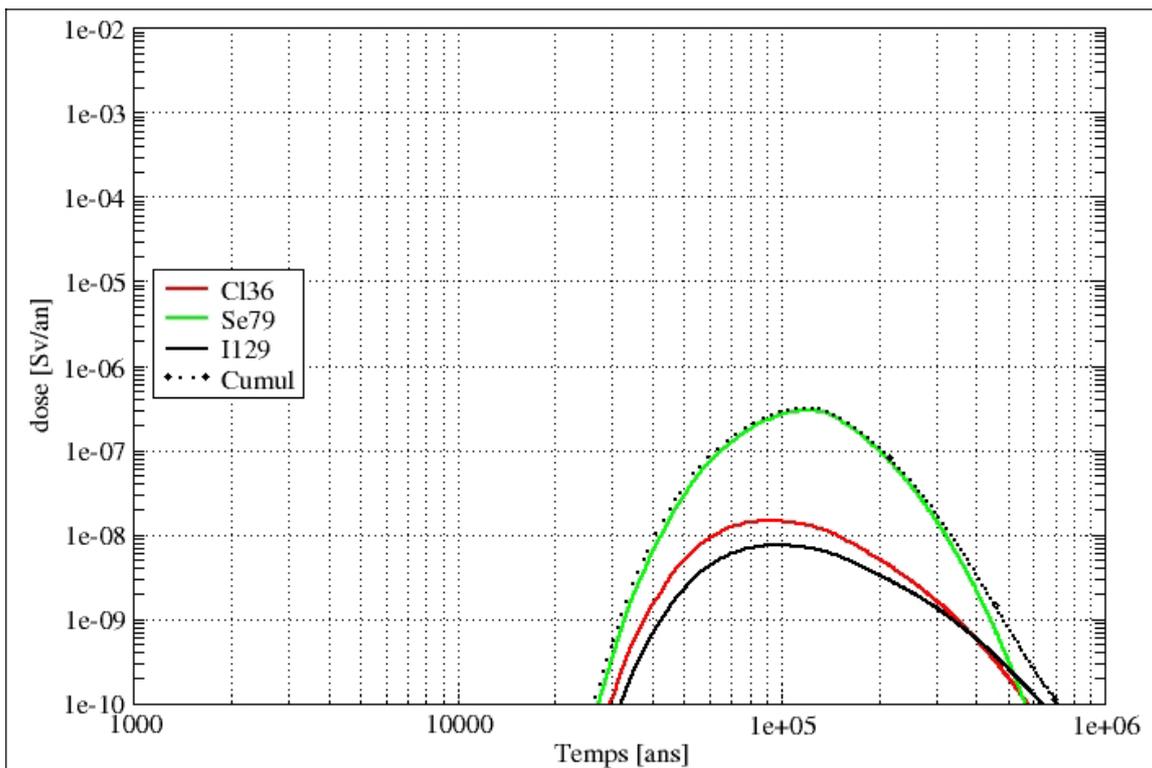


Figure 7.5-12 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types C1/C2 [Voie de transfert par les ouvrages]

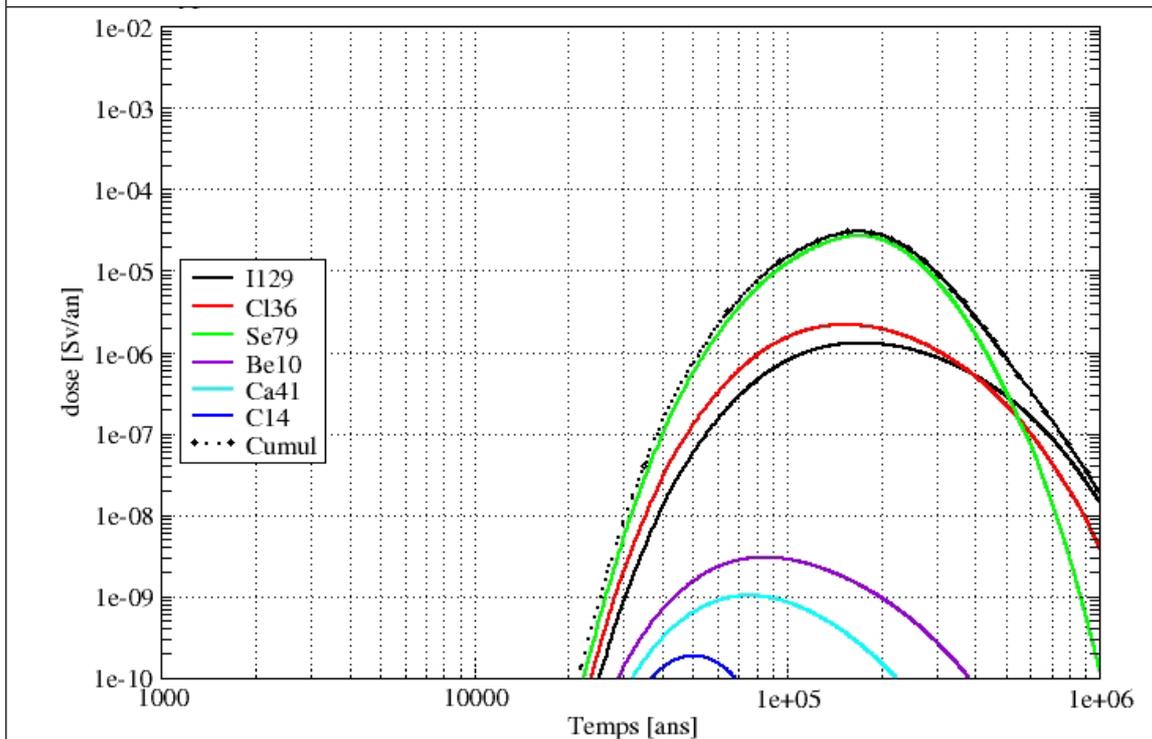


Figure 7.5-12 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types C1/C2 [Voie de transfert par la formation hôte]

