RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANDRA
Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

Décembre 2022

DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE DE BASE (INB) CIGÉO

PIÈCE 7

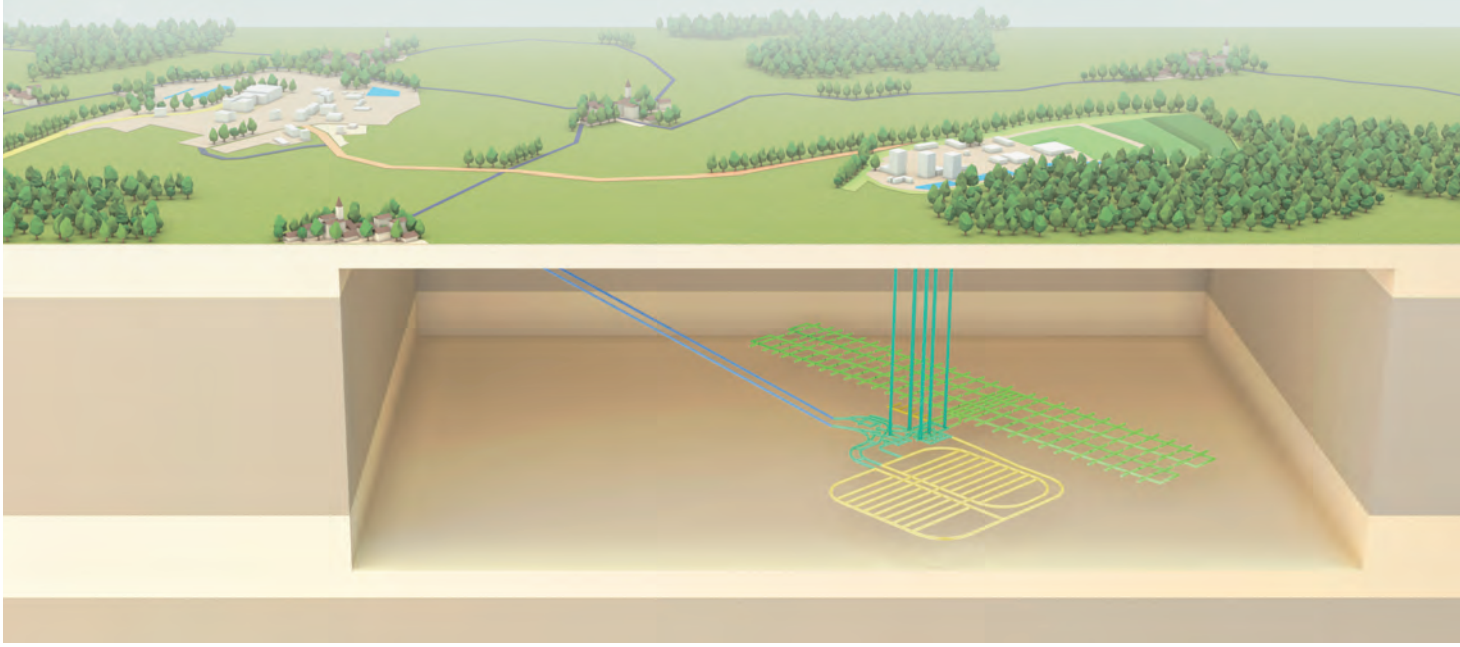
Version préliminaire du rapport de sûreté

PARTIE III

Démonstration de sûreté

Volume 8

La démonstration de sûreté après fermeture



Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo

Pièce 7 : Version préliminaire du rapport de sûreté
Partie III : Démonstration de sûreté
Volume 8 : La démonstration de sûreté après fermeture

CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-21-0007/A

Sommaire

1. La déclinaison de la démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture 13

1.1 Les objectifs et les principes guidant la sûreté après fermeture 14

1.1.1 L'objectif fondamental de protection à long terme après fermeture de l'installation souterraine 14

1.1.2 Les principes et fonctions de sûreté relatifs au stockage en formation géologique 17

1.1.3 La démonstration de la sûreté après-fermeture de l'installation souterraine 23

1.1.4 L'apport des pratiques internationales 24

1.2 La démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture du stockage 25

1.3 Les scénarios après-fermeture 30

1.3.1 La classification et la nomenclature retenues pour les scénarios en après fermeture 31

1.3.2 Les objectifs et la définition des scénarios 34

1.4 L'apport de l'analyse des risques et incertitudes à l'identification et la définition des scénarios 43

1.4.1 La méthodologie d'analyse des risques et incertitudes après fermeture 44

1.4.2 L'établissement de la liste des scénarios à quantifier 48

1.5 Les évaluations quantitatives des scénarios et leurs enseignements 50

1.5.1 La vérification de la performance des composants 50

1.5.2 La vérification des incidences sanitaires sur l'homme 52

1.5.3 L'apport des études de sensibilité 56

1.5.4 Le schéma général de mise en œuvre des évaluations quantitatives 56

1.5.5 La maîtrise des outils de simulation 60

2. L'analyse des risques et incertitudes 63

2.1 Les composants retenus pour l'analyse des risques et incertitudes 64

2.1.1 Les composants contribuant à la réalisation des fonctions 64

2.1.2 Les composants ne contribuant pas à la réalisation des fonctions de sûreté 67

2.2 La couche du Callovo-Oxfordien 69

2.2.1 L'analyse des caractéristiques intrinsèques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien 69

2.2.2 L'analyse des perturbations susceptibles d'impacter les performances de la couche du Callovo-Oxfordien 73

2.2.3 Les performances de la couche du Callovo-Oxfordien préservées du risque de criticité à long terme 93

2.3 L'architecture 94

2.3.1 La position verticale du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien 94

2.3.2 La conception des quartiers de stockage HA et MA-VL 95

2.4 Les scellements des liaisons surface-fond et des galeries 100

2.4.1 Le noyau argileux des scellements 101

2.4.2 L'interface noyau-argilites 108

2.5 Le transitoire Hydraulique – Gaz 115

2.5.1 Le transfert des solutés en fonction de l'état de saturation des composants du stockage 115

2.5.2 Le transfert des radionucléides sous forme gazeuse 116

2.5.3 L'influence de la pression de gaz sur la couche de Callovo-Oxfordien 118
2.5.4 L'influence du transitoire hydraulique-gaz sur les scellements 121

2.6 Les ouvrages remblayés (galeries et descenderies) 123

2.6.1 Le remblai 123
2.6.2 Le revêtement/soutènement et le radier laissé en place 125

2.7 Les alvéoles de stockage HA 127

2.7.1 Les colis HA stockés 128
2.7.2 La partie utile de l'alvéole HA 140

2.8 Les alvéoles de stockage MA-VL 151

2.8.1 Les colis MA-VL stockés 151
2.8.2 La partie utile de l'alvéole MA-VL 155
2.8.3 La couche du Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement au droit des alvéoles 163
2.8.4 Le dispositif d'obturation des alvéoles MA-VL 164

2.9 Les formations encaissantes 164

2.9.1 La représentation des formations encaissantes 165
2.9.2 La modélisation hydrogéologique du site 166
2.9.3 Les ressources naturelles du sous-sol sur la ZIOS 167

2.10 Les exutoires 169

2.10.1 Le choix des exutoires des transferts des radionucléides et substances toxiques chimiques vers les formations encaissantes inférieures 170
2.10.2 Le choix des exutoires des transferts des radionucléides et substances toxiques chimiques vers les formations encaissantes supérieures 170
2.10.3 La synthèse des exutoires retenus pour les évaluations 171

2.11 Les biosphères 172

2.12 L'analyse spécifique des risques liés aux activités humaines après fermeture du stockage 174

2.13 L'analyse spécifique de l'aléa sismique sur le système de stockage 175

2.13.1 L 'analyse de l'influence d'un aléa sismique sur la couche du Callovo-Oxfordien 176
2.13.2 L'analyse de l'influence de l'aléa sismique sur l'hydrogéologie des formations encaissantes 179
2.13.3 L'analyse de l'influence de l'aléa sismique sur les scellements 180

3. La synthèse de l'analyse des risques et incertitudes et scénarios retenus pour les évaluations 183

3.1 La synthèse de la gestion des risques et incertitudes résiduelles de connaissances scientifiques et technologiques 184

3.1.1 La gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception 184
3.1.2 La gestion des risques et incertitudes par l'identification et la définition des scénarios 185
3.1.3 Le regroupement des scénarios SEA et *What-if* identifiés à l'issue de l'analyse des risques et incertitudes 203

3.2 La liste des scénarios et situations retenus et définis pour les évaluations quantitatives 206

3.2.1 Le scénario d'évolution normale et les situations associées 207
3.2.2 La liste des scénarios d'évolution altérés (SEA) retenus et définis pour quantification 207
3.2.3 La liste des scénarios *What-if* retenus et définis pour quantification 209
3.2.4 La liste des scénarios d'intrusion humaines involontaires (SIHI) retenus 210

4. La description des biosphères 211

4.1 La description des modèles associés à la biosphère type tempérée 212

4.1.1 Le rappel du choix des exutoires 212
4.1.2 Les groupes de référence hypothétiques retenus pour les évaluations 213
4.1.3 La description des groupes de référence hypothétiques 218

4.2 La description des modèles associés à la biosphère type chaude 220

4.2.1 Le rappel du choix des exutoires 220
4.2.2 Les groupes de référence hypothétiques retenus pour les évaluations 221
4.2.3 Les voies de transfert et la description du groupe de référence hypothétique 222

4.3 La description des modèles associés à la biosphère type froide 222

4.3.1 Le rappel du choix des exutoires 222
4.3.2 Les groupes de référence hypothétiques retenus pour les évaluations 223
4.3.3 Les voies de transfert et la description des groupes de référence hypothétiques 224

5. La description et la conceptualisation du scénario d'évolution normale 225

5.1 Les éléments généraux communs aux deux situations 226

5.1.1 Les composants et les voies de transfert potentielles pris en compte pour la description du SEN 226
5.1.2 Les radionucléides retenus 227
5.1.3 Les substances toxiques chimiques retenues 230
5.1.4 L'architecture de stockage retenue 230
5.1.5 L'inventaire en radionucléides et sa distribution dans l'architecture de stockage 231
5.1.6 L'inventaire en substances toxiques chimiques et sa distribution dans l'architecture de stockage 237

5.2 La description et la conceptualisation de la situation de référence 238

5.2.1 La position du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien 238
5.2.2 La couche du Callovo-Oxfordien 239
5.2.3 Les alvéoles de stockage HA 247
5.2.4 Les alvéoles de stockage MA-VL 253
5.2.5 Les scellements des liaisons surface-fond et des galeries 260
5.2.6 Les ouvrages remblayés 266
5.2.7 Les formations encaissantes 267
5.2.8 La conceptualisation des exutoires 271
5.2.9 Les valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert des solutés 273

5.3 La description et la conceptualisation de la situation enveloppe 275

5.3.1 La position du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien 275
5.3.2 La couche du Callovo-Oxfordien 279
5.3.3 Les alvéoles de stockage HA 283
5.3.4 Les alvéoles de stockage MA-VL 288
5.3.5 Les scellements des liaisons surface-fond et des galeries 292
5.3.6 Les ouvrages remblayés 297
5.3.7 Les formations encaissantes 298
5.3.8 La conceptualisation des exutoires 301
5.3.9 Les valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert des solutés 302

5.4 Les indicateurs retenus pour vérifier la performance des composants et de l'architecture dans son ensemble 304

6. Les résultats des évaluations pour le scénario d'évolution normale 309

6.1 Le rappel des objectifs et modalités des évaluations quantitatives du scénario d'évolution normale 310

6.2 Les résultats des évaluations pour la situation de référence 311

6.2.1 Les résultats des évaluations de performance relatives aux radionucléides 311
6.2.2 Les résultats des incidences sanitaires sur l'homme liées au transfert potentiel de radionucléides aux exutoires 331
6.2.3 Les résultats des évaluations de performance relatives aux substances toxiques chimiques présentes dans les déchets 339
6.2.4 Les résultats des incidences sanitaires sur l'homme liées au transfert potentiel de substances toxiques chimiques aux exutoires 348

6.3 Les résultats des évaluations pour la situation enveloppe 349

6.3.1 Les résultats des évaluations de performance relatives aux radionucléides 349
6.3.2 Les résultats des incidences sanitaires sur l'homme liées au transfert potentiel de radionucléides aux exutoires 382
6.3.3 Les résultats des évaluations de performance relatives aux substances toxiques chimiques présentes dans les déchets 400
6.3.4 Les résultats des incidences sanitaires sur l'homme liées au transfert potentiel de substances toxiques chimiques aux exutoires 418

7. Les enseignements tirés du scénario d'évolution normale 425

7.1 La vérification de la performance du système de stockage et de son environnement 426

7.1.1 Le rappel des choix structurants du scénario d'évolution normale 426
7.1.2 Les enseignements des résultats des évaluations quantitatives de la situation de référence du scénario d'évolution normale 428
7.1.3 Les enseignements des résultats des évaluations quantitatives de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale 431

7.2 La vérification des incidences sanitaires sur l'homme liées à un éventuel transfert à long terme de radionucléides dans la biosphère 437

7.2.1 Le rappel des choix structurants de la définition des biosphères retenues pour les évaluations 437
7.2.2 Les enseignements relatifs au compartiment biosphère 438
7.2.3 Les enseignements des résultats relatifs aux incidences sanitaires sur l'homme aux différents exutoires 445

7.3 La vérification des incidences sanitaires sur l'homme liées à un éventuel transfert de substances toxiques chimiques dans la biosphère 450

8. Les scénarios d'évolution altérée (SEA) 453

8.1 Les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface 454

8.1.1 La description et la conceptualisation des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface 454
8.1.2 Les résultats des évaluations des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface 469

8.2 Les SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) 490

8.2.1 La description et la conceptualisation des SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA 490
8.2.2 Les résultats des évaluations pour les SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) 492

8.3 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios d'évolution altérée 500

8.3.1 Les enseignements tirés de l'évaluation des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface 500

8.3.2 Les enseignements tirés de l'évaluation des SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA 503

9. Les scénarios *What-if* 507

9.1 Les scénarios What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface 508

9.1.1 La description et la conceptualisation des *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface 508
9.1.2 Les résultats des évaluations des scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface 523

9.2 Le scénario What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA 551

9.2.1 La description et la conceptualisation du scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA 551
9.2.2 Les résultats des évaluations pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA 553

9.3 Les scénarios What-if relatifs à une discontinuité non détectée postulée dans la couche du Callovo-Oxfordien 561

9.3.1 Les éléments de contexte 561
9.3.2 La description et la conceptualisation des scénarios *What-if* de discontinuité non détectée postulée 562
9.3.3 Les résultats des évaluations pour les scénarios *What-if* de discontinuité non détectée 566

9.4 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios What-if 590

9.4.1 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface 590
9.4.2 Les enseignements tirés de l'évaluation du scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA 595
9.4.3 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios *What-if* relatifs à une discontinuité non détectée postulée dans la couche du Callovo-Oxfordien 596

10. Les scénarios d'intrusion humaine involontaire 603

10.1 Le scénario « Forage avec prélèvement de carottes » 604

10.1.1 La description du scénario forage avec prélèvement de carottes et hypothèses associées 605
10.1.2 Les résultats du scénario forage avec prélèvements de carottes 606

10.2 Le scénario « Forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage » 607

10.2.1 La présentation générale du scénario 607
10.2.2 La description du scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage 607
10.2.3 Les résultats pour le scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage 611

10.3 Le scénario de forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle 637

10.3.1 La présentation générale du scénario 637
10.3.2 La description du scénario de forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle 637
10.3.3 Les résultats pour le scénario de forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle 639

10.4 Le scénario de forage exploratoire pendant le transitoire hydraulique-gaz 662

10.4.1 La présentation générale du scénario 662
10.4.2 La description du scénario 662
10.4.3 Les résultats du scénario de forage dans un alvéole MA-VL 664

10.5 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios d'intrusion humaine involontaire 665

10.5.1 Les enseignements tirés des évaluations du scénario forage avec prélèvement de carottes 665
10.5.2 Les enseignements tirés du scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage et du scénario de forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle 665
10.5.3 Les enseignements tirés du forage exploratoire pendant le transitoire hydraulique-gaz 673

11. Les études de sensibilité menées dans le cadre des évaluations de sûreté à long terme 675

11.1 La présentation des études de sensibilité et de leurs objectifs 676

11.2 Les études de sensibilité aux paramètres de transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien 677

11.2.1 La sensibilité au coefficient de diffusion effectif et au coefficient de sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien 677
11.2.2 La sensibilité à la surpression interstitielle d'origine hydraulique du Callovo-Oxfordien 680

11.3 Les études de sensibilité relatives à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL et aux éléments d'architecture et de conception 683

11.3.1 La sensibilité à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein du quartier de stockage et des alvéoles MA-VL 683
11.3.2 La sensibilité à la distance entre le quartier de stockage MA-VL et la base des liaisons surface-fond 687
11.3.3 La sensibilité à la diminution du diamètre des galeries 690
11.3.4 La sensibilité à l'augmentation du diamètre ou du nombre des puits 692
11.3.5 La sensibilité à l'augmentation de la longueur des alvéoles de stockage HA et MA-VL 695
11.3.6 La sensibilité à l'augmentation/diminution du nombre d'alvéoles de stockage HA en lien avec la flexibilité 695
11.3.7 La sensibilité à l'augmentation/diminution du nombre d'alvéoles de stockage MA-VL en lien avec la flexibilité 695

11.4 Les enseignements tirés des études de sensibilité 699

11.4.1 La sensibilité relative aux paramètres de transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien 699
11.4.2 La sensibilité relative à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL et aux éléments d'architecture et de conception 700
11.4.3 Les grands déterminants pilotant les indicateurs de sûreté en après fermeture 702

12. Les enseignements de la démonstration de sûreté après-fermeture 709

12.1 Une démarche fondée sur des exigences règlementaires de haut niveau et sur des pratiques de référence à l'international 710

12.2 Une démarche d'évaluation de sûreté qui repose sur des scénarios contrastés permettant d'évaluer le fonctionnement prévu du stockage ainsi que la robustesse de l'évaluation de sûreté face aux incertitudes résiduelles 711

12.3 Des résultats qui confirment la maîtrise du comportement des radionucléides au regard des objectifs de protection 712

12.3.1 Les résultats des évaluations de la situation de référence de l'évolution normale de l'installation de stockage soulignant des incidences très faibles 712

12.3.2 Les résultats des évaluations des autres situations et scénarios soulignant la robustesse du stockage 713

12.4 Des composants et des dispositions de conception pour la protection à long terme 715

12.4.1 La couche du Callovo-Oxfordien – le pilier de la sûreté après fermeture 716

12.4.2 Des composants ouvragés conçus pour tirer parti des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien 718

12.4.3 Des dispositions de conception contribuant à la sûreté à long terme du stockage 719

12.4.4 Les fonctions et leur correspondance avec les principaux composants du système de stockage 720

12.5 Des dispositions de surveillance mises en place dès la construction initiale en vue de la protection après-fermeture et à long terme 723

12.5.1 La stratégie retenue 723

12.5.2 Le déploiement de la surveillance 725

Tables des illustrations 727

Références bibliographiques 755

Préambule

L'article L. 542-1-1 du code de l'environnement précise que « *le stockage de déchets radioactifs est l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive dans le respect des principes énoncés à l'article L. 542 1* ». Selon le guide de l'ASN n° 1 (1), l'objectif fondamental du stockage en formation géologique est retranscrit comme suit : « *La protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage de déchets radioactifs en formation géologique profonde. Elle doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques* ». Ce même guide recommande que le milieu géologique soit choisi et l'installation de stockage conçue de telle sorte que la sûreté après fermeture soit assurée de façon passive sans qu'il soit nécessaire d'intervenir.