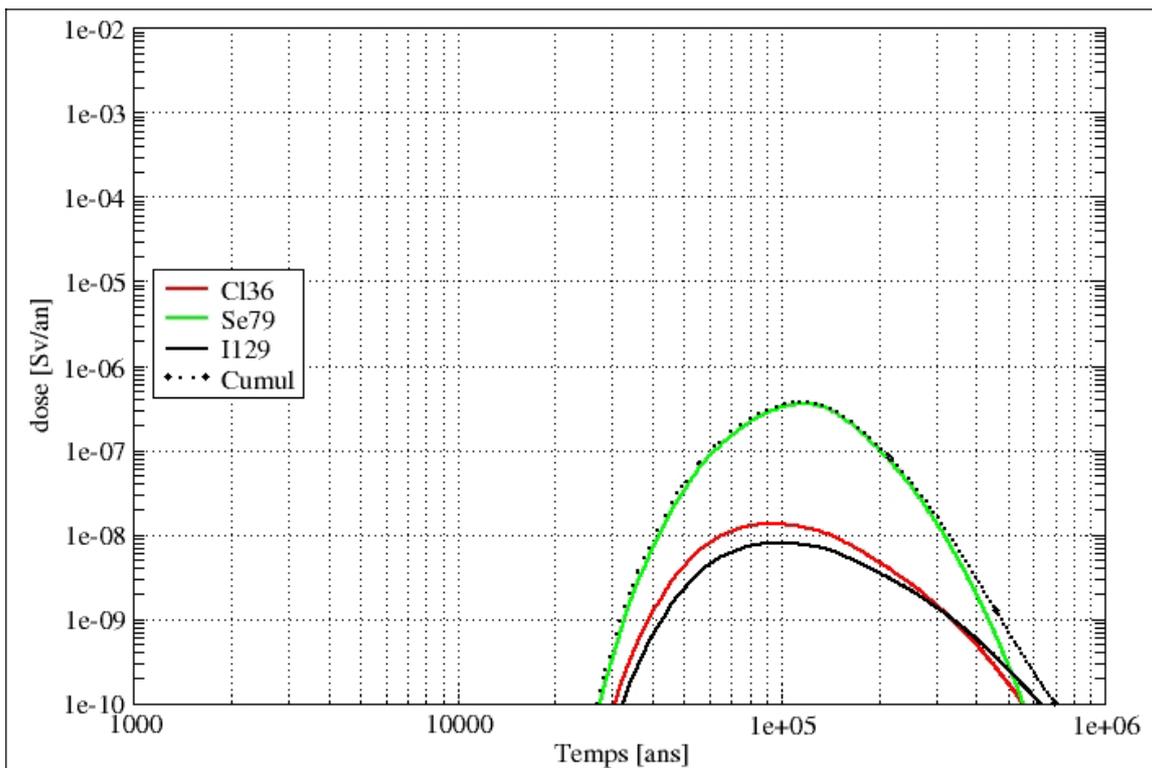


Figure 7.5-13 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types C3/C4 [Voie de transfert par les ouvrages]