En s'appuyant sur les textes réglementaires nationaux incluant le guide de sûreté n° 1 émis par l'ASN (1), sur les standards internationaux en lien avec la sûreté après fermeture et sur le retour d'expérience acquis par l'Andra, un référentiel de sûreté après fermeture du stockage en formation géologique a été défini afin de présenter la démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture de l'installation nucléaire. Cette démarche s'inscrit dans un système itératif multidisciplinaire conception/connaissances scientifiques et technologiques/études de sûreté reconduit à chaque jalon du déploiement progressif de l'INB (cf. Volumes 1 et 10 du présent rapport). En conséquence, la présente déclinaison de l'évaluation de sûreté après fermeture présentée dans ce volume s'inscrit dans la continuité de celle présentée dans le « Dossier d'options de sûreté – Partie après-fermeture » (2).

Le présent volume 8 du présent rapport vise à présenter la démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture déclinée de l'ensemble des textes nationaux et internationaux et son application à l'installation de stockage de Cigéo.

L'objet du chapitre 1 du présent volume est donc de présenter un certain nombre de principes qui encadrent la démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture, incluant en cohérence avec le guide de l'ASN n° 1 (1) (i) les principes de sûreté et fonctions après fermeture du stockage, (ii) les objectifs de protection de la santé des personnes, et (iii) la méthode d'évaluation de la sûreté après fermeture du stockage. Il est ainsi présenté dans ce chapitre les objectifs de l'évaluation de la sûreté après fermeture selon trois aspects fondamentaux :

- la vérification du caractère favorable, pour la sûreté des performances des composants participants à la réalisation des fonctions de sûreté ;
- l'évaluation des perturbations apportées dans le système de stockage par les interactions entre les différents composants ;
- l'estimation des incidences sur la santé de l'homme pour un jeu de scénarios représentatifs des évolutions potentielles du système de stockage.

En déclinaison de la démarche, sont ensuite présentés respectivement aux chapitres 2 et 3 du présent volume, l'analyse des risques et incertitudes résiduelles de connaissances scientifiques et technologiques et ses conclusions aboutissant à la liste des scénarios de sûreté après fermeture retenue pour les évaluations quantitatives de performance et de sûreté. Selon la nomenclature et la classification retenues par l'Andra, cette liste comprend le scénario d'évolution normal et ses situations associées, les scénarios d'évolution altérée, les scénarios *What-if* et les scénarios d'intrusion humaine involontaires identifiés.

Le chapitre 4 du présent volume apporte ensuite les éléments de définition des biosphères par l'application d'une démarche spécifique exposée au chapitre 1 du présent volume.

Puis, les chapitres 5, 6 et 7 du présent volume présentent successivement la description et la conceptualisation du scénario d'évolution normale, les résultats des quantifications et les enseignements que l'on tire de ces résultats, notamment en regard des performances attendues de l'installation de

stockage et des objectifs de protection de la santé des personnes définis. Selon la même logique, les chapitres 8 et 9 du présent volume présentent successivement la description et la conceptualisation des scénarios d'évolution altérée et des scénarios qualifiés de *What-if*, les résultats de leur quantification et les enseignements que l'on tire de ces résultats. Le chapitre 10 du présent volume est dédié aux scénarios d'intrusion humaine involontaire. Chaque scénario retenu fait l'objet d'une description et conceptualisation, d'une présentation des résultats et des enseignements qui en sont tirés. Le chapitre 11 du présent volume est dédié aux études de sensibilité conduites en complément des scénarios. Enfin, le chapitre 12 du présent volume présente les enseignements de la démonstration de sûreté et, en lien, les composants et dispositions importants pour la protection à long terme.

1

La déclinaison de la démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture

1.1 Les objectifs et les principes guidant la sûreté après fermeture 14
1.2 La démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture du stockage 25
1.3 Les scénarios après-fermeture 30
1.4 L'apport de l'analyse des risques et incertitudes à l'identification et la définition des scénarios 43
1.5 Les évaluations quantitatives des scénarios et leurs enseignements 50

1.1 Les objectifs et les principes guidant la sûreté après fermeture

La démarche d'évaluation de la sûreté après-fermeture des stockages de déchets radioactifs s'appuie sur les textes réglementaires nationaux et standards internationaux en lien avec la sûreté, et plus particulièrement le « Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde » (1) qui émet un certain nombre de recommandations (cf. Chapitre 2 du volume 2 du présent rapport). La démarche développée par l'Andra pour l'évaluation de la sûreté après fermeture se réfère également aux standards de sûreté de l'AIEA en particulier le SSR-5 (3) et le SSG-14 (4), le *Safety Reference Levels* (SRL) de Wenra de 2014 (5) et les brochures de l'OCDE comme INTESC, MeSA (6) et les conclusions du *Workshop* scénario de 2015 (7). Elle intègre également le retour d'expérience accumulé lors des itérations de sûreté menées depuis 1991 (cf. Volume 1 du présent rapport) et les pratiques déjà mises en place sur les centres).

Le guide de sûreté n° 1 émis par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en 2008 (1) fixe un certain nombre de principes qui encadrent la démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture :

- l'objectif fondamental de protection de la santé des personnes et de l'environnement ;
- les principes et fonctions de sûreté relatifs au stockage en formation géologique ;
- les attendus de la démonstration de la sûreté après fermeture de l'installation souterraine de stockage.

Les principales recommandations de ce guide et qui ont guidé la démarche sont rappelées pour mémoire dans les chapitres suivants.

1.1.1 L'objectif fondamental de protection à long terme après fermeture de l'installation souterraine

1.1.1.1 L'objectif fondamental de protection à long terme après fermeture de l'installation souterraine

LE GUIDE DE SÛRETÉ N° 1 DE L'ASN FIXE L'OBJECTIF FONDAMENTAL DU STOCKAGE EN FORMATION GÉOLOGIQUE.

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

Ce principe répond aux exigences du code de l'environnement qui demande que : « *la gestion durable des matières et des déchets radioactifs de toute nature, résultant notamment de l'exploitation ou du démantèlement d'installations utilisant des sources ou des matières radioactives, est assurée dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement. La recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sont entreprises afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures* » (article L. 542-1 du code de l'environnement).

1.1.1.1.1 Les objectifs de protection de la santé des personnes envers la dissémination potentielle de radionucléides

LE GUIDE DE SÛRETÉ DE L'ASN N° 1 FIXE LES OBJECTIFS DE PROTECTION ENVERS LA DISSÉMINATION POTENTIELLE DE RADIONUCLÉIDES

Le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) indique que « *La présentation des résultats devra permettre d'apprécier l'impact radiologique du stockage pour les différentes situations étudiées et les incertitudes associées* ».

Ce même guide de sûreté de l'ASN fixe les critères de radioprotection à retenir pour l'évaluation de la sûreté après fermeture :

- « *Pour la situation de référence après la fermeture de l'installation de stockage, les doses efficaces individuelles calculées ne devront pas excéder la valeur de 0,25 mSv/an pour des expositions prolongées liées à des événements certains très probables* »[1] ;
- concernant les situations altérées, le guide indique que : « *les expositions individuelles doivent être maintenues suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes* ».

Le guide précise également « …*Hormis la comparaison des doses individuelles efficaces calculées aux valeurs indiquées, qu'il s'agisse de la situation de référence ou des situations altérées, l'appréciation du caractère acceptable de l'impact radiologique du stockage résulte avant tout de l'analyse des efforts faits par le concepteur du stockage pour que les expositions individuelles soient aussi faibles que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux* ».

L'approche pour évaluer les risques sanitaires associés aux radionucléides présents dans le stockage s'appuie sur la réglementation française, en particulier le code de la santé publique, mais elle se réfère également au guide de sûreté n° 1 de l'ASN et aux textes en vigueur de la Commission Internationale de protection radiologique (CIPR) pour les questions relatives à la protection radiologique (notamment les CIPR 101 (9), CIPR 103 (10), CIPR 122 (11)).

Pour vérifier le respect des objectifs de protection envers la dissémination de radionucléides, l'Andra retient la dose totale annuelle qui serait reçue par une personne qui ferait usage d'une eau potentiellement contaminée aux exutoires retenus. La dose calculée à long terme reste toutefois un indicateur de l'incidence potentielle sur la santé des personnes mais ne constitue pas une valeur prédictive comme le précise les CIPR.

Concernant l'INB Cigéo, ces évaluations sont conduites sur des échelles de temps longues, de l'ordre du million d'années. Aussi, après-fermeture et pour le long terme, le guide de sûreté n° 1 de l'ASN ajoute que les évaluations des expositions individuelles étant fondées sur une modélisation, la stabilité (qui englobe une évolution limitée et prévisible) du milieu géologique devant, selon les critères du sous chapitre 4.3 du présent volume, être démontrée *pour une période d'au moins 10 000 ans, la valeur des résultats des prévisions portant sur cette période devrait pouvoir être attestée de façon objective, notamment sur la base d'études d'incertitudes explicites… Au-delà de cette période, les incertitudes sur l'évolution de l'environnement du système de stockage augmentent progressivement. Des estimations quantifiées majorantes des expositions individuelles, devront néanmoins être faites, éventuellement complétées par des appréciations qualitatives des résultats de ces estimations compte-tenu des facteurs d'évolution du milieu géologique, de façon à vérifier que le relâchement des radionucléides ne conduit pas à des doses inacceptables. Lors de cette vérification, la valeur de 0,25 mSv.an^{-1} précédemment citée est conservée comme référence.*

[1] Tel qu'indiqué dans l'ex RFS.III.2.f du 10 juin 1991 (8), cette valeur correspond *à une fraction de la limite annuelle d'exposition du public en situation normale.*

Concernant les situations altérées, le guide indique que les expositions individuelles doivent être maintenues suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

Le guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 précise que cette appréciation doit également prendre en compte « le degré de conservatisme des hypothèses de l'évaluation et au regard de l'analyse des efforts sur la conception du stockage pour que les expositions individuelles soient aussi faibles que raisonnablement possibles, compte tenu des facteurs économiques et sociaux » tel qu'indiqué par le guide.

Objectifs de protection

Les incidences sur la santé humaine sur le long terme après fermeture s'apprécient par l'évaluation de la dose totale annuelle qui serait reçue par une personne qui ferait usage d'une eau potentiellement contaminée aux exutoires retenus.

L'évaluation de la protection des personnes s'appuie d'une part sur le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) en tenant compte de la classification des scénarios, du caractère chronique ou ponctuel des expositions et d'autre part la réglementation française, en particulier du code de la santé publique. La vérification des objectifs de protection retient ainsi :

- pour les expositions individuelles associées au scénario d'évolution normale sur les 10 000 premières années suivant la fermeture du stockage, la valeur de contrainte de dose de 0,25 mSv.an $^{-1}$ fournie par le guide, valeur qui correspond à une fraction de la limite de dose efficace annuelle reçue par une personne du public du fait d'installations d'activités nucléaires et fixée à 1 mSv.an^{-1} dans l'article R. 1333-11 du code de la santé publique[2] ;

  Au-delà de cette période, les incertitudes sur l'évolution de l'environnement du système de stockage augmentent progressivement et il est vérifié que le relâchement des radionucléides ne conduit pas à des doses inacceptables en évolution normale. Lors de cette vérification, l'Andra se réfère à la valeur de 0,25 mSv.an^{-1} précédemment citée comme valeur de référence ;
- pour les scénarios d'évolution altérée, l'Andra vérifie que les incidences sur l'homme restent à un niveau *très* inférieur aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes conformément au guide ;
- pour les scénarios *What-if* et d'intrusion humaine involontaire, l'Andra vérifie que les incidences restent à un niveau inférieur aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes. L'Andra retient la valeur de 100 mSv.an^{-1} comme pour le dossier d'option de sûreté[3].

1.1.1.1.2 Les objectifs de protection de la santé des personnes envers la dissémination potentielle de substances toxiques chimiques contenues dans les déchets

Le guide de sûreté n° 1 de l'ASN indique que la protection de la santé des personnes et de l'environnement doit être assurée envers les risques de dissémination des substances radioactives et de toxiques chimiques contenus dans les déchets.

Pour évaluer les incidences associées à ces substances, l'objectif est d'appliquer la réglementation française portant sur les substances chimiques, en l'occurrence le code de l'environnement. Néanmoins, la réglementation ne fixe pas d'objectif de protection permettant de caractériser l'acceptabilité du risque chimique tel que cela peut l'être pour le risque radiologique.

---

[2] Cf. Limite de dose pour le public (www.asn.fr) et code de la santé publique (JORF). La méthode de calcul des doses efficaces et équivalentes, ainsi que les méthodes utilisées pour estimer l'impact dosimétrique sur une population, sont définies par l'arrêté du 1er septembre 2003 (12).

[3] Cf. Niveaux de référence fournis par l'ASN (www.asn.fr).

L'Andra propose une approche incrémentale qui se décline en plusieurs étapes qui visent à étudier des indicateurs de protection qui permettent d'évaluer les inconvénients apportés par les substances chimiques présentes dans les déchets.

L'approche conduit, sur la base d'un inventaire en substances toxiques chimiques présentes dans les déchets, à évaluer le risque potentiel en comparant les concentrations en substances toxiques chimiques obtenues aux exutoires dans les différents compartiments « eau », « sol » et « air » aux valeurs de gestion NQE (Normes réglementaires de qualité environnementale) en vigueur.

Le cas échéant, si les NQE ne sont pas respectées, l'approche conduit à mener des évaluations quantitatives des risques sanitaires (EQRS) c'est-à-dire quantifier le niveau du risque au travers des indicateurs « Quotient de dangers » et « Excès de risque individuel » selon une démarche similaire à celle proposée par l'Inéris (13).

Cette approche s'applique au scénario d'évolution normale (SEN) et aux scénarios d'évolution altérée (SEA). À l'instar de ce qui est fait sur le plan radiologique, l'Andra retient pour les indicateurs QD et ERI, des valeurs différentes selon les scénarios :

- scénario d'évolution normale (SEN) :
  - ✓ objectif de protection : QD <1 et ERI <10^{-5} ;
- scénarios d'évolution altérée (SEA) :
  - ✓ indicateur de référence : QD <5 et ERI <10^{-4}.

1.1.2 Les principes et fonctions de sûreté relatifs au stockage en formation géologique

1.1.2.1 Les principes guidant la conception et l'évaluation de sûreté après fermeture

PRINCIPES DE SÛRETÉ DU GUIDE DE SÛRETÉ DE 2008 DE L'ASN

« Après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée. En conséquence, le milieu géologique est choisi et l'installation de stockage est conçue de telle sorte que sa sûreté après fermeture soit assurée de façon passive afin de protéger les personnes et l'environnement des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir. ».

À cet égard, le concept retenu pour le stockage devra permettre de maintenir l'impact radiologique au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre compte tenu de la connaissance scientifique acquise, de l'état des techniques, et des facteurs économiques et sociaux. « *La sûreté après la fermeture de l'installation de stockage géologique est un sujet essentiel qui doit guider la conception du système de stockage. L'impossibilité de prévoir des interventions à cette échéance conduit à prévoir des dispositions passives.* ».

Des principes de sûreté qui guident la conception notamment en répondant aux exigences de sûreté après fermeture et de sûreté d'exploitation.

Après la fermeture de l'installation de stockage géologique, la sûreté repose sur des dispositifs passifs sans besoin d'intervention. Le principe de défense en profondeur a pour effet de faire reposer la sûreté du stockage sur la complémentarité et la diversité des composants et sur un certain niveau de redondance des fonctions de sûreté de telle sorte que des défaillances plausibles de composants ne compromettent pas, à elles seules, la sûreté de l'installation.

La transposition du principe de défense en profondeur se traduit par :

- l'attribution aux composants naturels et ouvragés du système de stockage de fonctions de sûreté complémentaires. Le site et en particulier la roche hôte sont choisis pour leurs caractéristiques favorables ; la conception vise la préservation des caractéristiques de la roche hôte ;
- des activités de surveillance qui sont mises en place dès la construction puis pendant l'exploitation nucléaire pour le suivi des composants naturels et ouvragés assurant des fonctions de sûreté après fermeture ;
- des scénarios définis (en considérant la défaillance de composants) et évalués (performance des composants et incidences des quelques radionucléides et toxiques chimiques susceptibles d'atteindre l'homme et l'environnement) pour tester la robustesse du système de stockage dans son ensemble et l'apport de chaque composant.

La sûreté de l'installation de stockage doit être assurée de manière « *passive* », c'est-à-dire que la santé des personnes et l'environnement sont protégés des effets des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir.

En cohérence avec les éléments du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) :

- le milieu géologique est choisi et l'installation de stockage est conçue de telle sorte que sa sûreté après fermeture soit assurée de façon passive afin de protéger les personnes et l'environnement des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir ;
- ils doivent permettre une protection sur de longues échelles de temps, en lien avec la dangerosité des déchets présents dans le stockage et en lien avec l'évolution du stockage.