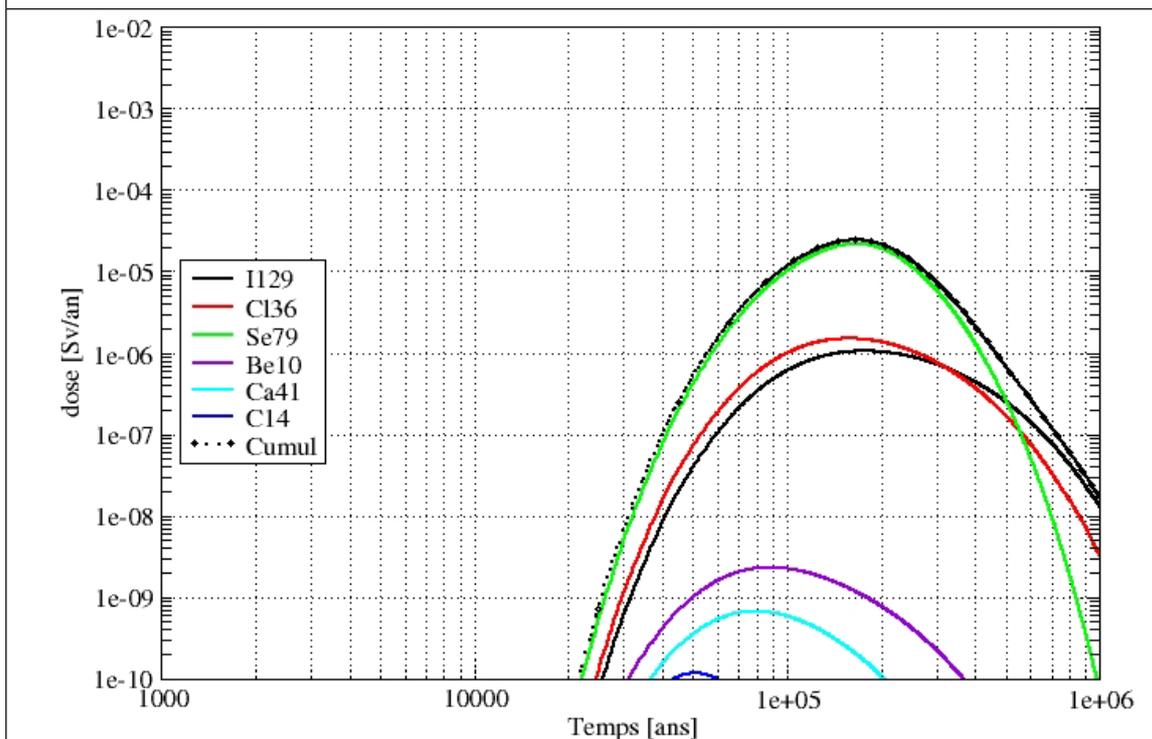


Figure 7.5-13 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Colis types C3/C4 [Voie de transfert par la formation hôte]

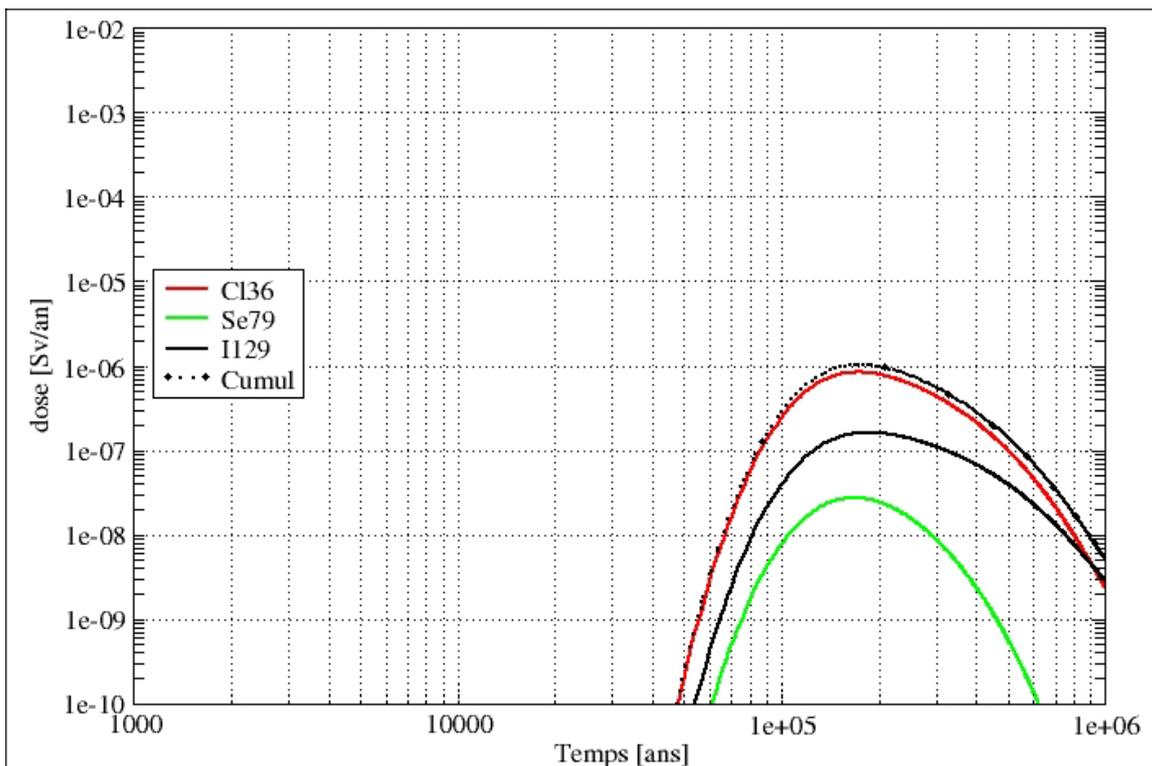


Figure 7.5-14 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Voie de transfert par les ouvrages - Colis types de déchet B1x [Voie de transfert par les ouvrages]