1.1.2.2 Des fonctions de sûreté après fermeture déclinées de l'objectif fondamental de protection de la santé des personnes et de l'environnement

Afin de répondre à l'objectif fondamental de protection des personnes et l'environnement envers les risques liés à la dissémination des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets, l'Andra décline cet objectif en deux grandes fonctions fondamentales après fermeture (cf. Volume 2 du présent rapport) :

- *« Isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines banales »* ;

Et

- *« Limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère ».*

Pour mémoire, le système de stockage après fermeture comprend la roche hôte, la couche du Callovo-Oxfordien, et des composants ouvragés complémentaires, les colis de stockage des déchets et les ouvrages souterrains remblayés et scellés (cf. Figure 1-1).

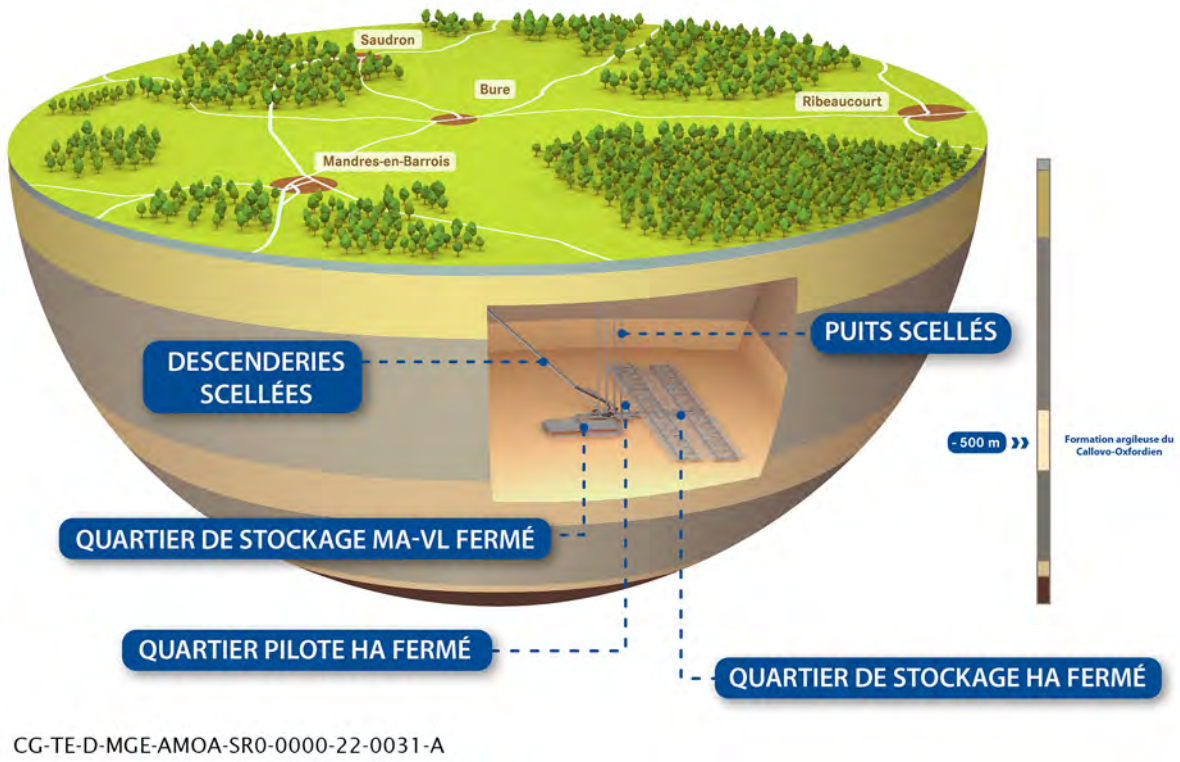


Figure 1-1 Illustration du système de stockage après fermeture

L'Andra organise comme suit les fonctions de sûreté du système de stockage en après fermeture.

1.1.2.2.1 La fonction fondamentale « Isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines banales »

En cohérence avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (1), par cette fonction, il est attendu que le site et la profondeur d'implantation retenus :

- préservent le stockage des phénomènes de surface et de l'érosion (qui affectent une épaisseur de terrain inférieure à 200 mètres à l'échelle de centaines de milliers d'années). La solution technique retenue d'implanter l'installation de stockage à environ 500 mètres de profondeur permet de ne pas considérer l'éventualité d'une érosion du stockage ;
- protègent le stockage des activités humaines banales[4], c'est-à-dire de faible profondeur. Par ailleurs, la mémoire du stockage sera maintenue le plus longtemps possible (cf. Volume 6 du présent rapport), *a minima* 500 ans, selon le guide de sûreté ce qui permet de ne pas considérer une intrusion humaine involontaire avant 500 ans.

1.1.2.2.2 La fonction fondamentale « Limiter le transfert jusqu'à la biosphère des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets »

Après fermeture, l'objectif de la conception ne peut être de garantir un confinement complet des radionucléides et substances toxiques chimiques dans le système de stockage sans limitation de durée. Cette deuxième fonction fondamentale vise à retenir les radionucléides et les substances toxiques chimiques au plus près de la source et limiter le transfert des quelques éléments relâchés hors des alvéoles de stockage vers la biosphère.

[4] On entend par activité humaine banale, les activités de terrassement de chantier routier ou de construction de résidence par exemple, activités qui restent très limitées en termes de profondeur.

Cela conduit à maîtriser la dégradation physico-chimique des déchets, des colis et des autres composants ouvragés puis de maîtriser les transferts qui peuvent conduire à long terme les radionucléides et substances toxiques chimiques jusqu'à la biosphère, à savoir :

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

Sur le long terme après fermeture du stockage, l'eau est le principal facteur d'altération des colis de déchets et le principal vecteur de transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques. La maîtrise de la voie aqueuse constitue donc un objectif essentiel de la sûreté après la fermeture définitive de l'installation. Elle se décline par les (sous)fonctions suivantes :

- « S'opposer à la circulation d'eau » ;
- « Limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, et les immobiliser dans les alvéoles de stockage » ;
- « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques qui auraient été relâchées hors des colis puis des alvéoles de stockage ».

Ces (sous)fonctions de sûreté s'appuient en premier lieu sur les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Volume 4 du présent rapport). Si la formation du Callovo-Oxfordien joue un rôle central dans la sûreté sur le long terme, les colis et les composants ouvragés du système de stockage, plus particulièrement l'architecture à terminaison de l'installation souterraine et les ouvrages de fermeture par scellement, contribuent aussi à limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques vers la biosphère. Ainsi, les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien et les dispositions de conception induisent des temps de transfert longs, supérieurs aux périodes radioactives de la plupart des radionucléides.

Afin de garantir la réalisation des trois (sous)fonctions précédentes et l'atteinte des performances envisagées, la conception du centre de stockage Cigéo (architecture, composants ouvragés) et son exploitation visent à : *« Préserver les caractéristiques favorables des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés impliqués dans la réalisation des fonctions de sûreté après fermeture »*.

a) Déclinaison de la (sous)fonction « S'opposer à la circulation d'eau »

Cette fonction renvoie à la limitation des flux d'eau au sein du système de stockage. Pour traduire ces objectifs, la (sous)fonction « S'opposer à la circulation de l'eau » est elle-même déclinée en trois (sous) fonctions :

- limiter les flux d'eau provenant des formations sus-jacentes à la couche du Callovo-Oxfordien (en période transitoire de resaturation) ;
- limiter le flux d'eau circulant *via* les liaisons surface-fond entre le stockage et les formations aquifères sus-jacentes ;
- limiter les vitesses de circulation de cette eau depuis les alvéoles, dans la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'au toit et au mur de la formation, et dans les liaisons surface-fond.

Après resaturation des ouvrages souterrains, on cherche à favoriser un transfert lent des radionucléides et des substances toxiques chimiques par diffusion dans le stockage et dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien. La couche du Callovo-Oxfordien qui a été choisie notamment pour sa faible perméabilité, et les principes généraux de choix de de conception de l'installation souterraine et des ouvrages de fermeture par scellements (des liaisons surface-fond et des galeries) contribuent à s'opposer à la circulation de l'eau dans le système de stockage et ainsi limiter le transfert des solutés dans l'eau.

b) Déclinaison de la (sous)fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, et les immobiliser dans les alvéoles »

Cette fonction vise à limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, et les immobiliser au plus près de la source dans l'alvéole de stockage. Elle s'organise selon deux aspects : (i) maîtriser la dégradation physico-chimique des déchets et (ii) favoriser les processus d'immobilisation des éléments relâchés dans l'alvéole de stockage. Elle se décline comme suit :

- *protéger les déchets de l'eau*. Par cette fonction, on cherche à mettre à profit autant que possible les propriétés favorables de certains déchets. En effet, des déchets comme le verre nucléaire utilisé pour les déchets HA, sont conditionnés dans une matrice durable qui les isole de l'eau. Pour d'autres déchets, c'est la nature même du déchet dans lequel sont présents des radionucléides qui isole tout ou partie ces derniers de l'eau : il s'agit par exemple des déchets métalliques activés, notamment les coques des crayons des assemblages de combustibles usés après retraitement.

  Pour les déchets HA vitrifiés, cela passe par l'option d'un conteneur de stockage qui permet :
  - ✓ de retarder l'arrivée de l'eau sur les déchets et évite l'altération aqueuse en température (température supérieure à 50 °C pour les déchets vitrifiés du quartier pilote HA et à 70 °C pour les déchets vitrifiés du quartier de stockage HA) ;
  - ✓ de constituer un environnement physico-chimique favorable à la maîtrise du comportement des radionucléides et substances toxiques chimiques lorsqu'ils sont relâchés (température inférieure à 80 °C). Les alvéoles de stockage sont ainsi maintenus dans un domaine où le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques est maîtrisé (solubilité et rétention à l'interface solide/liquide) ;
- *limiter la mise en solution des radionucléides et des substances toxiques chimiques*. Par cette fonction, on cherche à constituer dans les alvéoles, un environnement physico-chimique où le comportement des radionucléides et substances toxiques chimiques est maîtrisé (solubilité et rétention à l'interface solide/liquide). Cela passe également par l'adoption d'un conteneur de stockage étanche retardant l'altération des déchets et des matrices de conditionnement pour les déchets HA, par une limitation de la température dans les alvéoles. Cela peut également conduire à éviter des conditions trop alcalines au voisinage des déchets HA vitrifiés mais et à les favoriser dans les alvéoles MA-VL ;
- *limiter la mobilité des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans l'alvéole de stockage*. La notion de mobilité renvoie au comportement des solutés dans les alvéoles de stockage. Par cette fonction, on cherche à favoriser les processus de précipitation de certains radionucléides et de certaines substances toxiques chimiques dans l'alvéole, au plus près des colis. Cela conduit à constituer dans les alvéoles un environnement physico-chimique favorable à une faible solubilité de ces éléments, notamment par :
  - ✓ un milieu réducteur dans l'alvéole, tamponné par les eaux porales du Callovo-Oxfordien, ce qui limite la solubilité d'un grand nombre de radionucléides, notamment les actinides, le technétium... ;
  - ✓ des conditions cimentaires (dans les alvéoles MA-VL) sont aussi favorables à une faible solubilité d'une grande majorité des radionucléides (par exemple le nickel, le cobalt, l'américium, le curium, le neptunium, le plutonium).

c) Déclinaison de la (sous)fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques » relâchés hors des alvéoles de stockage

Par cette fonction, on cherche à mobiliser préférentiellement la couche du Callovo-Oxfordien, comme voie de transfert privilégiée pour l'ensemble de ses caractéristiques favorables. Il s'agit de tirer profit des caractéristiques favorables de retard et d'atténuation de la migration des quelques radionucléides et substances toxiques chimiques qui auront été relâchés des alvéoles au sein de la couche du Callovo-Oxfordien. En effet, les caractéristiques intrinsèques de cette formation permettent de réduire l'impact de ces éléments en imposant des temps de transfert suffisamment long pour tirer profit de la décroissance radioactive au cours de la migration des radionucléides.

d) Déclinaison de la (sous)fonction « Préserver les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés impliqués dans la réalisation des fonctions de sûreté après-fermeture »

En cohérence avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1), les solutions techniques retenues visent ainsi à limiter les perturbations de diverses origines liées aux phases de construction et de fonctionnement, et aux évolutions futures du système de stockage sur le long terme (cf. Volume 7 du présent rapport).

Afin de limiter les conséquences de ces phénomènes, l'Andra a défini des dispositions de conception restrictives et constructives pour préserver une garde saine de Callovo-Oxfordien et limiter les transferts par la voie ouvrage. Sont pris en compte tous les « phénomènes/processus d'origine interne » qui sont liés aux perturbations ou transitoires d'origine mécanique, thermique, hydraulique, gaz, chimique, bactériologique et radiologique, et leurs éventuelles interactions. Sont également pris en compte les phénomènes d'origine externe comme l'évolution géodynamique du site.

L'Andra retient un ensemble de principes généraux de conception de l'installation de stockage qui intègrent notamment les caractéristiques favorables de la couche du Callovo Oxfordien retenue à cet effet (cf. Tableau 1.2 du volume 2 du présent rapport). Le cas échéant, les fonctions de sûreté sont déclinées en exigences de haut niveau qui guident la conception du stockage. Ainsi, par exemple, les ouvrages de fermeture sont définis pour être passants aux gaz pendant le transitoire hydraulique gaz.

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

La déclinaison de l'objectif fondamental de sûreté en fonctions de sûreté après fermeture

Afin de répondre à l'objectif fondamental de protection des personnes et l'environnement envers les risques liés à la dissémination de radionucléides et de substances toxiques chimiques contenus dans les déchets, l'Andra décline cet objectif en deux grandes fonctions fondamentales après fermeture et en fonctions de sûreté après-fermeture (cf. Figure 1-2 ci-dessous).

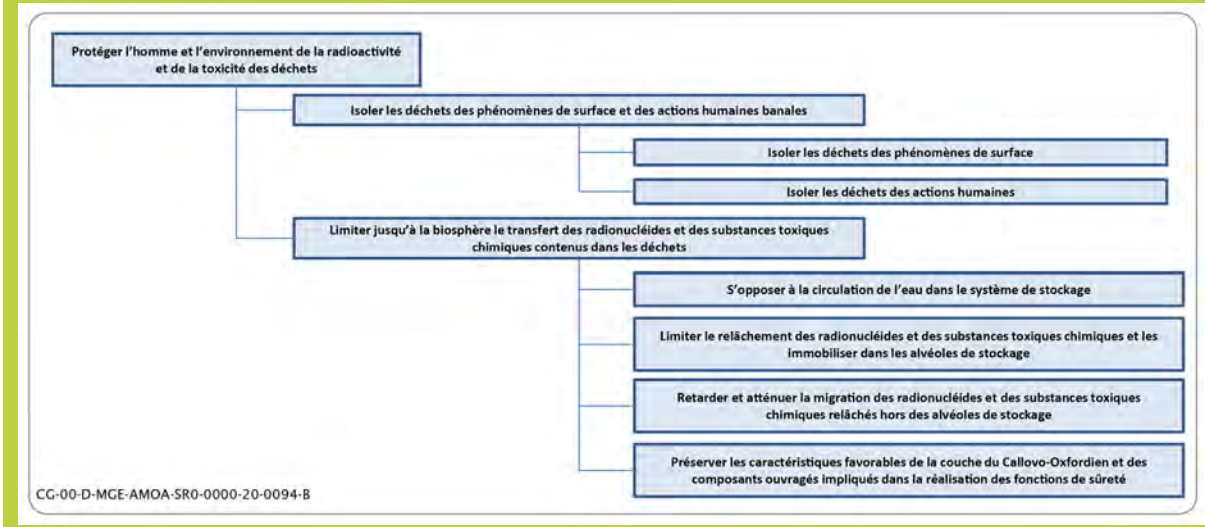


Figure 1-2 Déclinaison de l'objectif fondamental de sûreté en fonctions de sûreté après-fermeture

1.1.3 La démonstration de la sûreté après-fermeture de l'installation souterraine

SELON LE GUIDE DE SÛRETÉ N° 1 DE L'ASN, TROIS ASPECTS COMPLÉMENTAIRES SONT À CONSIDÉRER A CHAQUE ITÉRATION LORS D'UNE ÉVALUATION DE SÛRETÉ APRÈS FERMETURE :

- *la vérification du caractère favorable, pour la sûreté après fermeture, des performances des composants du système de stockage censés participer aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvragés, roche hôte), puis dans leur ensemble ;*
- *l'évaluation des perturbations apportées, dans le système de stockage, par les interactions entre ses différents composants et l'estimation des conséquences de ces perturbations sur la réalisation des fonctions de sûreté, compte tenu des dispositions préventives et palliatives retenues dans la conception du système pour minimiser les perturbations ou leurs effets ;*
- *la modélisation du comportement futur du système de stockage pour un jeu de scénarios représentatifs de la situation de référence et des situations altérées, ainsi que l'estimation des risques radiologiques et chimiques associés à chacun de ces scénarios.*

Après la fermeture définitive de l'installation, l'objectif fondamental de protection doit être respecté tel que défini par le cadre législatif français et les textes émis par l'Autorité de sûreté nucléaire.

La démarche d'évaluation de sûreté après fermeture définitive[5] du centre de stockage Cigéo, développée ci-après, s'appuie sur ces recommandations[6] et se fonde ainsi :

- sur la connaissance et l'analyse du comportement dans le temps des composants du système de stockage ainsi que des processus, événements et phénomènes qui se déroulent sur toutes les phases de vie du stockage ;
- sur un jeu de scénarios dont la quantification à l'aide d'indicateurs définis permet de vérifier le bon fonctionnement et la robustesse du stockage, et ainsi que l'objectif fondamental de protection de la santé des personnes et de l'environnement est respecté.

1.1.4 L'apport des pratiques internationales

L'Andra s'attache également à prendre en compte les références émises par les organismes tels que les standards de sûreté de l'AIEA, ce sont par exemple : les *Safety Reference Levels* (SRL) de Wenra, 2014 (5), et les brochures de l'OCDE. Par exemple, les options de sûreté retenues pour le centre de stockage Cigéo (2) répondent au principe établi par l'AIEA dans ses prescriptions de sûreté particulières SSR-5 (article 2.17 (3)).