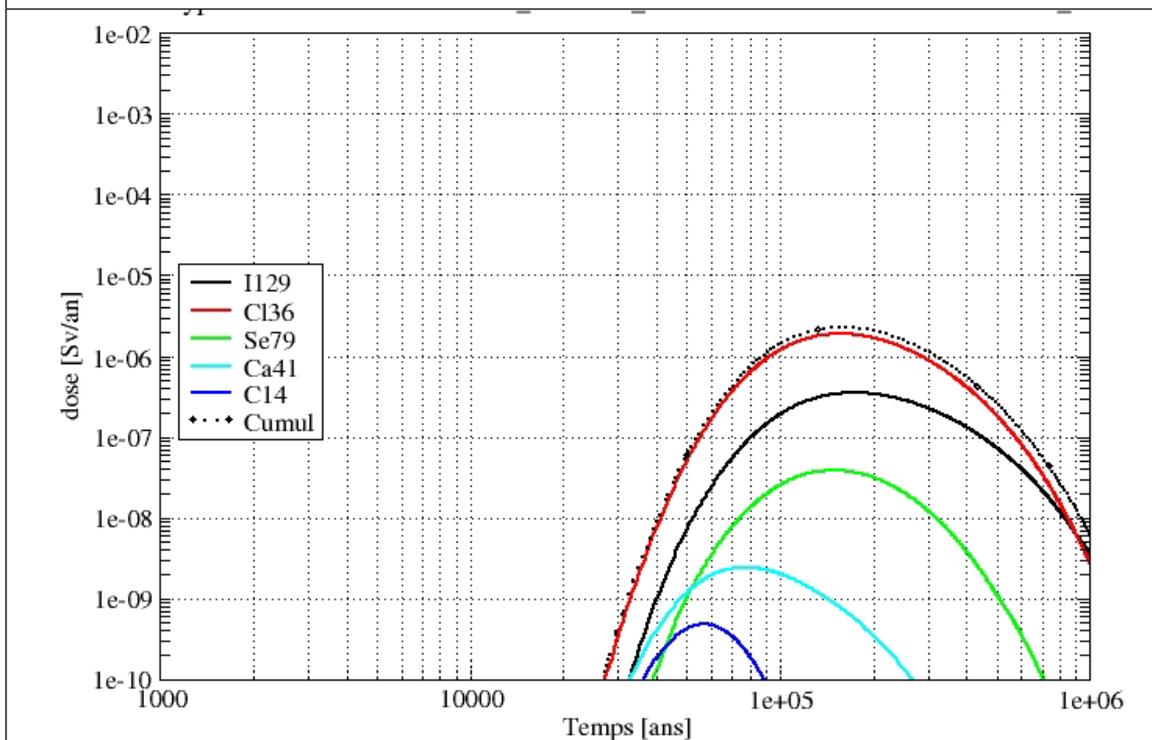


Figure 7.5-14 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien - Voie de transfert par les ouvrages - Colis types de déchet B1x [Voie de transfert par la formation hôte]

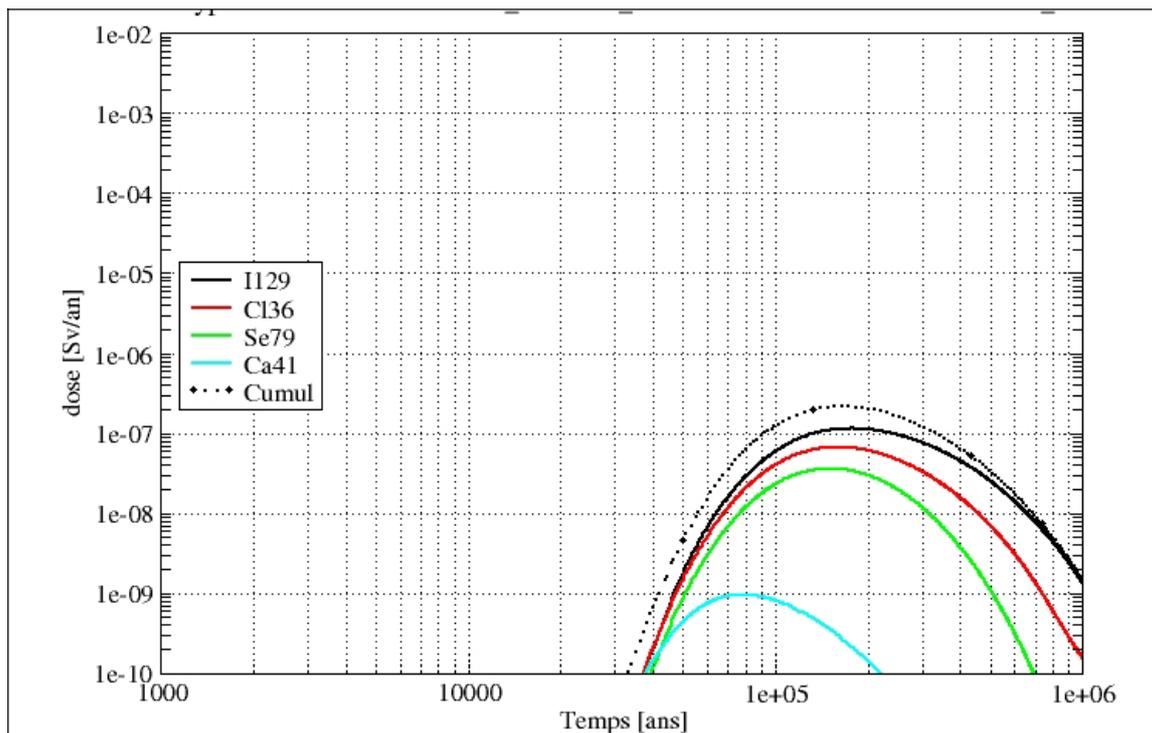


Figure 7.5-15 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien – Voie de transfert par les barrière géologique - Colis types de déchets B1x et B2