L'Andra a participé à différents exercices organisés sous l'égide de la communauté européenne (PAMINA (15), de l'AIEA (BIOMASS (16), MODARIA II) et de l'OCDE/AEN (INTESC (17), AMIGO (18), MeSA (6), *Workshops* on scenarios), ce qui a permis de se comparer aux homologues à l'international et de vérifier que les approches étaient cohérentes. L'Andra suit ainsi particulièrement les réflexions internationales sur la notion de *Safety Case*. L'Andra se réfère également aux textes en vigueur de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) pour les questions relatives à la protection radiologique.

La définition et le développement des scénarios en après fermeture tiennent également compte des exercices internationaux dédiés. En particulier, le projet Européen PAMINA puis le projet MeSA conduit sous l'égide de l'AEN, ont permis de souligner les développements méthodologiques réalisés depuis quelques dizaines d'années. Par la suite, un workshop dédié spécifiquement aux pratiques internationales en matière de développement et de définition des scénarios après fermeture, a été tenu à Issy-les-Moulineaux du 1er au 3 juin 2015 sous l'égide de l'AEN (7). Les conclusions de ce workshop illustrent les développements méthodologiques conduits depuis 1999, date du premier workshop dédié à ce sujet (19) et ont permis de s'assurer que la démarche de définition des scénarios et la classification proposée par l'Andra étaient cohérentes avec les pratiques internationales récentes.

Ces développements sont généralement motivés par des objectifs de complétude de la liste des scénarios à considérer, de traçabilité des décisions et d'intégration logique et structurée des connaissances issues de diverses disciplines. Depuis les dernières décennies, ces développements méthodologiques ont notamment intégré les fonctions de sûreté et les incertitudes relatives aux caractéristiques, processus et événements (FEP's)[7] issues des connaissances scientifiques et technologiques dans leur démarche d'identification des scénarios. Cela implique l'analyse des effets de ces incertitudes sur les fonctions de sûreté. Ce type d'approche (incluant celle de l'Andra), permet en effet de challenger les fonctions de sûreté et les exigences associées et d'identifier des scénarios représentatifs de la diminution ou de la perte de la performance du ou des composants réalisant une fonction de sûreté. Elle diffère en cela de l'utilisation exclusive de FEP's comme base de développement de scénario. Les connaissances scientifiques et technologiques acquises (selon l'avancement du projet) sont valorisées et conduisent à la définition de scénarios selon une approche moins « *stylisée* » qu'auparavant.

---

[5] Que seule une loi peut autoriser.

[6] En annexe B à la lettre CODEP-DRC-2018-001635 (14), il est indiqué que « *les principes de la démarche de sûreté en exploitation et après fermeture, sont cohérents avec le guide de sûreté n° 1de l'ASN et les travaux d'instances internationale* »…« *pour la démarche de sûreté après fermeture du stockage, l'ensemble des scénarios correspondant à différentes situations envisageables à long terme, y compris d'éventuelles exploitations du sous-sol…les catégories de scénarios après fermeture, conformes au guide de sûreté n° 1 de l'ASN* ».

[7] FEP : *Features, Events and Processes* dans la littérature internationale.

L'utilisation des bases FEP's nationales ou internationales[8] n'est pas pour autant exclue, celles-ci sont en général utilisées pour vérifier l'exhaustivité des événements et processus pris en compte.

L'apport des pratiques internationales

La démarche développée par l'Andra et mise en œuvre pour le centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 1.2 du présent volume) est cohérente avec les standards et les pratiques internationales, en particulier à l'article DI-36 du document établi par Wenra en décembre 2014 (5) qui indique : « *The licensee shall design the disposal facility giving due consideration to both normal evolution of the disposal system after closure and scenarios involving events and processes that might disturb the normal evolution of the disposal system* ».

La participation de l'Andra à des exercices internationaux depuis les années 1990 a permis non seulement de se comparer régulièrement à ses homologues mais également d'asseoir sa démarche d'évaluation de sûreté après fermeture et de s'assurer que sa mise en œuvre est cohérente avec les bonnes pratiques et référentiels internationaux.

En particulier, les conclusions du workshop tenu à Issy-les-Moulineaux du 1er au 3 juin 2015 sous l'égide de l'AEN (7) illustrant les développements méthodologiques conduits en termes de définitions et classification des scénarios après fermeture, ont permis de s'assurer que la démarche de définition des scénarios proposée par l'Andra était cohérente avec les pratiques internationales récentes.

1.2 La démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture du stockage

En cohérence avec les objectifs présentés au chapitre 1, la démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture mise en œuvre par l'Andra vise à vérifier que l'objectif fondamental de protection de l'homme et de l'environnement est assuré, et ce de manière passive, sans intervention de l'homme.

En cohérence avec le guide de sûreté et les pratiques internationales, c'est par le développement de scénarios, leur quantification et les enseignements que l'on peut tirer des résultats que sont vérifiés d'une part le bon fonctionnement du système de stockage tel que conçu et d'autre part les objectifs de protection définis. L'identification, la catégorisation et la définition des scénarios constitue ainsi la base fondamentale pour les évaluations quantitatives de la performance des dispositions mises en place vis-à-vis de la protection de l'homme et l'environnement.

En se fondant sur les recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1), la stratégie de sûreté consiste ainsi :

- à analyser les risques potentiels qui entraineraient la non-satisfaction des fonctions de sûreté en lien avec, d'une part, l'état de la connaissance au moment de l'analyse et donc des incertitudes résiduelles associées et, d'autre part, les dispositions de conception retenues ;

  Pour ce faire, elle tire parti de l'analyse du comportement dans le temps de l'ensemble des composants de l'installation souterraine après sa fermeture tel que décrit au vu de l'état des connaissances scientifiques et technologiques. Cet état de connaissance considère les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien, des dispositions d'architecture du stockage retenues, ainsi que les composants ouvragés que sont les colis de stockage et les scellements. Tous les processus, événements et phénomènes qui se déroulent sur toutes les phases de vie du stockage sont intégrés (cf. Volume 7 du présent rapport) ;
- à proposer des mesures d'évitement et de réduction de ces risques et incertitudes (par des solutions techniques de conception) ;

[8] La base FEP's internationales de l'AEN est maintenant accessible sur le site de l'OCDE (www.aen.org).

- à proposer une gestion des risques et incertitudes résiduels dans le cadre de scénarios par des choix d'hypothèses de représentation permettant d'intégrer ces risques et incertitudes ;
- et à proposer à l'issue de cette analyse, un jeu de scénarios dont la quantification à l'aide d'indicateurs définis permet de mesurer l'incidence de ces risques et incertitudes résiduelles sur la performance et la robustesse du stockage. Elle permettra ainsi de vérifier d'une part le bon fonctionnement du stockage par les dispositions mises en œuvre et d'autre part que l'objectif fondamental de protection de la santé des personnes et de l'environnement est respecté.

En pratique, la mise en œuvre de cette stratégie se traduit dans la démarche d'évaluation de sûreté après fermeture définitive[9] du centre de stockage Cigéo, par les étapes suivantes (cf. Figure 1-3) :

- **l'identification et la définition de scénarios à quantifier pour l'évaluation de sûreté après fermeture** :

  L'identification et la définition des scénarios s'appuie sur une catégorisation et une nomenclature de scénarios spécifiques qui prend en compte l'évolution du système de stockage dans son ensemble sur le long terme (composants naturels et composants ouvragés) :
  - ✓ c'est par une analyse qualitative des risques et incertitudes que sont identifiés et définis les scénarios de sûreté après fermeture. En s'appuyant sur le socle de connaissances scientifique et technologique, cette analyse examine de manière qualitative les effets potentiels des risques et incertitudes associé(e)s aux processus et/ou phénomènes analysés. Elle propose une gestion des risques et incertitudes par des choix de conception ou d'hypothèses (représentation, modèles, données) à retenir dans les scénarios permettant d'intégrer l'incertitude dans l'évaluation de sûreté du stockage ;
  - ✓ à l'issue de l'analyse des risques et incertitudes, une liste de scénarios est proposée pour mener les évaluations quantitatives. Elle comprend le scénario d'évolution normale (et ses situations associées) et les scénarios de déviation de l'évolution attendue, soit des scénarios d'évolution altérée, *What-if* et d'intrusion humaine involontaire ;
  - ✓ sur la base de l'analyse et du socle de connaissances scientifiques et technologiques, chacun des scénarios retenus est ensuite défini par un choix d'hypothèses, de modèles et de valeurs de paramètres ;
- **l'évaluation quantitative des scénarios précédemment identifiés** :
  - ✓ sur la base de la description du scénario, une première étape dite de conceptualisation est menée pour représenter l'ensemble des différents compartiments (colis de stockage, ouvrages souterrains, couche du Callovo-Oxfordien et son environnement) et ce aux différentes échelles d'espaces à considérer ;
  - ✓ l'évaluation quantitative se fonde ensuite sur l'utilisation d'outils numériques capables de modéliser et de quantifier le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques par les colis, leur migration dans les ouvrages souterrains, dans la couche du Callovo-Oxfordien puis les formations encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires ;
- **l'analyse des résultats et la définition des enseignements** au regard des objectifs de protection des intérêts à long terme et au regard des performances du système de stockage et de sa robustesse. L'évaluation quantitative d'un jeu d'indicateurs permet :
  - ✓ de porter un jugement sur la performance et la robustesse d'ensemble du système de stockage et de vérifier que la sûreté après fermeture est toujours maîtrisée et ainsi que la protection de de la santé des personnes et de l'environnement est respectée ;
  - ✓ au travers notamment des scénarios de dysfonctionnement d'analyser les poids relatifs de certains composants ouvragés sur les fonctions de sûreté, et la sûreté globale du système de stockage.

Pour le centre de stockage Cigéo, l'évaluation de sûreté après fermeture a été reconduite selon cette approche globale au fur et à mesure du développement progressif du projet. Les itérations successives ont permis de consolider cette démarche d'évaluation de sûreté après fermeture sans la remettre en

[9] Que seule une loi peut autoriser.

cause (cf. Évaluation par les pairs sous l'égide de l'AEN sur la base du « Dossier 2005 » et évaluation par les pairs sous l'égide de l'AIEA (20) pour le Dossier d'options de sûreté du centre de stockage Cigéo (2, 21)). Elle a également fait l'objet d'une évaluation par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN)[10] (14) et son appui, l'IRSN (22, 23). Elle est donc reconduite pour le présent dossier de demande d'autorisation de création (DAC) du centre de stockage Cigéo.

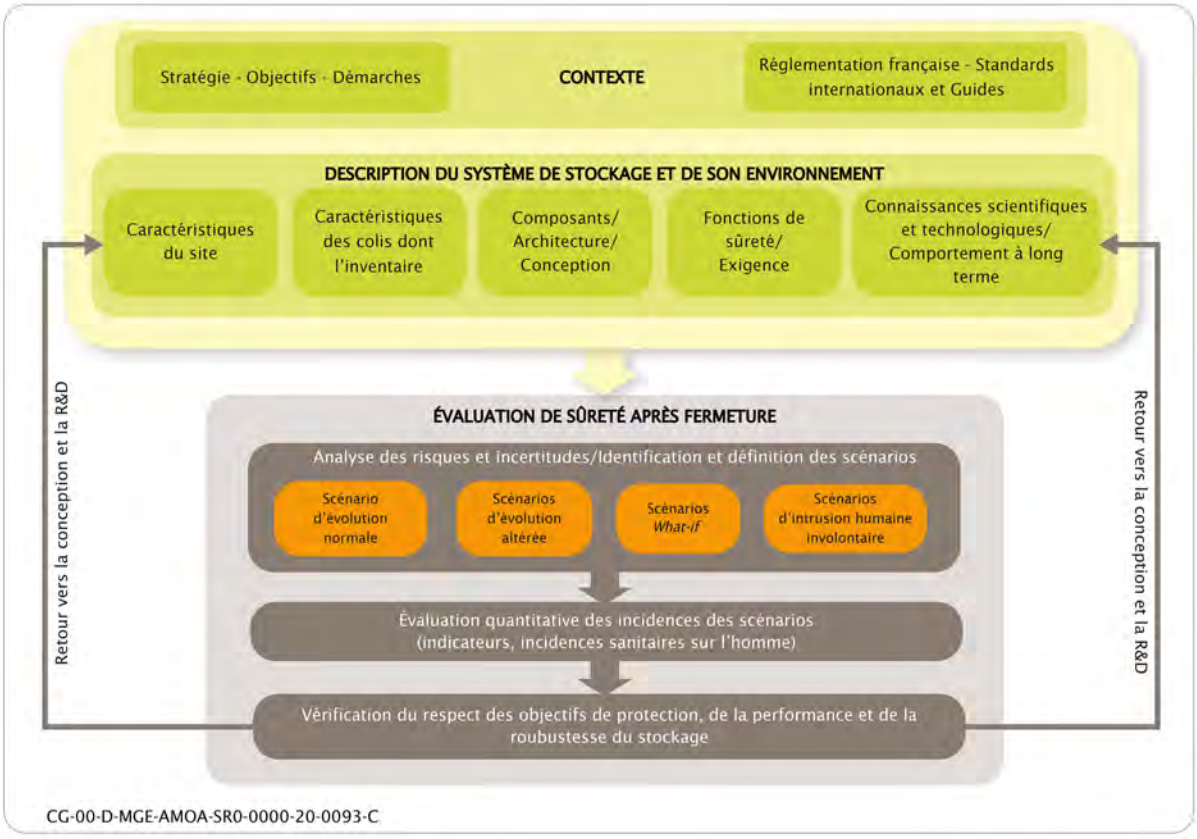


Figure 1-3 *Schéma illustrant l'approche itérative de la démarche d'évaluation de la sûreté après-fermeture*

L'Andra a ainsi structuré sa démarche d'évaluation de sûreté après fermeture sur une approche itérative et multidisciplinaire entre la conception (incluant la définition des fonctions de sûreté et exigences associées), les connaissances scientifiques et technologiques, et l'évaluation de la sûreté après fermeture.

La démarche de sûreté après-fermeture s'appuie, conformément au guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1), sur le principe de défense en profondeur tel que décrit dans le volume 2 du présent rapport. Ce principe de défense en profondeur se traduit par l'identification de fonctions de sûreté associées à la phase long terme après fermeture et la mise en place de dispositions de construction, d'exploitation et de fermeture de l'installation. Le principe de défense en profondeur est mis en œuvre dès la conception du centre de stockage Cigéo afin de lui garantir un niveau de sûreté conforme aux objectifs de protection fixés tout en minimisant les risques pour les populations et l'environnement.

La démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture mise en œuvre par l'Andra intègre ainsi un ensemble d'éléments clés dont la logique d'ensemble est schématisée en figure 1-3.

[10] Dans la lettre CODEP-DRC-2018-001635 de l'ASN, 2018, cette approche a été jugée satisfaisante (14).

Ce sont :

- la prise en compte du cadre réglementaire ainsi que les bonnes pratiques nationales et internationales de référence :
  - ✓ les textes réglementaires nationaux et internationaux incluant les guides et textes de décisions de l'ASN ;
  - ✓ les démarches et pratiques méthodologiques nationales et internationales ;
- la prise en compte des données d'entrée liées aux colis de déchets, au site et en particulier la formation dans laquelle est implantée le stockage et la conception du stockage et en particulier les exigences après fermeture. Cela inclut :
  - ✓ les données d'entrée relatives aux colis de déchets à stocker (inventaires, conditionnement, comportement dans le temps…) ;
  - ✓ les connaissances acquises sur le milieu géologique du site (caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes, modèle hydrogéologique) et son évolution dans le temps en tenant compte des événements externes (climat, évolution géodynamique par exemple) ;
  - ✓ les connaissances acquises sur l'environnement de surface (*i.e.* Biosphère) actuelle et les études relatives à son évolution potentielle en tenant compte des différents scénarios d'évolution climatiques ;
  - ✓ les fonctions de sûreté après fermeture et les exigences associées applicables au centre de stockage Cigéo ;
  - ✓ l'architecture illustrative à terminaison retenue pour le présent dossier de demande d'autorisation de création (DAC) qui intègre l'ensemble de l'inventaire à prendre en compte et les solutions techniques et technologiques pour la conception de l'installation souterraine ;
- la prise en compte des connaissances scientifiques et technologiques de l'installation souterraine de stockage et de son évolution sur le long terme :
  - ✓ le comportement physico-chimique des déchets dans le stockage, incluant notamment les modèles de relâchement des éléments présents dans les déchets ;
  - ✓ le comportement physico-chimique des différents composants ouvragés du système de stockage (caractéristiques intrinsèques) et de leur évolution dans le temps en tenant compte des interactions potentielles entre composants ;
  - ✓ les connaissances acquises sur l'évolution du système de stockage en prenant en compte d'une part des processus internes (Thermique, Hydraulique-Gaz, Mécanique, Chimique, Radiologique et Bactériologique (TH-G-M-C-R-B) dans le temps et l'espace, ainsi que du couplage de ces différents phénomènes incluant en particulier l'évaluation des perturbations apportées par l'installation de stockage sur la couche du Callovo-Oxfordien et d'autre part d'événements externes.

L'évaluation de la sûreté après fermeture

La démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture mise en œuvre par l'Andra vise à vérifier que l'objectif fondamental de protection de la santé des personnes et de l'environnement est atteint et que le système de stockage tel que conçu est performant.

La démarche d'évaluation de la sûreté après-fermeture mise en œuvre vise à :

- vérifier le caractère favorable, pour la sûreté après fermeture, des performances des composants du système de stockage participant aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvragés) puis dans leur ensemble ;
- évaluer les risques sanitaires associés aux radionucléides et substances toxiques chimiques présents dans les déchets et examiner leur conformité aux objectifs définis dans les textes en vigueur ;
- vérifier la robustesse du système de stockage en cas de dysfonctionnement d'un ou plusieurs composants participants à la réalisation des fonctions de sûreté (composants naturels ou composants ouvragés).

En cohérence avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1), et les pratiques internationales, l'identification, la catégorisation et la définition des scénarios constituent la base fondamentale pour les évaluations quantitatives de la performance des dispositions mises en place et en conséquence de la protection de l'homme et l'environnement.

Cette démarche s'organise selon plusieurs étapes clés :

- l'identification et la définition de scénarios de sûreté après fermeture, notamment par une analyse des risques et incertitudes résiduelles de connaissances scientifiques et technologiques ;
- l'évaluation quantitative des scénarios identifiés à l'aide d'indicateurs de performance et de critères d'incidence sanitaire sur l'homme ;
- l'analyse des résultats des évaluations quantitatives des scénarios qui permet de porter un jugement sur :
  - ✓ le caractère favorable des performances des composants et la robustesse du système de stockage. Elle permet également de vérifier les dispositions de conception prises pour gérer des incertitudes ;
  - ✓ le niveau de protection de l'installation par rapport aux critères de protection définis.

Les enseignements issus des évaluations peuvent conduire à un retour en vue des itérations de sûreté/conception/connaissances futures.

1.3 Les scénarios après-fermeture

LES RECOMMANDATIONS DU GUIDE DE SÛRETÉ N° 1 DE L'ASN

Le guide de sûreté n° 1 de l'ASN et les pratiques internationales présentée au chapitre 1.1.4 du présent volume considèrent que les scénarios après fermeture constituent une partie essentielle du développement d'un dossier de sûreté.

Le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) recommande, dans le cadre des évaluations de sûreté après fermeture, d'étudier les situations suivantes :

- une situation de référence correspondant à l'évolution prévisible de l'installation et du milieu géologique sous l'effet des événements certains ou très probables ;
- des situations dites altérées correspondant à l'occurrence d'événements incertains mais plausibles, soit naturels, soit liés à des actions humaines, qui se superposent à la situation de référence et peuvent conduire à une accélération de la migration de radionucléides et de substances toxiques chimiques entre les ouvrages de stockage et la biosphère.

Selon les définitions communément admises à l'international (6, 7, 15), les scénarios doivent décrire de manière simplifiée comment les radionucléides et les substances toxiques chimiques contenus dans les déchets vont éventuellement arriver jusqu'à l'homme et son environnement en tenant compte de l'ensemble des voies de transfert susceptibles d'être empruntées par ces éléments et de tous les composants qu'ils sont susceptibles de traverser, qu'ils soient ouvragés ou naturels, qu'ils aient ou non une fonction de sûreté.

Le *Workshop* scénario de 2015 (7) a montré une évolution vers une approche plus intégrée et multidisciplinaire qui se base d'une part sur la description de l'état initial du système de stockage et de son évolution sur le long terme avec les incertitudes associées et d'autre part sur les fonctions de sûreté en après fermeture. Cela comprend en particulier :

- la définition des fonctions de sûreté et les exigences associées en termes de performance des composants qui contribuent à la réalisation des fonctions de sûreté ;
- la description phénoménologique du système de stockage basée sur les connaissances scientifiques et technologiques acquises sur les processus internes au stockage (*e.g.* Thermique, Hydraulique, Gaz, Mécanique, Chimiques, Radiologiques et Bactériologiques) incluant leurs éventuelles interactions et les événements externes (évolutions climatique, géodynamique…) ;
- la considération de quatre classes génériques de scenarios : (i) *a scenario representative of the expected evolution of the repository, (ii) scenarios which include less probable but still remain plausible FEP's, (iii) scenarios developped regardless of the probability of the event e.g. to investigate or demonstrate system robustness, and (iv) scenarios addressing human intrusions.*

Il est communément admis que la description des scénarios tire parti du socle des connaissances scientifiques et technologiques acquises sur le milieu géologique du site retenu et sur les composants constituant l'installation souterraine de stockage en tenant compte de leur évolution sur le long terme et leurs potentielles interactions.

Description d'un scénario après fermeture

Les scénarios décrivent de manière simplifiée comment les radionucléides et, les substances toxiques chimiques, contenus dans les déchets vont éventuellement arriver jusqu'aux exutoires puis à l'homme et son environnement en tenant compte de l'ensemble des voies de transfert susceptibles d'être empruntées par ces éléments et de tous les composants qu'ils sont susceptibles de traverser, qu'ils soient ouvragés ou naturels, qu'ils aient ou non une fonction de sûreté.

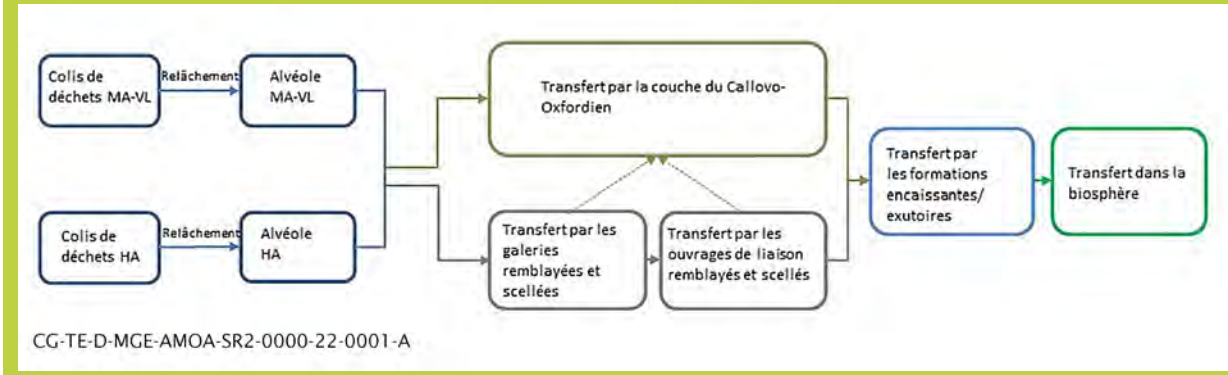


Figure 1-4 *Représentation schématique des composants et voies de transfert potentielles prises en compte pour la description des scénarios*

1.3.1 La classification et la nomenclature retenues pour les scénarios en après fermeture

La nomenclature et la classification des scénarios après-fermeture, retenues par l'Andra, correspondent aux classes de scénarios génériques ressortant d'une part des préconisations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) et d'autre part du partage à l'international lors du *Workshop* scénario de 2015 (7). Cette approche a conduit à retenir quatre classes de scénarios pour le « Dossier d'options de sûreté – Partie après-fermeture » (2). Cette classification est reconduite pour le présent dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'INB Cigéo[11].

Ce sont (cf. Figure 1-5) :

- **un scénario d'évolution normale (SEN).** Ce scénario vise à représenter le système de stockage tel qu'envisagé par le concepteur en considérant que toutes les fonctions de sûreté après fermeture sont réalisées. Ce scénario est défini sur la base des connaissances pour représenter l'évolution attendue (ou normale) sur le long terme du système de stockage en considérant des événements et processus « certains ou très probables » (ce qui renvoie aux recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1)) ;
- **des scénarios d'évolution altérée (SEA)** représentatifs d'événements ou processus jugés peu vraisemblables sur la base des connaissances acquises mais susceptibles d'entraîner la perte d'une fonction de sûreté ou d'une forte dégradation des performances des composants qui contribuent à sa réalisation. Se rangent dans cette catégorie, les scénarios de dysfonctionnement des composants contribuant aux fonctions de sûreté après fermeture identifiés par l'analyse des risques et incertitudes ;
- **des scénarios qualifiés de *What-if*[12]** qui reposent sur des événements et processus identifiés qualitativement très peu vraisemblables sur la base des connaissances scientifiques et technologiques acquises. Se rangent dans cette catégorie, les scénarios de dysfonctionnement des

[11] L'ASN, suite à l'instruction des options de sûreté du centre de stockage Cigéo, mentionne en ANNEXE B à la lettre CODEP-DRC-2018-001635 (14) de l'ASN, 2018, que « les catégories de scénarios après fermeture, sont conformes au guide de sûreté de l'ASN ».

[12] Terminologie anglaise signifiant « et si ».

composants ayant pour origine des événements ***postulés*** pour perdre une fonction de sûreté. Ces scénarios permettent notamment de « pousser » à l'extrême certains dysfonctionnements et de montrer la robustesse du système de stockage dans sa globalité ;

- **des scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI)**. Ils constituent une classe de scénarios spécifiques, ce qui est cohérent avec les pratiques internationales. Dans la zone d'implantation du stockage, se rangent dans cette catégorie les intrusions humaines involontaires[13] par forages qui se produisent par méconnaissance de l'existence de l'installation de stockage (le guide de sûreté n° 1 de l'ASN fixe la date d'oubli de l'existence du stockage à 500 ans (1)).

Parmi ces quatre classes de scénarios, la notion de *What-if* utilisée pour ce type de scénario dans le « Dossier d'options de sûreté - Partie après-fermeture » (2) repose sur le vocabulaire utilisé à l'international[14]. En effet, il ne figure pas de manière explicite dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1). L'approche étant jugée satisfaisante par l'Autorité de sûreté nucléaire, et par la *Peer Review Internationale* ayant instruit le dossier d'option de sûreté[15] (20), cette notion est reconduite pour le présent dossier de demande d'autorisation de création (DAC) du centre de stockage Cigéo.

Après fermeture, les études tiennent compte de l'évolution du stockage sur le long terme et de son caractère passif sans intervention de l'homme. Cela a conduit à adopter des nomenclatures différentiées des scénarios pour le long terme après-fermeture de l'installation de stockage, en intégrant la notion d'évolution du stockage et de son environnement, ce qui est cohérent avec la déclinaison du cadre législatif national incluant le guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (1) et les pratiques internationales.

L'ensemble des scénarios retenus à l'issue d'un processus d'analyses constitue la base des évaluations quantitatives qui permettront de vérifier :

- que le stockage satisfait aux objectifs de protection définis pour l'homme et l'environnement ;
- le caractère favorable pour la sûreté à long terme des performances des composants contribuant aux fonctions de sûreté ;
- la robustesse du stockage en s'assurant qu'en cas de perte d'une fonction de sûreté ou une forte dégradation de la performance d'un composant réalisant une fonction la sûreté du système de stockage est toujours assurée.

La description des scénarios tire parti du socle des connaissances scientifiques et technologiques acquises sur le milieu géologique du site et sur les composants constituant l'installation souterraine de stockage en tenant compte de leur évolution sur le long terme. Ils sont définis avec pour chacun d'eux un choix :

- d'hypothèses de représentation des composants et des voies de transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques vers la biosphère ;
- de modèles de comportement des composants, de perturbations et d'interactions entre eux ;
- de valeurs de paramètres dont le choix repose sur des modalités de sélection dans la gamme de valeurs définies par la connaissance.

---

[13] Pour mémoire, le stockage est isolé des intrusions humaines banales c'est-à-dire des activités de terrassement de chantier routier ou de construction de résidence par exemple, activités qui restent très limitées en termes de profondeur.

[14] Dans le document AIEA SSG-23 *relatif au safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste* (24), il est mentionné dans la recommandation R. 5-39 que les « *Scenarios are often not designed with the aim of illustrating the possible evolution of the disposal system and its surroundings, but rather in order to illustrate the properties of one or more of the natural or engineered barriers. For that purpose, it can be instructive to assign parameter values or other properties to the remaining parts of the barrier system such that the barrier under consideration is influenced in an exaggerated way. The aim is then to show conclusively that such exaggerated conditions do not hold true or that they can be avoided by design. By assuming such extreme conditions, the robustness of the various natural and engineered barriers can be more clearly exhibited. Scenarios of this sort are often called 'What if' scenarios to distinguish them from realistic scenarios* ».

[15] « *The IRT also appreciates the use of What-if scenarios, as this enables Andra to get a good understanding of the disposal facility system behaviour under extreme conditions and to illustrate the disposal system robustness* ».

L'analyse des résultats des évaluations quantitatives de ce jeu de scénarios permet de porter un jugement sur :

- le niveau de protection de l'installation par rapport aux critères de protection définis ;
- le caractère favorable des performances des composants et la robustesse du système de stockage.

Elle permet également de vérifier les dispositions de conception prises pour gérer des incertitudes.

Les enseignements issus des évaluations conduisent à un retour en vue des itérations de sûreté/conception/connaissances futures.

Les classes de scénarios retenues pour l'évaluation de la sûreté après fermeture

L'approche de définition des scénarios, ainsi que celle des classes et nomenclatures retenues, s'attachent à prendre en compte les recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (1) et les pratiques internationales en la matière.

Les classes et nomenclatures des scénarios retenues pour l'évaluation de sûreté après fermeture sont (cf. Figure 1-5) :

- le scénario d'évolution normale (SEN) ;
- les scénarios d'évolution altérée (SEA) ;
- les scénarios *What-if* ;
- les scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI).

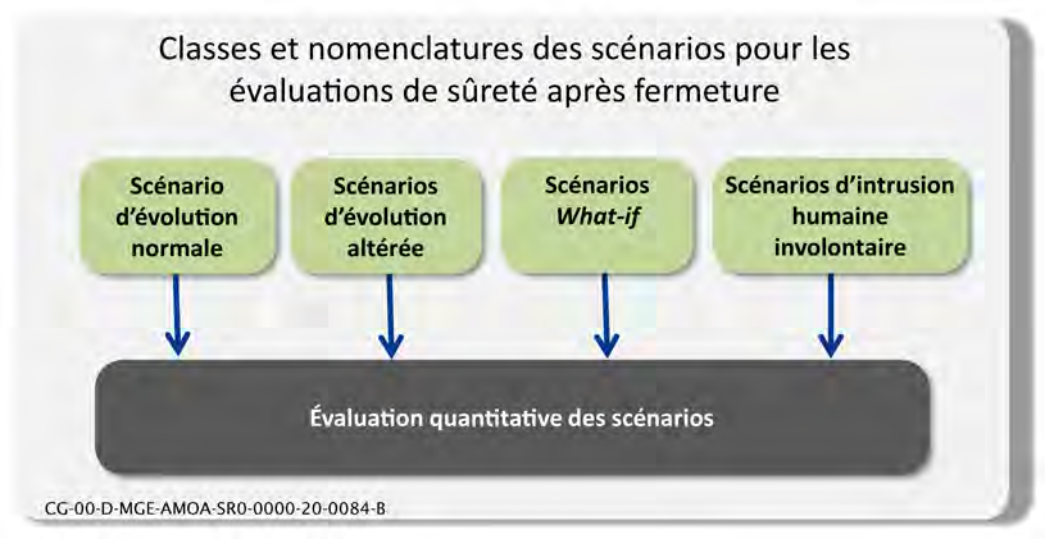


Figure 1-5 Illustration schématique des classes et nomenclatures des scénarios retenus pour l'évaluation de sûreté après fermeture

L'analyse des résultats des évaluations quantitatives du jeu de scénarios retenus des différentes classes permet de porter un jugement sur :

- le niveau de protection de l'installation par rapport aux critères de protection définis ;
- le caractère favorable des performances des composants et la robustesse du système de stockage.

Elle permet également de vérifier les dispositions de conception prises pour gérer des incertitudes.

1.3.2 Les objectifs et la définition des scénarios

1.3.2.1 Le scénario d'évolution normale

En cohérence avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (1), le scénario d'évolution normale (SEN) constitue le support permettant de vérifier en après fermeture que le système de stockage :

- fonctionne tel qu'il a été voulu par le concepteur notamment au travers des exigences applicables ou prescriptions techniques, en vérifiant que les fonctions de sûreté pour l'après fermeture sont réalisées à l'aide d'indicateurs appropriés (par exemple les débits molaires en sortie de composant, les bilans de masse en sortie des composants… (cf. Chapitre 1.5.1 du présent volume) ;
- satisfait aux exigences de sûreté visant à protéger l'homme et l'environnement et respecte ainsi les objectifs de protection définis (cf. Chapitre 1.5.2 du présent volume).

Les modalités de définition du scénario d'évolution normale répondent à la demande du guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 qui indique : « *une situation de référence correspondant à l'évolution prévisible de l'installation et du milieu géologique sous l'effet des événements certains ou très probables* » doit être définie dans le cadre des analyses de sûreté. En s'appuyant sur la connaissance acquise, le scénario d'évolution normale comprend ainsi les possibilités d'évolutions attendues du stockage dans le temps et dans l'espace depuis sa fermeture, en supposant que toutes les fonctions de sûreté définies sont satisfaites.

Le scénario d'évolution normale est décliné en situations dites « de référence » et « enveloppe » à l'instar de ce qui a été fait pour le « Dossier d'options de sûreté - Partie après-fermeture » (2). Cette approche, jugée satisfaisante lors de l'instruction de ce dossier (14), est reconduite.

Ces deux situations sont déclinées sur la base des choix de sûreté qui permettent de structurer les hypothèses de représentation du système de stockage en intégrant :

- les exigences de sûreté applicables au centre de stockage Cigéo pour l'après fermeture ;
- la gestion d'incertitudes résiduelles (de natures scientifique et/ou technologique) n'induisant pas de perte de fonctions de sûreté dans le scénario d'évolution normale.

L'approche tient ainsi compte du rôle des composants en regard de leur contribution ou non aux fonctions de sûreté et de leur nature (composants naturels ou ouvragés/manufacturés), seuls les composants ouvragés faisant l'objet d'exigences.

Une logique de sélection des hypothèses de représentation, des modèles et des paramètres a été établie pour chacune de ces situations (cf. Figure 1-6), elles sont donc traitées indépendamment. Cette logique de sélection est déclinée au chapitre 1.3.2.1.1 du présent volume pour la situation de référence et au chapitre 1.3.2.1.2 du présent volume pour la situation enveloppe.

À noter que si ces situations se distinguent par des choix structurants d'hypothèses et données, elles sont définies pour une même architecture de l'installation souterraine dite à terminaison[16], c'est-à-dire à la fin de la phase de fonctionnement et fermée définitivement.

La définition de ces situations au sein du scénario d'évolution normale s'accompagne d'études de sensibilité définies pour répondre à des objectifs précis tels que décrits dans le chapitre 1.5.3 du présent volume.

C'est par l'analyse des risques et incertitudes résiduelles qui découlent des connaissances scientifiques[17] et technologiques ainsi que des dispositions de conception et exigences associées, que sont définies les hypothèses de performances, les modèles et les valeurs de paramètres à retenir pour l'évaluation quantitative des scénarios (cf. Chapitre 1.3.2.1 du présent volume).

---

[16] Architecture illustrative comprenant tous les colis de stockage de l'inventaire de référence à la fermeture du centre de stockage Cigéo.

[17] Qui s'appuient notamment sur les documents du socle de connaissance (25).

Les enseignements à tirer des résultats des évaluations quantitatives de ces deux situations du scénario d'évolution normal en regard de ses objectifs, reposent sur l'évaluation d'un ensemble d'indicateurs de performance permettant d'apprécier l'influence des choix de représentation des composants du système de stockage entre situations, en sus de l'indicateur de dose aux exutoires pour les radionucléides et des indicateurs associés aux substances toxiques chimiques (cf. Chapitre 1.5 du présent volume).