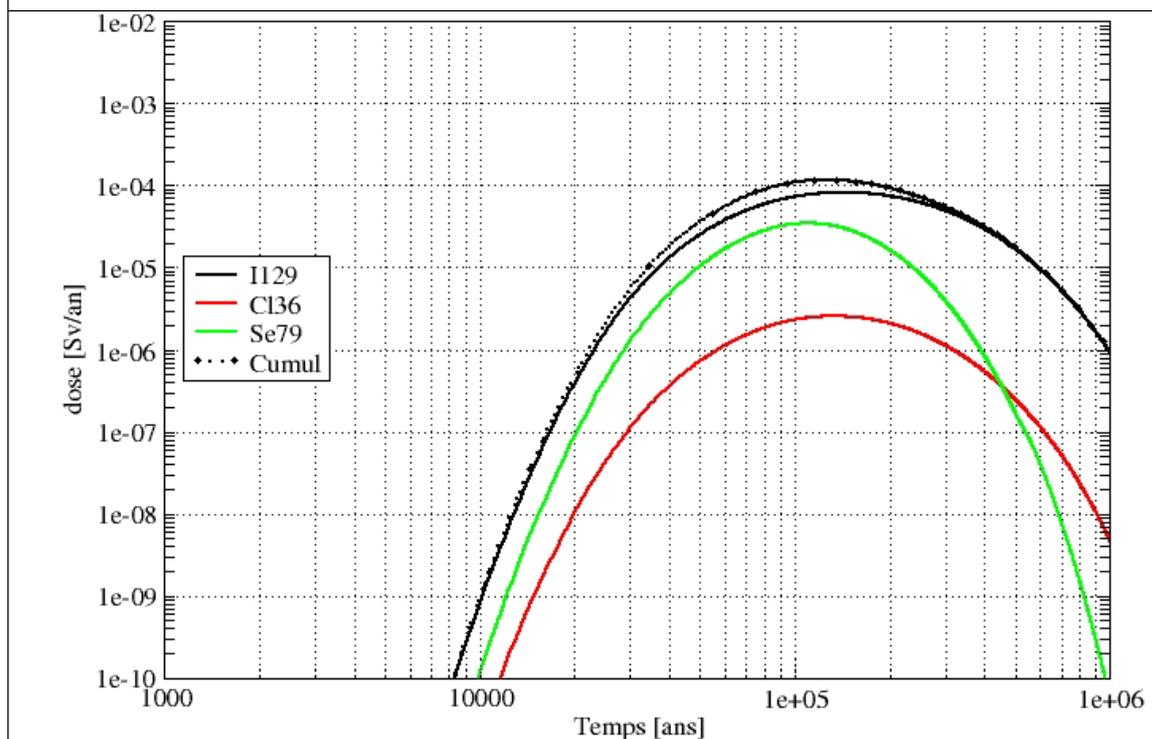
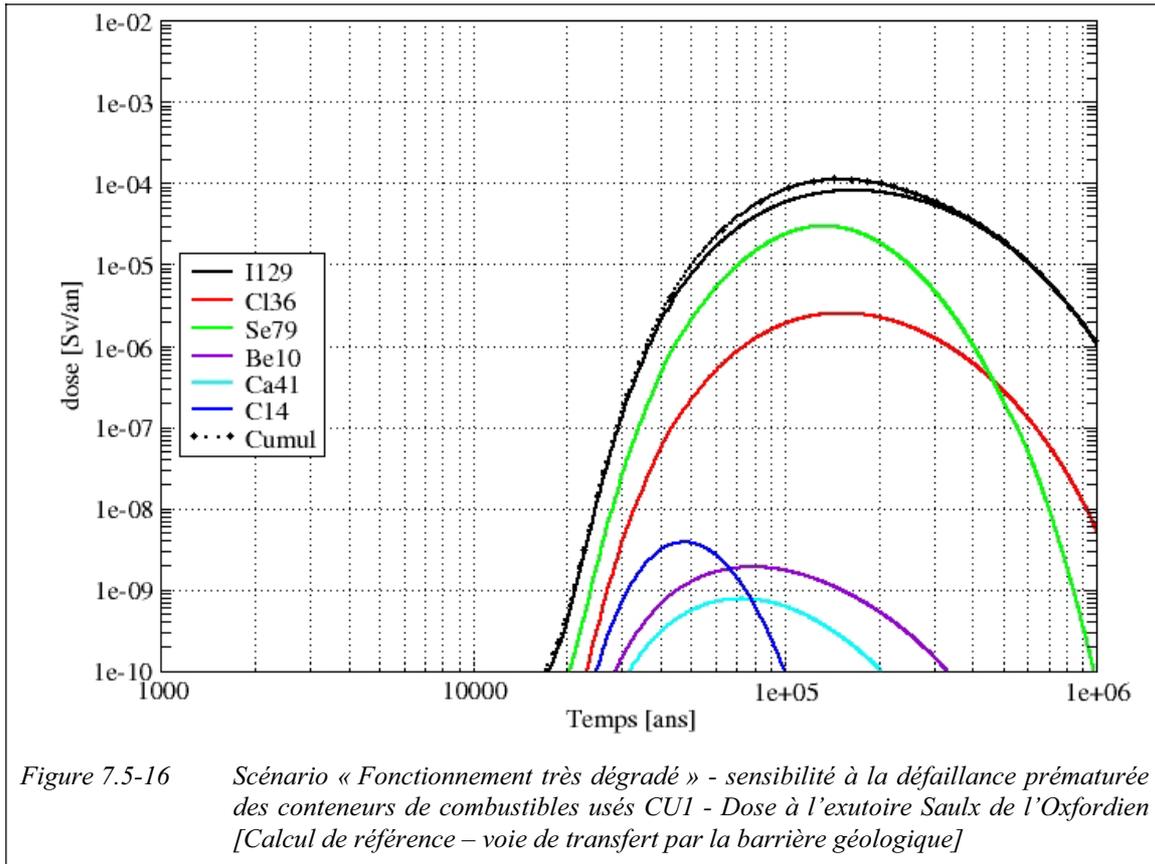


Figure 7.5-16 Scénario « Fonctionnement très dégradé » - sensibilité à la défaillance prématurée des conteneurs de combustibles usés CU1 - Dose à l'exutoire Saulx de l'Oxfordien [Sensibilité à la défaillance des conteneurs - Voie de transfert par la barrière géologique]