1.3.2.1.1 La situation de référence du scénario d'évolution normale

La situation de référence vise à représenter d'une part le système de stockage tel que conçu, et d'autre part son environnement, incluant les formations encaissantes, au regard de la connaissance acquise.

Sa définition repose sur un ensemble d'hypothèses et données dont la logique de sélection est de retenir celles qui sont le plus étayées scientifiquement dans la gamme de valeurs disponible. Cela conduit en s'appuyant sur le panel des connaissances scientifiques et technologiques acquises, à retenir des représentations de composants et/ou de processus avec des modèles et données qualifiées de « au meilleur de la connaissance ».

De manière pratique, en s'appuyant sur les modèles et gammes de valeurs de paramètres disponibles, reposant sur une analyse/expertise scientifique des données existantes, le choix peut porter :

- sur des modèles et/ou valeurs de paramètres qualifiés de référence ;
- ou le cas échéant, sur la valeur médiane lorsqu'une distribution statistique des valeurs existe.

Selon le niveau de connaissance acquis, la situation de référence du scénario d'évolution normale peut toutefois comporter des choix de représentation à l'aide d'hypothèses *conservatives*[18], voire *pénalisantes*[19] :

- si les connaissances acquises sur certains paramètres sont moins étayées, le choix peut porter sur des modèles ou des valeurs de paramètres « *conservatifs(ves* ». Cela conduit par exemple à sélectionner la valeur haute ou basse de la gamme disponible (en excluant les valeurs extrêmes sans signification physique) pour avoir des transferts de radionucléides et de substances toxiques chimiques par la couche du Callovo-Oxfordien (composant central pour la sûreté après-fermeture) majorés ;
- si les composants ne contribuent pas aux fonctions de sûreté, le choix peut conduire à ne pas représenter le composant ou à ne pas retenir de propriétés de transport ou de rétention ce qui est « *pénalisant* » au regard de la connaissance acquise et vis-à-vis des transferts des radionucléides et substances toxiques chimiques vers la biosphère.

1.3.2.1.2 La situation enveloppe du scénario d'évolution normale

Les principes sur lesquels repose la situation enveloppe sont les suivants (cf. Figure 1-6) :

- le choix des hypothèses et données correspondant aux exigences applicables à l'installation de stockage Cigéo pour l'après fermeture. Les valeurs assignées à ces exigences applicables sont retenues ;
- pour les composants ouvragés qui ne font pas l'objet d'exigences, et pour les composants naturels (la couche du Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes), des choix de sûreté *« conservatifs »* sont faits en s'appuyant sur la connaissance scientifique et technologique et des incertitudes résiduelles associées afin de majorer le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'à la biosphère. Elles visent toutefois à rester dans le domaine du physiquement possible[20].

---

[18] Conservatifs(ves) : on entend par la notion concervatifs(ves) des données ou valeurs prises dans la gamme haute ou basse de la gamme de valeurs disponibles pour majorer les transferts de radionucléides et substances toxiques chimiques vers la biosphère en excluant des valeurs extrêmes qui n'ont pas de réalité physique.

[19] Pénalisante : on entend par pénalisante(s) une donnée ou valeur extrême qui peut être choisie de manière arbitraire pour ne pas tenir compte par exemple de caractéristiques qui pourraient être favorables au retard ou l'atténuation des radionucléides et des substances toxiques chimiques.

[20] La situation qualifiée « d'enveloppe » vise à rester dans le domaine du physiquement possible en cohérence avec les principes de définition du scénario d'évolution normale. L'approche ne vise pas à retenir pour les évaluations

De manière pratique cela conduit à sélectionner parmi l'ensemble des données disponibles reposant sur une analyse/expertise scientifique des données existantes, les valeurs de paramètres, hautes ou basses, dans la gamme de valeurs disponible (en excluant les valeurs extrêmes qui n'ont pas de réalité physique).

Cette situation enveloppe qui majore le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'à la biosphère, comporte, à ce titre, un cumul de valeurs et d'hypothèses conservatives qui n'existeraient pas forcément de manière concomitante.

Comme pour la situation de référence, la situation enveloppe peut comporter des choix « *pénalisants* », c'est-à-dire ne pas tenir compte de caractéristiques qui pourraient être favorables au retard et à l'atténuation des radionucléides et des substances toxiques chimiques pour des composants ne contribuant pas aux fonctions de sûreté.

Cette situation enveloppe constitue de par le choix des hypothèses et données retenues pour la décrire la limite du domaine d'évolution normale du système de stockage et de son environnement. Cette « situation enveloppe » montre ainsi la robustesse du système de stockage en intégrant les incertitudes résiduelles et constitue ainsi une estimation conservative des impacts en situation d'évolution normale du stockage.

quantitatives des valeurs « extrêmes » non représentatives de la connaissance acquise pour les composants contribuant aux fonctions de sûreté et ne faisant pas l'objet d'exigences spécifiées.

Objectifs et définition du scénario d'évolution normale

Le scénario d'évolution normale (SEN) constitue le support permettant de vérifier en après fermeture que le stockage :

- satisfait aux exigences de sûreté visant à protéger l'homme et l'environnement et respecte ainsi les objectifs de protection définis ;
- fonctionne tel qu'il a été voulu par le concepteur notamment au travers des exigences applicables ou prescriptions techniques, en vérifiant que les fonctions de sûreté pour l'après fermeture sont réalisées à l'aide d'indicateurs appropriés.

Le scénario d'évolution normale est défini en tenant compte de l'état de l'art des connaissances scientifiques et techniques. Il est décliné en deux situations :

- la situation de référence qui est définie par un ensemble d'hypothèse et données dont la logique de sélection est de retenir les processus, modèles et paramètres qui sont le plus étayés scientifiquement. Cela se traduit par une représentation du stockage en considérant le meilleur des connaissances scientifiques et technologiques acquises pour un état saturé en eau ;
- la situation enveloppe du scénario d'évolution normale représente les mêmes composants et processus que dans la situation de référence mais repose sur :
  - ✓ les hypothèses et données correspondant aux exigences applicables à l'installation de stockage Cigéo en après fermeture ;
  - ✓ la gestion d'incertitudes résiduelles n'induisant pas la perte de fonctions de sûreté en absence d'exigences applicables. Elle intègre un ensemble d'hypothèse et données dont la logique de sélection est de retenir les processus, modèles et paramètres considérés comme « *conservatifs* » selon les connaissances scientifiques et technologiques acquises tout en restant dans le domaine du physiquement plausible.

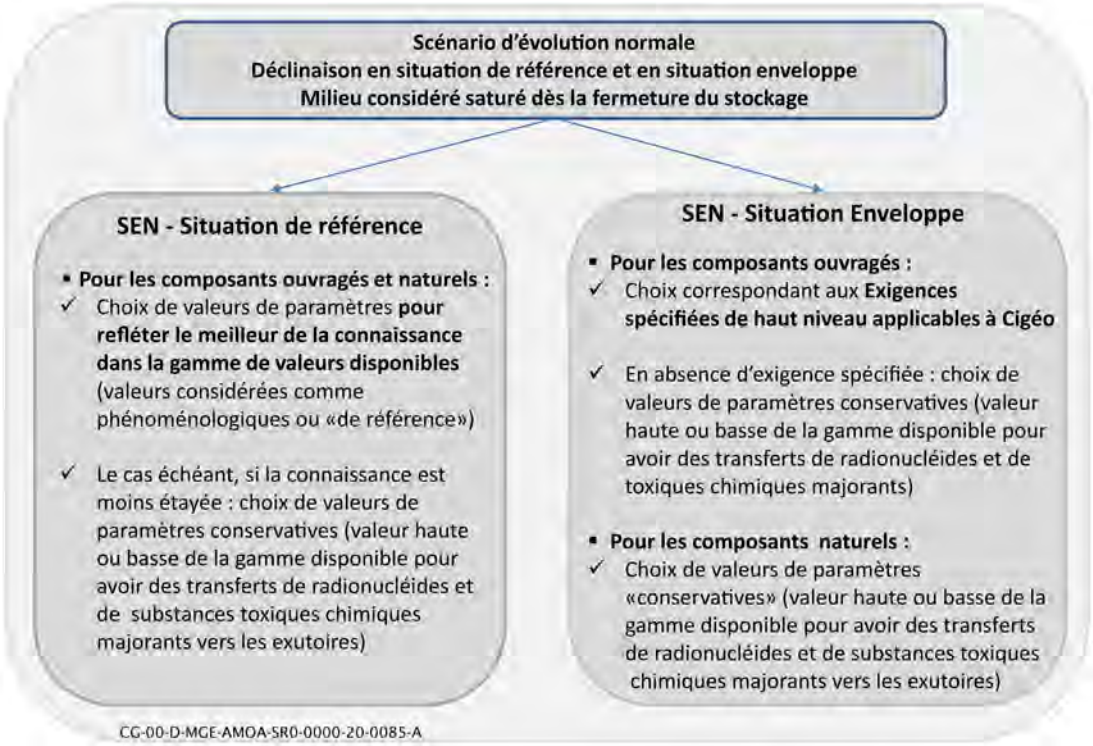


Figure 1-6 *Illustration schématique de la déclinaison du scénario d'évolution normale (SEN) en situation de référence et en situation enveloppe*

1.3.2.2 Les scénarios d'évolution altérée

Se rangent dans cette catégorie qualifiée de Scénarios d'évolution altérée (SEA), les scénarios de dysfonctionnement des composants contribuant aux fonctions de sûreté après fermeture « *…qui peuvent conduire à une accélération de la migration de substances radioactives entre les ouvrages de stockage et la biosphère* » (en cohérence avec le guide de sûreté n°1 de l'ASN de 2008 (1) qui indique dans son Annexe 2 : « *Par défaut d'un composant, il faut comprendre sa défaillance à exercer la ou les fonctions qui lui (sont) attribuées dans la situation de référence* »).

Ces scénarios permettent de vérifier que la sûreté et la protection de l'homme et l'environnement après fermeture restent assurées même en cas de dysfonctionnement majeur d'un composant contribuant à une fonction de sûreté (c'est-à-dire conduisant à la perte de la fonction de sûreté ou une très forte dégradation de ses performances en regard de celles définies dans les exigences spécifiées applicables à l'installation de stockage Cigéo).

Les scénarios de cette catégorie permettent d'évaluer les conséquences de la dérive dans le temps du système de stockage hors des limites du scénario d'évolution normale tel que défini et de vérifier sa robustesse du fait de l'ensemble de lignes de défense passives mises en œuvre[21].

Dans ce cadre, les enseignements à tirer des résultats des évaluations quantitatives de ces scénarios d'évolution altérée reposent :

- sur des indicateurs de performance, en particulier en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien, composant essentiel vis-à-vis de la sûreté après fermeture et qui doit constituer la voie dominante des transferts (cf. Chapitre 1.5 du présent volume) et en sortie des liaisons surface-fond ;

  Il s'agit alors de tester la robustesse du système en démontrant que malgré les choix de sûreté faits pour définir ce type de scénario, le système de stockage reste performant et qu'il existe des lignes de défense même en cas de dégradation ou perte d'une fonction de sûreté liée au dysfonctionnement d'un composant contribuant à sa réalisation ;
- sur les évaluations des incidences sur l'homme aux exutoires. Il s'agit de vérifier que les incidences sur la santé des personnes restent très inférieures aux effets déterministes (cf. Préconisations du guide de sûreté n°1 de l'ASN 2008 (1), chapitre 1.1.1.1.1 du présent volume[22]).

Les résultats des quantifications de ces scénarios d'évolution altérée par cette série d'indicateurs de performance permettent d'également évaluer le poids des composants du système de stockage dans son ensemble et de poser les bases pour définir les composants importants pour la sûreté après fermeture (cf. Volume 10 du présent rapport).

La démarche mise en œuvre par l'Andra pour identifier et décrire les scénarios d'évolution altérée repose sur l'analyse qualitative des risques et incertitudes (cf. Chapitre 1.4 du présent volume), et en particulier l'identification des causes potentielles de dysfonctionnement des composants contribuant à la réalisation des fonctions de sûreté.

Les exigences spécifiées applicables à l'installation de stockage vis-à-vis du long terme après fermeture constituent pour les composants ouvragés la limite au-delà de laquelle est jugée une perte partielle ou complète d'une fonction de sûreté par l'analyse des risques et incertitudes.

Les causes de dysfonctionnement identifiées conduisent à identifier un scénario d'évolution altérée lorsque qu'elles reposent sur des incertitudes jugées peu vraisemblables au regard des connaissances acquises ce qui est cohérent avec le guide de sûreté n°1 de l'ASN (1).

La ou les causes de dysfonctionnement identifiées d'un composant deviennent alors le corps du scénario d'évolution altérée à définir. Les choix structurants de représentation du dysfonctionnement des composants concernés reposent alors sur des modèles et paramètres « *pénalisants* » pour représenter les processus ou événements causant la défaillance.

---

[21] Le stockage une fois fermé définitivement ne devant pas dépendre de l'intervention de l'homme.

[22] Pour l'appréciation des évaluations de ces scénarios, le guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (1), fixe comme critère de radioprotection d'être « *suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.* ».

L'évaluation de la robustesse du système de stockage par des scénarios de dysfonctionnement de composants ouvragés s'appuie de manière générale sur les deux situations du SEN. Aussi, la représentation des autres composants, autres que ceux dysfonctionnants, est basée sur les paramètres de la situation de référence ou de la situation enveloppe du SEN, ce qui permet de mieux apprécier l'incidence de ces dysfonctionnements sur la robustesse du système de stockage.

Objectifs et définition des scénarios d'évolution altérée

L'objectif des scénarios d'évolution altérée est de tester la robustesse du système de stockage en s'assurant qu'en cas de perte ou dégradation d'une fonction de sûreté par dysfonctionnement d'un composant contribuant à sa réalisation, la sûreté du système de stockage sur le long terme est toujours assurée.

Se rangent dans cette catégorie, les scénarios de dysfonctionnement des composants contribuant aux fonctions de sûreté après fermeture dont la cause du dysfonctionnement est jugée peu vraisemblable au regard des connaissances scientifiques et technologiques acquises.

Il s'agit alors de tester la robustesse du système en démontrant que malgré les choix de sûreté faits pour définir ce type de scénario, le système de stockage reste performant et qu'il existe des lignes de défense même en cas de dégradation ou perte d'une fonction de sûreté liée au dysfonctionnement d'un composant contribuant à sa réalisation.

Concernant les évaluations des incidences sur l'homme aux exutoires, il s'agit de vérifier que les incidences sur la santé des personnes restent très inférieures aux effets déterministes (cf. Préconisations du guide de sûreté n° 1de l'ASN (1), chapitre 1.1.1.1.1 du présent volume).

Ces scénarios reposent sur une analyse des risques et des incertitudes résiduelles de connaissances scientifiques et technologiques (cf. Chapitre 1.4 du présent volume).

1.3.2.3 Les scénarios *What-if*

Pour mémoire, la notion de *What-if* qui repose sur le vocabulaire utilisé à l'international (et fréquemment au niveau national) ne figure pas de manière explicite dans le guide de sûreté n°1 de 2008 de l'ASN (1). L'Andra a néanmoins utilisé cette notion dans ses derniers dossiers de sûreté, en particulier dans le cadre du « Dossier d'options de sûreté – Partie après-fermeture » (2).

Ces scénarios qualifiés de *What-if* peuvent avoir deux origines :

- la première repose sur des événements et processus identifiés qualitativement très peu vraisemblables dans le cadre de l'analyse des risques et incertitudes sur la base des connaissances scientifiques et technologiques acquises. L'approche conduit ***à postuler*** que ces événements et processus constituent des causes de dysfonctionnement pour considérer la perte d'une ou plusieurs fonctions de sûreté ;
- la seconde renvoie à des scénarios qui peuvent être demandés par les évaluateurs (*e.g.* Autorité de sureté nucléaire). Sur le plan international, ils sont définis comme des scénarios « *requested by regulators* ». Dans ce cas, leur origine et leur définition peut faire l'objet d'une formalisation entre l'Andra et l'ASN (par exemple une demande de la part de l'ASN ou un engagement pris par l'Andra) à l'issue de l'instruction d'un dossier émis par l'Andra. Ils peuvent alors être considérés comme « conventionnels » entre l'ASN et l'Andra.

Quel que soit leur origine (analyse des risques et incertitudes, ou demande), la définition des scénarios *What-if* repose sur des événements *« postulés »* de manière arbitraire pour considérer la perte d'une ou plusieurs fonctions de sûreté. Les scénarios *What-if* définis intègrent, le cas échéant, des combinaisons et cumuls potentiels d'événements et/ou processus.

Ces scénarios conduisent également à vérifier que la sûreté après fermeture est toujours maîtrisée même en cas de dysfonctionnement postulé d'un composant contribuant à une fonction de sûreté. Dans ce cadre, les enseignements à tirer de ces scénarios *What-if* reposent comme pour les SEA :

- sur des indicateurs de performance, en particulier en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien voie dominante des transferts (cf. Chapitre 1.5 du présent volume) et en sortie des liaisons surface-fond.

  Il s'agit alors de tester la robustesse du système en démontrant que malgré les choix de sûreté faits pour définir ce type de scénario (postuler des événements très peu vraisemblables), le système de stockage reste performant et qu'il existe des lignes de défense même en cas de perte d'une fonction de sûreté liée au dysfonctionnement *postulé* d'un composant contribuant à sa réalisation ;
- sur les évaluations des incidences sur l'homme aux exutoires.

  L'évaluation des incidences sur l'homme aux exutoires n'est pas systématique pour ce type de scénario. En effet, lorsque les indicateurs de performance, en particulier le débit molaire des radionucléides et des substances toxiques chimiques en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien et des liaisons surface-fond sont identiques ou très proches de ceux obtenus pour le scénario d'évolution normale, l'évaluation de la dose aux exutoires n'est pas de nouveau quantifiée. Si les incidences sur l'homme de scénarios *What-if*, sont évaluées, l'Andra retient pour l'appréciation des résultats la recommandation du guide de sûreté n°1 de l'ASN de 2008, d'être « *suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.* ».

La démarche mise en œuvre par l'Andra pour identifier et décrire les scénarios *What-if* repose sur une analyse qualitative des risques et des incertitudes résiduelles sur les connaissances scientifiques et technologiques (cf. Chapitre 1.4 du présent volume) qui au regard des fonctions de sûreté et les exigences associées permet d'identifier des causes potentielles de dysfonctionnement des composants.

Comme pour les SEA, les exigences spécifiées constituent pour les composants ouvragés, la limite au-delà de laquelle est jugée une perte partielle ou complète d'une fonction de sûreté par l'analyse des risques et incertitudes. Les scénarios *What-if* se distinguent des SEA lorsque les causes de dysfonctionnement identifiées reposent sur des risques ou incertitudes jugé(e)s très peu vraisemblables au regard des connaissances scientifiques et technologiques acquises et qu'ils ou elles deviennent des événements postulés pour définir le scénario.

De manière similaire au développement des scénarios d'évolution altérée, la ou les causes de dysfonctionnement postulées deviennent alors le corps du scénario *What-if* à définir. Les choix structurants de représentation du dysfonctionnement des composants reposent alors sur des modèles et paramètres « *pénalisants* » pour représenter les processus ou événements postulés.

Comme pour les scénarios d'évolution altérée, l'évaluation de la robustesse du système de stockage par des scénarios de dysfonctionnement de composants ouvragés de type *What-if* s'appuie de manière générale sur les deux situations du SEN. Aussi, la représentation des autres composants (autres que ceux dysfonctionnants), est basée sur les paramètres de la situation de référence ou enveloppe du SEN, ce qui permet de mieux apprécier l'incidence de ces dysfonctionnements sur les différentes voies de transfert (*e.g.* Voie ouvrage et voie Callovo-Oxfordien).

La définition des scénarios *What-if* ne considère pas les cumuls de défaillances « postulées » des composants ouvragés et/ou de la couche du Callovo-Oxfordien. Par exemple, un scénario *What-if* ne cumule pas des dysfonctionnements postulés de tous les conteneurs de stockage et de tous les scellements.

Objectifs et définition des scénarios *What-if*

Les scénarios *What-if* visent, comme pour les SEA, à tester la robustesse du système de stockage mais de manière beaucoup plus poussée en allant jusqu'à considérer des cas extrêmes ***postulant*** des événements pour induire la perte d'une ou plusieurs fonctions de sûreté.

Ces choix, le plus souvent arbitraires, reposent sur des causes de dysfonctionnement postulées et jugées très peu vraisemblables au regard de la connaissance scientifique et technologique acquise.

Ces scénarios visent également à tester la robustesse du système en démontrant que malgré les choix de sûreté faits pour définir ce type de scénario (événements/causes postulé(e)s), le système de stockage reste performant et qu'il existe des lignes de défense même en cas de dégradation ou perte d'une fonction de sûreté liée au dysfonctionnement d'un composant contribuant à sa réalisation.

Compte tenu de leurs objectifs, l'évaluation des incidences sur l'homme aux exutoires de scénarios *What-if* n'est pas systématique pour ce type de scénario. Lorsque les indicateurs de performance, en particulier le débit molaire des radionucléides et des substances toxiques chimiques en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien et des liaisons surface-fond sont identiques ou très proches de ceux obtenus pour le scénario d'évolution normale, l'évaluation de la dose aux exutoires n'est pas de nouveau quantifiée.

Si les incidences sur l'homme de scénarios *What-if*, sont évaluées, l'Andra retient pour l'appréciation des résultats, la recommandation du guide de sûreté n°°1 de l'ASN (1), d'être « suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes. ».

1.3.2.4 Les scénarios d'intrusion humaine involontaire

LE GUIDE DE SÛRETÉ N°1 DE L'ASN DE 2008 INDIQUE :

« Le site devra être choisi de telle sorte que la profondeur retenue pour les ouvrages de stockage des déchets visés par la présente règle permette de garantir que la sûreté du stockage ne sera pas affectée de façon significative par les phénomènes d'érosion (notamment à la suite d'une glaciation), par l'effet d'un séisme, ou par les suites d'une intrusion humaine « banale » ».

« la définition des caractéristiques des situations d'intrusion humaine retenues doit être fondée sur les hypothèses pessimistes suivantes :

- *l'existence du stockage et son emplacement sont oubliés ;*
- *le niveau de technologie est le même qu'aujourd'hui ».*

La perte de mémoire de l'existence du stockage peut être raisonnablement située au-delà de 500 ans.

Le guide de sûreté n°1 de l'ASN (1), émet des recommandations pour la liste et la définition des scénarios d'intrusion humaine à considérer.

En cohérence avec le guide de sûreté n°1 de l'ASN (1), par la fonction *« isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines banales »*, il est attendu que le site et la profondeur d'implantation retenus :

- préservent le stockage des phénomènes de surface et de l'érosion (qui affectent une épaisseur de terrain inférieure à 200 mètres à l'échelle de centaines de milliers d'années). La solution technique retenue d'implanter l'installation de stockage à environ 500 mètres de profondeur permet de ne pas considérer l'éventualité d'une érosion du stockage ;

- protègent le stockage des activités humaines banales[23], c'est-à-dire de faible profondeur. Par ailleurs, la mémoire du stockage sera maintenue le plus longtemps possible (cf. Volume 6 du présent rapport) *a minima* 500 ans, selon le guide de sûreté ce qui permet de ne pas considérer une intrusion humaine involontaire avant 500 ans.

Selon ce même guide de sûreté, les scénarios d'intrusion humaine involontaire doivent permettre d'évaluer l'incidence, sur la sûreté après fermeture, d'activités humaines involontaires (présupposées) après la perte de mémoire supposée du stockage, c'est-à-dire sans avoir connaissance de la dangerosité des déchets qui y sont stockés. L'Andra traite les scénarios d'intrusion humaine involontaire dans une classe spécifique et le risque d'intrusion humaine involontaire est analysé de manière déterministe sans jugement de la vraisemblance de leur occurrence tel que recommandé par le groupe de revue internationale sous l'égide de l'AIEA (20).

Cette classe spécifique de scénarios d'intrusion humaines involontaires, étudiés selon les préconisations du guide de sûreté n°1 de l'ASN, peuvent apporter par exemple une appréciation supplémentaire de la robustesse du système de stockage c'est à dire que la sûreté du stockage n'est pas remise en cause en postulant une intrusion humaine involontaire. L'objectif de l'évaluation de ces scénarios est alors de vérifier que ces intrusions n'induisent pas d'incidence radiologique sur l'homme supérieure à la valeur repère des effets déterministes.

En cohérence avec les pratiques internationales décrites dans le rapport AIEA du projet HIDRA (26), une approche pragmatique est retenue afin de construire des scénarios suffisamment représentatifs du système de stockage sans excès de conservatisme. En effet, des scénarios peu représentatifs du comportement du système de stockage et cumulant trop de conservatisme limiterait l'objectif de démonstration de la robustesse du système de stockage et le cas échéant la possibilité d'optimisations qui pourraient raisonnablement être envisagées.

En cohérence avec le guide de sûreté n°1 de l'ASN (1), pour le centre de stockage Cigéo ne sont considérées que des situations d'intrusions humaines involontaires liées à des activités de forages profonds.

Objectifs et définition des scénarios d'intrusion humaine involontaire

Cette classe spécifique de scénarios d'intrusion humaine involontaire, étudiée selon les préconisations du guide de sûreté n°1 de l'ASN (1), permettent d'apporter une vision complémentaire sur la robustesse du stockage.

En cohérence avec les pratiques internationales, l'Andra traite les scénarios d'intrusion humaine involontaire dans une classe spécifique et le risque d'intrusion humaine involontaire est analysé de manière déterministe sans jugement de la vraisemblance de leur occurrence.

Les scénarios d'intrusion humaine involontaire de l'INB Cigéo sont uniquement liés à des activités de forages profonds. Leur identification et leur définition s'appuient sur les préconisations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN, intégrant notamment l'hypothèse pessimiste d'oubli de l'existence du stockage dès 500 ans.

L'évaluation des incidences sur l'homme pour ce type de scénario suit la recommandation du guide de sûreté n°1 de l'ASN, d'être « *suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes* ».

[23] On entend par activité humaine banale, les activités de terrassement de chantier routier ou de construction de résidence par exemple, activités qui restent très limitées en termes de profondeur.

1.4 L'apport de l'analyse des risques et incertitudes à l'identification et la définition des scénarios

Tel que mentionné précédemment, un scénario décrit de manière simplifiée comment les radionucléides et substances toxiques chimiques contenus dans les déchets vont éventuellement arriver jusqu'à l'homme et son environnement en tenant compte :

- de l'ensemble des voies de transfert susceptibles d'être empreintes par ces éléments ;
- de tous les composants qu'ils sont susceptibles de traverser, qu'ils soient ouvragés ou naturels, qu'ils contribuent ou non à une fonction de sûreté.

La définition des scénarios suit ainsi le cheminement des radionucléides et substances toxiques chimiques vers la biosphère et décrit en tenant compte de l'état des connaissances scientifiques et technologiques acquis et des incertitudes résiduelles (tel que retranscrit dans les volumes 4 et 7 de la du présent rapport) les choix de représentation :

- des caractéristiques géométriques et physiques des composants (nature des matériaux, longueur, épaisseur…) ;
- des caractéristiques susceptibles d'être sollicitées pour chaque composant pour réaliser les fonctions de sûreté après fermeture auxquelles ils contribuent ; il s'agit, par exemple, des caractéristiques hydro-dispersives, de transport et de rétention ou conditions physico-chimiques (pH, redox)… ;
- du comportement des composants sur le long terme en tenant compte des éventuelles interactions entre composants qui pourraient potentiellement engendrer des perturbations.

Les scénarios considèrent ainsi tous les composants du stockage impliqués dans le relâchement et le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques, depuis le colis (inventaire, modèle de relâchement des éléments) jusqu'à la biosphère (évaluation des impacts aux exutoires).

Tel qu'illustré en figure 1-4 cela conduit à décrire dans les scénarios l'ensemble des composants depuis le colis jusqu'aux exutoires en considérant d'une part la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien (voie de transfert dominante) et d'autre part la voie de transfert par les ouvrages (voie de transfert mineure par rapport à la couche du Callovo-Oxfordien).

Pour mémoire, la description du scénario d'évolution normale intègre les processus et événements liés à la présence de l'installation de stockage et l'évolution du système due aux événements naturels.

La description des scénarios d'évolution altérée et *What-if* repose sur la ou les cause(s) de dysfonctionnement identifié. C'est par une démarche d'analyse des risques et incertitudes reposant sur les fonctions de sûreté et sur les connaissances scientifiques et technologiques que sont identifiés et définis les scénarios (*e.g.* Les situations du scénario d'évolution normale, scénarios d'évolution altérée et scénarios *What-if, (*cf. Chapitre 3 du présent volume).

Sur la base de la compréhension phénoménologique du système de stockage et de son évolution (cf. Volume 7 du présent rapport, et le « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (25)) et des modèles et des gammes de valeurs de paramètres disponibles ainsi que les incertitudes résiduelles associées, une analyse est conduite afin :

- d'identifier les causes potentielles de dysfonctionnement des composants contribuant à la réalisation de ces fonctions et d'apprécier qualitativement le risque de non-réalisation d'une fonction de sûreté ;
- de justifier certains choix de représentation des composants pris individuellement ou dans leur ensemble.

1.4.1 La méthodologie d'analyse des risques et incertitudes après fermeture

1.4.1.1 Les principes de l'analyse des risques et incertitudes

L'ASN indique dans son guide de sûreté n°1 de 2008 (1) que : « *la détermination et la prise en compte des incertitudes sont des éléments essentiels de l'analyse de sûreté » (…) « la démonstration de sûreté doit clairement identifier dans quelle mesure les investigations sur le site, les résultats des programmes de recherche, des dispositions de conception, les hypothèses prises pour l'évaluation et les études de sensibilité ont permis d'apprécier les incertitudes et d'en tenir compte. Les incertitudes résiduelles seront appréciées, suivant leur nature, de manière qualitative ou quantitative. Il pourra être fait appel à des jugements d'experts ; la traçabilité de ces jugements devra être établie* ».

Pour ce faire, l'approche mise en œuvre par l'Andra est une analyse qualitative des risques et incertitudes dont les principes sont exposés ci-après.

Cette analyse s'inscrit dans une démarche itérative reconduite à chaque étape du projet de centre de stockage Cigéo, et permet de dresser le bilan à un stade donné de la maîtrise des risques et incertitudes. La méthodologie mise en œuvre par l'Andra pour le présent dossier de demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo bénéficie du retour d'expérience acquis lors des dossiers précédents, notamment le « Dossier 2005 Argile, tome « Évaluation de sûreté du stockage géologique » (27), le rapport étape 2009 (28), Dossier d'options de sûreté (2, 21) et du retour des évaluateurs, notamment par les pairs[24] (20, 29).

1.4.1.2 Les risques et incertitudes examinés

Afin d'estimer le bon fonctionnement du système de stockage et sa robustesse vis-à-vis de l'objectif fondamental de sûreté, l'accent est porté en après fermeture sur l'intégration des connaissances scientifiques et technologiques et la maîtrise des risques et incertitudes résiduelles identifiées.

Après fermeture du stockage, les risques sont classés en deux grandes catégories :

- les risques dits « risques internes » qui sont liés à des perturbations d'origine interne. Ils correspondent aux perturbations d'origine interne (*e.g.* Thermique, hydraulique, gaz, mécanique, chimiques, bactériologique et radiologiques (incluant la criticité)), et leurs éventuelles interactions. Ces perturbations sont analysées vis-à-vis de leur impact potentiel sur les composants contribuant aux fonctions de sûreté, à savoir la couche du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés ;
- les risques liés à des aléas d'origine externe dits « risques externes », liés aux évolutions des évènements climatiques et géodynamiques, y compris les effets anthropiques sur le climat et l'environnement, à l'aléa sismique et aux intrusions humaines involontaires. Ces risques sont analysés pour évaluer leur influence sur les fonctions de sûreté mais également sur l'environnement.

Les incertitudes résiduelles liées à l'état de connaissances scientifiques et technologiques sont classées selon les catégories[25] suivantes :

- les incertitudes sur la connaissance des données d'entrée nécessaires pour concevoir les composants ouvragés du système de stockage.

---

[24] Le groupe de revue internationale du dossier 2005 (29), sous l'égide de l'AEN, avait recommandé de poursuivre ce type d'analyse (« … *l'analyse qualitative de sûreté (AQS) apparaît comme un outil efficace de la gestion des incertitudes[…] Il* conviendra *de la poursuivre dans l'avenir, et de lui accorder une place et une visibilité importantes dans les dossiers futurs* ». Le retour de la revue internationale sur le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2, 20) sous l'égide de l'AIEA conforte cette appréciation en indiquant : « *In general, the IRT considers that Andra is implementing a good overall management process for systematically defining and investigating safety scenarios* ».

[25] Ces trois catégories sont cohérentes avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1).

Ce sont :

- ✓ d'une part les colis primaires incluant l'inventaire radiologique et leur comportement dans le temps en présence d'eau ;
- ✓ et d'autre part le site d'implantation dont la couche du Callovo-Oxfordien, ses formations encaissantes et la biosphère ;

- les incertitudes résiduelles de connaissance portant sur les caractéristiques intrinsèques des composants ouvragés du système de stockage (conteneur de stockage, scellements…) et leur agencement dans l'installation souterraine, elles intègrent les incertitudes technologiques ;
- les incertitudes résiduelles de connaissance sur l'évolution à long terme du milieu géologique environnant et de la biosphère (hydrogéologie du site, formations encaissantes…).

Comme d'autres organisations sur le plan international, l'Andra s'appuie sur la base FEP's[26] internationale développée sous l'égide de l'AEN pour les stockages profonds (30) pour s'assurer de la complétude des processus et phénomènes pris en compte (20).

1.4.1.3 La méthodologie d'analyse des risques et incertitudes

Sur la base des connaissances scientifiques et technologiques acquises, cette analyse qualitative étudie de manière systématique, composant par composant, au regard de leur rôle vis-à-vis des fonctions de sûreté et des exigences spécifiées associées et au regard des connaissances disponibles, l'influence de ces risques et incertitudes sur le fonctionnement du stockage après fermeture.

Elle repose sur les principes généraux d'une analyse de risque classique mais elle se distingue par le fait qu'elle intègre des processus ou phénomènes qui se déroulent sur de longues échelles de temps ce qui induit des incertitudes de connaissances scientifiques et technologiques plus importantes. La connaissance du système de stockage et de son évolution sur le long terme constitue donc une donnée d'entrée importante à l'analyse (cf. Volume 7 du présent rapport).

Le principe de l'analyse des risques et incertitudes conduite pour le long terme après fermeture définitive de l'installation de stockage est (cf. Figure 1-7) :

- d'examiner si les risques et incertitudes peuvent affecter ou non la réalisation d'une ou plusieurs fonction(s) de sûreté définie(s) pour l'après fermeture ;

  Sur la base des connaissances acquises, les risques et incertitudes sont analysés pour en évaluer l'effet sur les performances allouées aux composants contribuant à la réalisation de cette (ces) fonction(s) ;
- d'examiner, pour un composant ne contribuant pas à la réalisation d'une fonction de sûreté, l'influence des incertitudes résiduelles de connaissances sur le transfert des radionucléides et toxiques chimiques vers la biosphère afin d'en proposer des modalités de gestion.

Par une appréciation qualitative mais argumentée, l'analyse permet de proposer une gestion des risques et incertitudes analysé(e)s (cf. Figure 1-7), soit :

- par des choix de conception du stockage au moyen de dispositions qui rendent le système peu sensible à ces incertitudes ;
- par leur prise en compte dans des scénarios appropriés lorsqu'aucune disposition de conception ne permet de pallier ces risques et incertitudes. Une appréciation argumentée des risques et incertitudes résiduelles conduit à des choix d'hypothèses (représentation, modèles, données) à retenir dans les scénarios :
  - ✓ soit dans le scénario d'évolution normale si les risques ou incertitudes résiduelles ne conduisent pas à la perte d'une fonction de sûreté ;
  - ✓ soit dans un scénario d'évolution altérée ou dans un scénario de type *What-if* en cas de perte de fonction de sûreté. C'est par une appréciation argumentée des causes de dysfonctionnement identifiées que la classification en scénario d'évolution altérée ou *What-if* est proposée.