Références bibliographiques

- [1] Loi n°91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, Journal Officiel du 1^{er} janvier 1992.
- [2] Direction de la sûreté des installations nucléaires, Règle Fondamentale de Sûreté III.2.f, 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 - Juin 1991.
- [3] OCDE/AEN, radioactive waste management, Confidence in the long-term safety of deep geological repositories. Its development and communication, 1999.
- [4] OCDE/AEN Establishing and communicating confidence in the safety of deep geological disposal. Approaches and arguments, 2002.
- [5] Andra, Dossier 2001 HAVL argile, 2001.
- [6] International commission on radiological protection, Publication 81.
- [7] Andra (2005) Evolution phénoménologique du stockage géologique – Dossier argile 2005. Rapport Andra n° C RP ADS 04-0025.
- [8] Guide méthodologique pour l'évaluation des risques sanitaires dus aux substances chimiques dans les études d'impact des ICPE (INERIS – ED06).
- [9] Norme NF EN ISO 9001 (version 2000) : Système de management de la qualité.
- [10] Norme NF EN ISO 14001 (version 2004) : Systèmes de management environnemental.
- [11] Andra (2005) Comparaison entre l'approche de sûreté de l'Andra et les recommandations de la RFS III.2.f – Dossier argile et granite 2005. Rapport Andra n° C NT ADSQ 04-0023
- [12] AIEA, DS 154, Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes (Draft).
- [13] OCDE/AEN, Post-closure safety case for geological repositories, 2004.
- [14] Arrêté du 10 août 1984 relatif à la qualité de la conception, de la construction et de l'exploitation des installations nucléaires de base, Journal Officiel du 22 septembre 1984.
- [15] OCDE/AEN The French R&D programme on deep geological disposal of radioactive waste, an international peer review of the “dossier 2001 argile”, 2003.
- [16] Décret n°92-1391 du 30 décembre 1992 relatif à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.
- [17] Andra (2005) Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP ADS 04-0022
- [18] Andra (2005) Référentiel de connaissance et modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C RP AHVL 04-0006.

-
- [19] Andra (2005) Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C RP ASCM 04-0015.
- [20] Andra (2005) Référentiel de comportement des colis de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C RP ASCM 04-0017.
- [21] Andra (2005) Référentiel de comportement des radionucléides et des toxiques chimiques d'un stockage dans le Callovo-Oxfordien jusqu'à l'homme – Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP ASTR 04-0032.
- [22] Andra (2005) Architecture et gestion du stockage géologique – Dossier argile 2005. Rapport Andra n° C RP ADP 04-0001.
- [23] Andra (2005) Analyse fonctionnelle externe d'un stockage en formation argileuse profonde – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP AHVL 00-140.
- [24] Andra (2005) Analyse fonctionnelle interne d'un stockage en formation argileuse profonde, en phase d'exploitation-observation – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP AHVL 01-033.
- [25] Andra (2005) Analyse fonctionnelle interne d'un stockage en formation argileuse profonde, en phase post-fermeture – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP AHVL 01-031.
- [26] Andra (2005) Spécification technique de besoin d'un stockage en formation argileuse profonde – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C SP AHVL 02-132.
- [27] Andra (2005) Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) – Phase d'exploitation d'un stockage en formation argileuse profonde – Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASIT 03-077.
- [28] Andra (2005) Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) – Phase post-fermeture d'un stockage en formation argileuse profonde – Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASIT 03-133.
- [29] Andra (2005) Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) – Evènements aléatoires – Défaut de colis de déchets vitrifiés et de colis de combustibles usés – Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASIT 03-075.
- [30] Andra (2005) Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) – Evènements aléatoires – Défaut de scellement – Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASIT 03-131.
- [31] Andra (2005) Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) – Evènements aléatoires – Forage dans le stockage – Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASIT 03-076.
- [32] Andra (2005) Analyse des niveaux de réversibilité d'un stockage en formation argileuse profonde – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP AHVL 04-0028
- [33] Andra (2005) Analyse qualitative de sûreté à long terme d'un stockage en formation argileuse profonde – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT AMES 04-0049
- [34] OCDE/AEN, Gestion des échelles de temps dans l'évaluation de sûreté en phase de post-fermeture, 2004

-
- [35] Wendling J. (2005) Le transitoire hydraulique d'un stockage : décharge, désaturation-resaturation, retour à un état d'équilibre hydraulique- Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASIT 03-117
- [36] Chabiron A. et Plas F. (2005) L'évolution phénoménologique normale d'un stockage en formation argileuse profonde – Site de Meuse/Haute-Marne – Les processus majeurs : nature, temps caractéristique et principaux couplages. Rapport Andra n° C NT ASIT 04-0012
- [37] Andra, AFCN, AVN, ONDRAF, IRSN, DGSNR - Eléments d'une approche de sûreté d'un stockage géologique de déchets radioactifs
- [38] AIEA, Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals, Safety series n°111, 1995
- [39] P. Lyonnet (1997), la qualité, outils et méthodes. Ed Techniques et documentation, Lavoisier, Paris
- [40] Rapport de la Commission d'Evaluation de la situation du Centre de Stockage de la Manche (dit rapport « TURPIN ») – Juillet 1996
- [41] Andra (2005) Scellements et remblais des galeries et des puits d'un stockage en formation argileuse profonde – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT AHVL 04-0030
- [42] Barnichon JD. N. (2005) Le comportement mécanique de scellements de galeries dans le temps – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP ASMG 03-111
- [43] Chandler N.A, Cournut A, Dixon D, Fairhurst C, Hansen F, Gray M, Hara K, Ishijima Y, Kozak E, Martino J, Masumoto K, Mc Crank G, Sugita Y, Thompson P, Tillerson J, Vignal B (2002) - The five year report on the Tunnel Sealing Experiment : An international Project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP - AECL Report-12127
- [44] Giffaut E. (2005) La solubilité et la rétention de radionucléides et de toxiques chimiques au sein d'alvéoles de stockage de déchets B - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASTR 03-106
- [45] Andra (2005) Synthèse des études de sûreté-criticité d'un stockage en formation argileuse profonde. Rapport Andra n° C.NT.AMES.04.0041.
- [46] Andra (2005) Sûreté opérationnelle : analyse de risque dans un stockage en formation argileuse profonde. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.0514.
- [47] Règle Fondamentale de Sûreté I.4.a relative à la protection contre l'incendie (28 février 1985).
- [48] Règle Fondamentale de Sûreté II.2 relative à la conception et exploitation des systèmes de ventilation dans les installations de base autres que les réacteurs nucléaires (20 décembre 1991).
- [49] Arrêté du 01 juin 2001 modifié relatif au transport international des marchandises dangereuses par route, dit « arrêté ADR ».
- [50] DBE Technology (2001) Study related to the design rational of the shafts of the German and French geological repositories. Rapport Andra n° C.RP.0DBE.01.001.
- [51] Règle Fondamentale de Sûreté n° 2001-01 relative à la détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface.

-
- [52] Brulhet J. (2005) L'aléa sismique à long terme et son impact pour un stockage - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.0102.
- [53] Règle Fondamentale de Sûreté n° I.1.a relative à la prise en compte des risques liés aux chutes d'avion (7 octobre 1992).
- [54] Wendell D. Weart, Norbert T. Rempe and Dennis W. Powers (1998) Geotimes, October 1998 : The Waste Isolation Pilot Plant (WIPP).
- [55] Oresund Safety Advisers AB (ØSA) (2002) Fire risk analysis of underground transports to the deep repository for spent fuel. Rapport n° 01191/FN (établi pour The Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co).
- [56] Lacroix D. (2003) Résistance au feu des tunnels routiers. Centre d'Etudes des Tunnels, Tunnels et ouvrages souterrains n° 179, septembre/octobre 2003.
- [57] U.S. Nuclear Regulatory Commission (2001) An analysis of a spent fuel transportation cask under severe fire accident conditions - Christopher S. Bajwa.
- [58] Andra (2005) Colis de stockage de déchets B. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.0507.
- [59] Andra (2005) Définition du scénario d'évolution normale - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.AMES.03.052.
- [60] Andra (2005) La conceptualisation « phénoménologique » du scénario d'évolution normale (SEN) - Propositions - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASIT 03-128
- [61] Talandier J. (2005) La production et le transfert de gaz dans un stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien – Lien avec le transitoire hydraulique – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASCM 03-0042
- [62] Su K. (2005) Le comportement mécanique d'alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés dans le temps – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP ASMG 03-0109
- [63] Barnichon JD. et Su K. (2005) Le comportement mécanique d'alvéoles de stockage de déchets B dans le temps – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP ASMG 03-0110
- [64] Andra (2005) Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 - Scénario d'Evolution Normale - Calculs de référence et de sensibilité. Rapport Andra n° C RP ACSS 05-0005
- [65] AEN – JEF-2.2 – Nuclear Data Library
- [66] Schumacher S. (2005) Synthèse des modèles de relâchement des colis de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C NT ASCM 03-0045
- [67] Bourbon X. (2005) L'évolution chimique des ouvrages d'un stockage à base de béton : alvéoles de stockage de déchets B, appuis de scellements et de bouchons d'alvéoles, infrastructures des galeries – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASCM 03-021
- [68] Crusset D. (2005) La corrosion des composants métalliques d'un stockage : les (sur)conteneurs de colis de déchets vitrifiés et de combustibles usés et les infrastructures métalliques- Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASCM 03-0046

- [69] Jacquot E. et Michau N. (2005) La perturbation alcaline liée à un stockage : les argilites du Callovo-Oxfordien en champ proche et les composants à base d'argile gonflante – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASTR 03-069.
- [70] Giffaut E. et Coelho D. (2005) La solubilité, la rétention et le transport de radionucléides et de toxiques chimiques au sein d'alvéoles de stockage de colis de déchets C et de combustibles usés – Site de Meuse / Haute-Marne . Rapport Andra n° C NT ASTR 03-108
- [71] Giffaut E. et Buschaert S. (2005) La solubilité et la rétention de radionucléides et de toxiques chimiques au sein du Callovo-Oxfordien sain et perturbé – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASTR 03-099.
- [72] Trouiller A. et Benabderrahmane H. (2005). Les modèles géologique et hydrogéologique des formations géologiques encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien à l'état initial – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASMG 03-0108
- [73] Texier D. et Leclerc-Cessac E. (2005) Les biosphères de référence – Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP ASMG 03-104
- [74] INSEE (1991). Consommation et lieux d'achat des produits alimentaires en 1991, enquête effectuée par Nicolas Manon et Michèle Bertrand, INSEE Résultats].
- [75] Albrecht A. et Gallerand MO. Évaluation des facteurs de conversion biosphère pour les radionucléides et des risques associés aux toxiques chimiques. Modélisation de leur comportement dans les biosphères de référence – Site de Meuse / Haute-Marne . Rapport Andra n° C NT ASTR 03-110
- [76] Côme, B., Béon, O., Albrecht, A., Gallerand, M.-O., Little, R.H. & Strenge, D.L., (2004) Evaluating multimedia exposure codes : the BIOSCOMP exercise. In: Brownfields multimedia modelling & assessment (Ed. by G. Whelan), pp. 41-50. WIT Press: Southampton, Siena
- [77] Klos, R.A., Simón, I., Bergström, U., Uijt de Haag, A.M., Valentin-Ranc, C., Zeevaert, T., Reid, J.A.K., Santucci, P., Titley, J. & Stansby, J., (1999) Complementary studies : biosphere modelling for dose assessments of radioactive waste repositories. J. Environ. Radioactivity, 42, pp 237-254
- [78] Yoshida, H. (2004) BIOPROTA Theme 2 Task 4 Comparison of Assessment Models for Long Term Accumulation in Soil; Rapport Andra n° Z.NT.ASTR.03.109
- [79] AIEA (2005). EMRAS : Environmental Modelling for RAdiation Safety, International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria).
- [80] Pépin G. et Vialay B. (2005) L'architecture des calculs de sûreté d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ACSS 03-113
- [81] OCDE/AEN, Management of uncertainty in safety cases and the role of risk, proceedings of a workshop hosted by the Swedish radiation protection agency (SSI), 2004
- [82] Andra (2005) Analyse qualitative de sûreté en phase post-fermeture d'un stockage : liste des événements extérieurs – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT AMES 04-0039
- [83] OCDE/AEN Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media, 2003

-
- [84] OCDE/AEN Features, Events and Processes (FEPs) for Geological Disposal of Radioactive Waste: An International Database, 2000.
- [85] Project Opalinus Clay: FEP Management for Safety Assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate level of waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-23, Wettingen, Switzerland.
- [86] Andra (2005) Comparaison FEP's – AQS - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C RP AMES 04-0037
- [87] Altmann S. et Jacquot E. (2005) La chimie des eaux interstitielles dans la couche du Callovo-Oxfordien à l'état initial – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASTR 03-023
- [88] Altmann S. et Coelho D. (2005) Le modèle d'écoulement et de transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien sain et perturbé – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASTR 03-0022
- [89] Andra (2004) Forages de reconnaissance de la formation - Synthèse FRF - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse Haute-Marne. Rapport Andra n° D RP ADPE 04-1245
- [90] Van Geet M. et al. (2004) – Large Scale in situ Demonstration Test for Repository Sealing in an Argillaceous Host Rock – The RESEAL Project, EuradWaste 04.
- [91] Harrington J., Horseman S. (2003) – Gaz migration in KBS-3 buffer bentonite, Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions, SKB Report TR-03-02.
- [92] Andra (2005) Le transitoire redox dans un stockage et dans le Callovo-Oxfordien en champ proche – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASIT 03-127
- [93] Michau N. (2005) L'évolution chimique des ouvrages d'un stockage à base d'argile gonflante : alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés et scellements de galeries et de puits – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASCM 03-043
- [94] R.A. Van Konynenburg (1996) Comments on the draft paper : Underground supercriticality from plutonium and other fissile material, written by C.D. Bowman and F. Venneri (LANL). Publication page 303-322, volume 5 de Science & Global Security
- [95] T.W. Hicks et T.H. Green (1999) A review of the treatment of criticality in post-closure safety assessment of radioactive waste disposal. Rapport Environment Agency N° P222 R&D
- [96] Giffaut E. (2005) Evaluation des possibilités de reconcentration de radionucléides au sein d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse / Haute-Marne . Rapport Andra n° C NT ASTR 03-0111
- [97] Andra (2005) Définition du scénario forage dans le stockage - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT AMES 03-055
- [98] Bauer C. (2005) La charge thermique d'un stockage – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASIT 03-118
- [99] Coelho D. (2005) La thermo-convection dans la couche du Callovo-Oxfordien et les formations géologiques encaissantes sous l'effet de la charge thermique d'un stockage – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT ASTR 03-105

- [100] Expérience Plug and backfill test.
- [101] Andra (2005) Observation et surveillance d'un stockage en formation argileuse profonde. Rapport Andra n° C RP AHVL 04-0029
- [102] www.andra.fr/bioclim
- [103] Andra (2005) Définition du scénario défaut de scellement et/ou transfert par la zone endommagée – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT AMES 03-010
- [104] Andra (2005) Définition du scénario défaut de colis – Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C NT AMES 03-009
- [105] Andra (2005) Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 - Scénario d'Evolution Altérée –« Défaut de scellement » - Calculs de référence et de sensibilité. Rapport Andra n° C RP ACSS 05-0010
- [106] Andra (2005) Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 - Scénario d'Evolution Altérée – Défaut de colisage - Calculs de référence et de sensibilité. Rapport Andra n° C RP ACSS 05-0007
- [107] CFR part 191 - Environmental radiation protection standards for management and disposal of spent fuel, high-level and transuranic wastes - US Environmental Protection Agency, 1993
- [108] Andra (2005) Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 - Scénario d'Evolution Altérée –«Forage Exploratoire » - Calculs de référence et de sensibilité. Rapport Andra n° C RP ACSS 05-0008