[26] *Features, Events and Processes.*

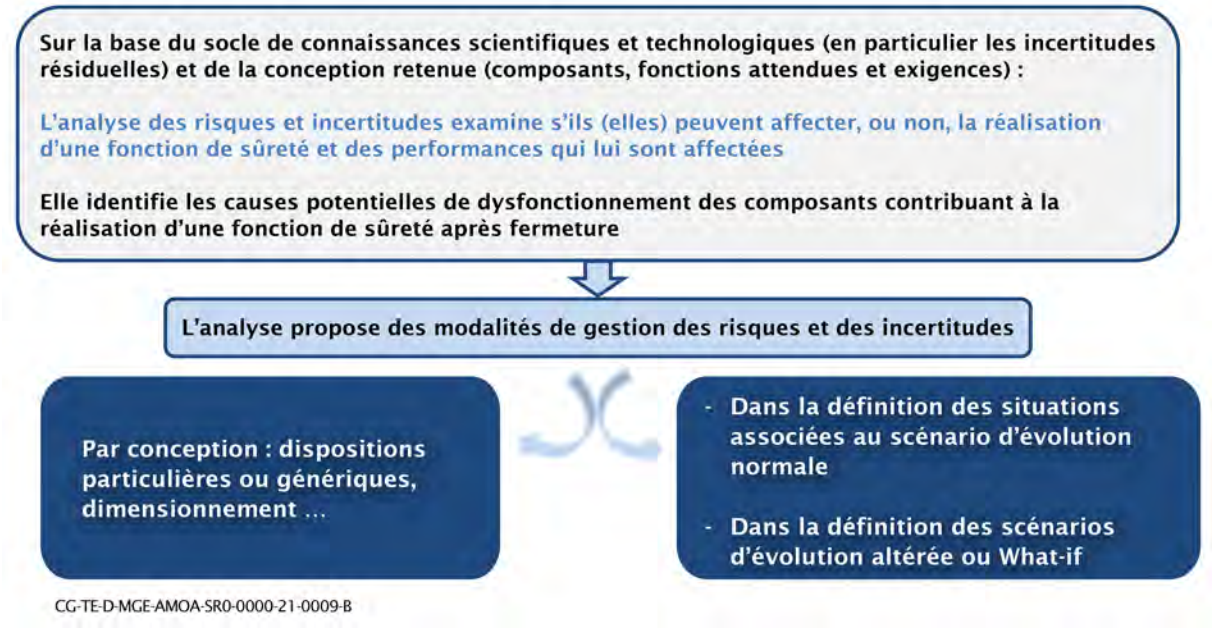


Figure 1-7 *Illustration schématique de l'analyse des risques et incertitudes de connaissances scientifiques et technologiques et des modalités de leur gestion*

L'analyse permet ainsi d'identifier les causes de dysfonctionnement des composants et d'évaluer s'il peut y avoir une diminution significative des performances attendues de ces composants et engendrer la perte d'une fonction de sûreté. Ces causes potentielles de dysfonctionnement d'un composant identifiées, sont analysées en regard des connaissances scientifiques et technologiques acquises (cf. Figure 1-8) :

- si les causes de dysfonctionnement identifiées reposent sur **des processus et/ou phénomènes jugés peu vraisemblables au regard des connaissances acquises, des scénarios d'évolution altérée** sont alors définis (cf. Chapitre 1.3.2.2 du présent volume) ;
- si les causes de dysfonctionnement identifiées reposent sur **des processus et/ou phénomènes jugés très peu vraisemblables sur la base des connaissances acquises, des scénarios de type *What-if*** sont définis (cf. Chapitre 1.3.2.3 du présent volume).

Les effets induits d'un composant sur l'autre par le biais d'une perturbation, en particulier vis-à-vis des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés impliqués dans la réalisation de fonctions de sûreté après fermeture sont également analysés. L'analyse examine alors si l'incertitude peut modifier l'environnement d'un composant contribuant à la réalisation d'une fonction de sûreté de telle sorte que ses performances peuvent s'en trouver altérées, en particulier si la perturbation est susceptible de modifier les caractéristiques intrinsèques nécessaires à l'accomplissement de la fonction de sûreté.

Pour les composants ne contribuant pas à la réalisation de fonctions de sûreté, l'analyse porte plus spécifiquement sur la gestion des risques et incertitudes par *hypothèse* dans les différentes situations du scénario d'évolution normale. En s'appuyant sur les connaissances acquises, les principes de choix présentés au chapitre 1.3.2.1 du présent volume s'appliquent.

La prise en compte des connaissances relatives aux inventaires en radionucléides et substances toxiques chimiques des colis de déchets comprend également un volet de traitement des incertitudes résiduelles. La gestion de ces incertitudes repose sur la mise en œuvre d'une méthodologie qui repose sur la connaissance des activités massiques des colis à l'échelle de la famille. La prise en compte des incertitudes résiduelles s'apprécie par l'analyse des niveaux de connaissances des colis et qui conduit à appliquer un facteur de marge selon ce niveau.

Cette méthodologie décrite au volume 3 du présent rapport, permet de construire un inventaire radiologique qualifié de « margé » pour les évaluations de sûreté après fermeture.

De même, la prise en compte des connaissances relatives aux comportement des colis de déchets et le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques comprend un volet de traitement des incertitudes résiduelles. Le critère général de choix des modèles de relâchement « colis » à retenir dans le cadre de l'évaluation de sûreté s'appuie sur la connaissance acquise :

- si le niveau de connaissance est jugé satisfaisant et les incertitudes résiduelles maîtrisées, le choix de sûreté porte sur un modèle dit « phénoménologique » retenu dans la situation de référence du scénario d'évolution normale ;
- si la connaissance comprend à ce stade des incertitudes (de toute nature), le choix de sûreté porte sur un modèle conservatif retenu dans la situation dite enveloppe du domaine d'évolution normale, modèle majorant le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques.

Le cas échéant un modèle conservatif est retenu dans les SEA et/ou *What-if* si le dysfonctionnement envisagé induit des effets sur les conditions d'environnement du colis de déchet.

La définition des biosphères fait l'objet d'une démarche spécifique de prise en compte des incertitudes. Celle-ci est retranscrite dans le chapitre 1.5.2.2 du présent volume et déclinée au chapitre 4 du présent volume.

L'apport de l'analyse des risques et incertitudes après fermeture à l'identification et la définition des scénarios

C'est par l'analyse qualitative des risques et incertitudes que sont identifiés et définis les scénarios après fermeture. En s'appuyant sur les connaissances scientifiques et technologiques acquises, et sur l'architecture définie à titre d'illustration incluant les fonctions de sûreté et les exigences applicables (cf. Figure 1-8) :

- elle analyse les risques de non-réalisation des fonctions de sûreté après-fermeture en examinant si les risques (internes et externes) ou les incertitudes résiduelles de connaissance (de toute natures) peuvent affecter ou non la performance des composants qui contribuent à la réalisation d'une fonction de sûreté.

  Elle identifie ainsi les causes potentielles de dysfonctionnement de composants liés aux risques et incertitudes résiduelles de connaissance et propose leur gestion par des dispositions de conception ou par la définition de scénarios de sûreté. Des choix d'hypothèses (représentation, modèles, données) à retenir dans les scénarios sont faits permettant d'intégrer le risque ou l'incertitude dans l'évaluation de sûreté du stockage :
  - ✓ soit dans le scénario d'évolution normale s'il n'y a pas de perte de fonction de sûreté ;
  - ✓ soit dans un scénario d'évolution altérée ou dans un scénario de type *What-if* en cas de perte de fonction de sûreté ;
- elle examine également pour un composant ne contribuant pas à la réalisation d'une fonction de sûreté, l'influence des incertitudes résiduelles de connaissances sur le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques vers la biosphère afin d'en proposer leur gestion dans les scénarios.

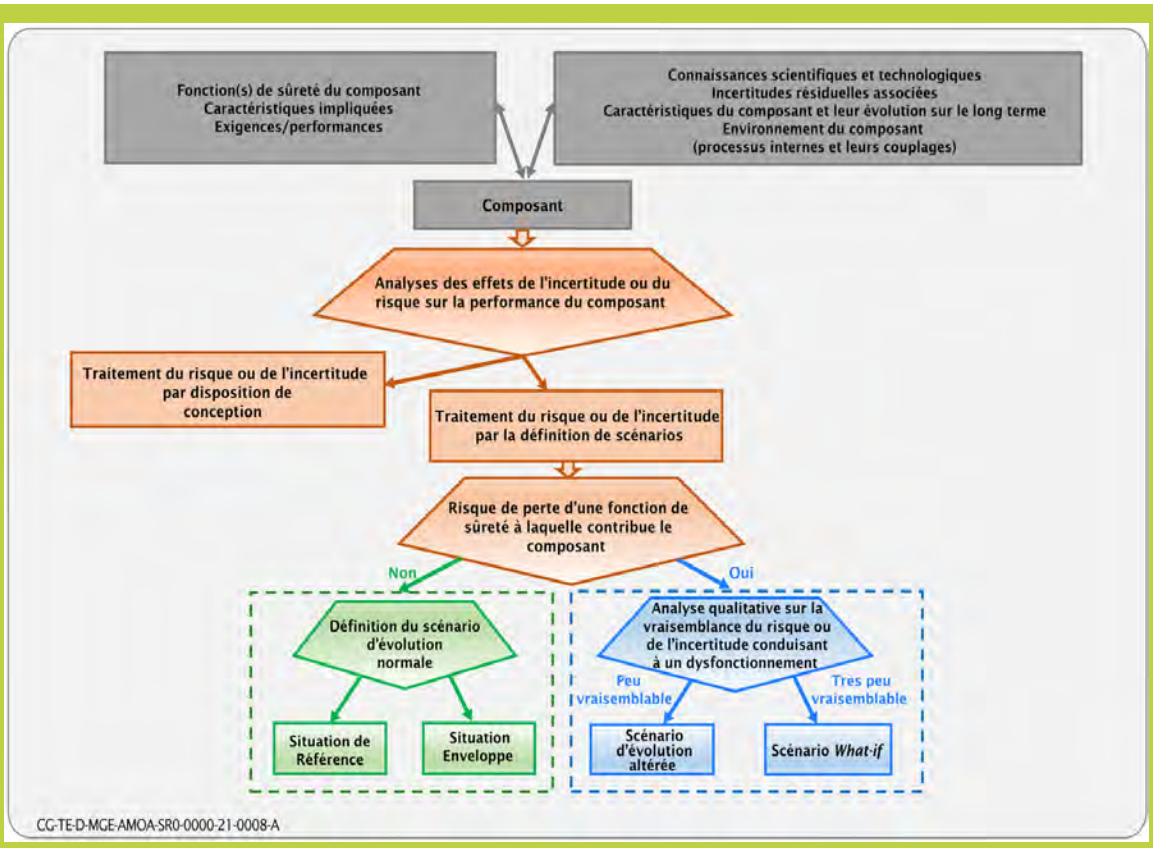


Figure 1-8 *Illustration schématique de l'apport de l'analyse des risques et incertitudes à la définition des scénarios après fermeture*

1.4.2 L'établissement de la liste des scénarios à quantifier

La dernière étape de l'analyse des risques et incertitudes en après fermeture permet l'établissement de la liste des scénarios SEA et *What-if* à quantifier à l'aide d'indicateurs détaillés au chapitre 1.5 du présent volume.

Une analyse globale des risques et incertitudes est menée avec un double objectif :

- d'une part pour identifier les causes communes de dysfonctionnement de composants contribuant à la réalisation d'une même fonction de sûreté ;
- et d'autre part pour apprécier le niveau d'indépendance des fonctions de sûreté en vérifiant qu'une même incertitude n'est pas susceptible d'affecter plusieurs fonctions de sûreté.

Les différentes étapes de cette analyse globale, illustrées en figure 1-9, sont présentées ci-dessous.

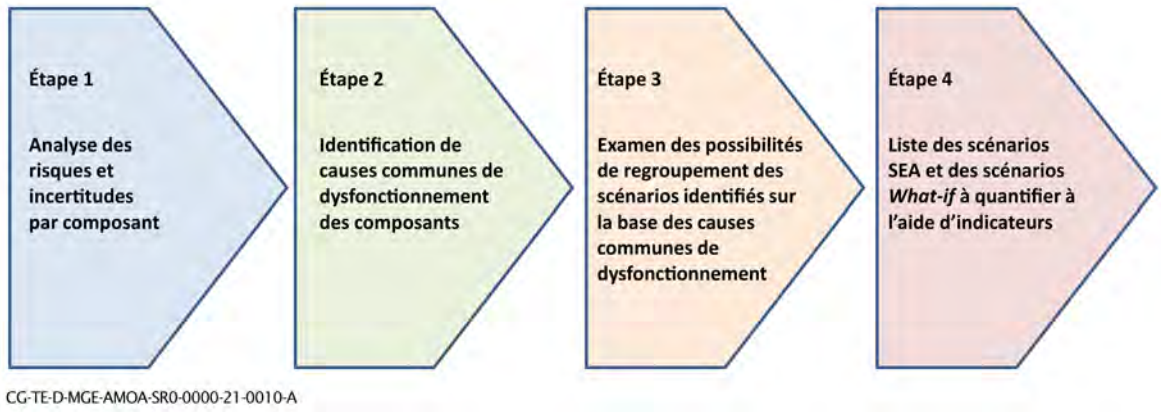


Figure 1-9 Illustration schématique de l'établissement de la liste de scénarios à quantifier sur la base de l'analyse des risques et incertitudes

- étape 1

  La première étape de l'analyse des risques et incertitudes à celle menée composant par composant au regard de leur contribution ou non aux fonctions de sûreté. Elle correspond à celle retranscrite dans le chapitre 2 du présent volume.

  Un tableau de synthèse par composant et/ou processus examiné est intégré pour résumer les résultats de cette analyse, notamment pour présenter la gestion par conception ou par scénarios, des risques et incertitudes analysés ;

- étape 2

  Lorsque l'analyse composant par composant a été menée (étape 1 de figure 1-9) une analyse globale des modes de défaillances pouvant survenir au sein du système de stockage est menée en regard des principales fonctions de sûreté après fermeture (cf. Chapitre 1.1.2.2 du présent volume). L'objectif visé est d'identifier des causes qualifiées de « communes » et qui pourraient conduire au dysfonctionnement de l'ensemble des composants contribuant à une même fonction de sûreté après fermeture. De manière pratique, il s'agit, par la construction « d'arbre de défaillance », d'identifier des causes génériques qui peuvent être un facteur commun à plusieurs composants contribuant à la réalisation d'une même fonction de sûreté.

  Chaque fonction de sûreté de l'arborescence des fonctions permettant de limiter le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques par voie aqueuse après fermeture est analysée afin d'identifier des modes communs de dysfonctionnement des composants contribuant à sa réalisation ;

- étape 3

  Sur la base de l'analyse menée aux deux étapes précédentes, la possibilité de regroupement de scénarios est examinée, notamment d'identifier si un des scénarios parmi ceux identifiés peut couvrir les autres en termes d'effets potentiels sur les performances attendues des composants ou en termes d'effets potentiels sur les indicateurs retenus ;

- étape 4

  À l'issue de l'analyse des risques et incertitudes globale, une liste de scénarios d'évolution altérée (SEA) et *What-if* à quantifier pour l'évaluation de la sûreté après fermeture est établie, c'est l'objet du chapitre 3 du présent volume.

1.5 Les évaluations quantitatives des scénarios et leurs enseignements

En cohérence avec le guide de sureté n° 1 de l'ASN de 2008 (1), l'analyse des évaluations quantitatives des scénarios retenus à l'aide de différents indicateurs permet de dégager divers enseignements :

- vis-à-vis de la vérification de la performance des composants ;
- vis-à-vis des objectifs de protection définis ;
- vis-à-vis du poids des composants, paramètres et processus dans le système de stockage ;
- vis-à-vis de la robustesse du système de stockage dans son ensemble.

Ces enseignements résultent d'une analyse détaillée des résultats des quantifications en tenant compte de la classification des scénarios et des situations associées traitées.

1.5.1 La vérification de la performance des composants

1.5.1.1 Les indicateurs de performance

La déclinaison de l'objectif de protection de la santé de l'homme et de l'environnement en fonctions de sûreté permet à l'aide d'indicateurs appropriés de s'assurer :

- du caractère favorable, pour la sûreté après fermeture, des performances des composants du système de stockage participant aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvragés, roche hôte) puis dans leur ensemble ;
- de la robustesse du système de stockage en cas de dysfonctionnement d'un ou plusieurs composants contribuant à la réalisation des fonctions de sûreté (composants naturels ou composants ouvragés).

Les indicateurs retenus pour vérifier le caractère favorable des performances des composants et la robustesse du système de stockage sont en lien avec des critères d'appréciation de l'atténuation et du retard du transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques offerts par chaque composant contribuant à la réalisation de fonctions de sûreté du système de stockage (cf. Figure 1-10).

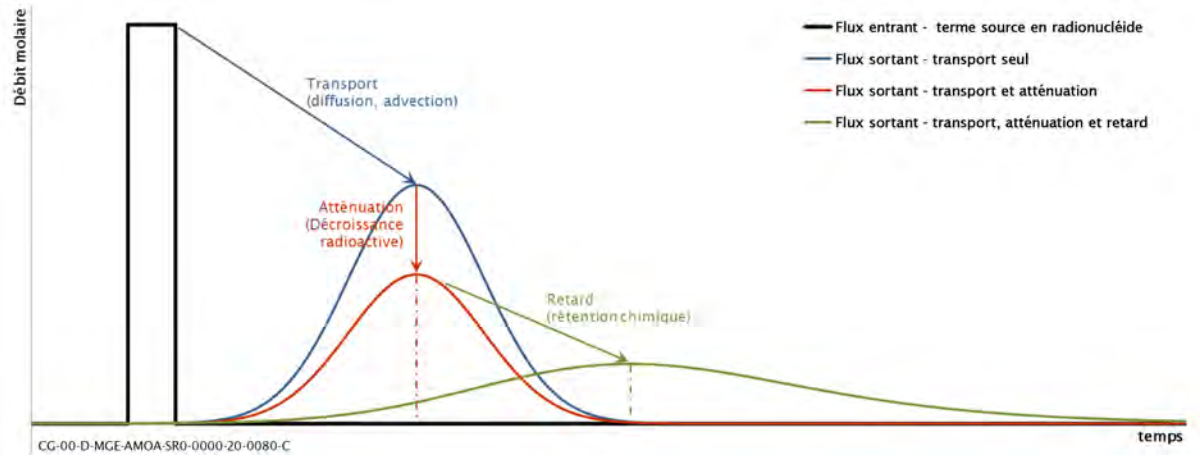


Figure 1-10 *Schéma illustrant l'utilisation d'indicateurs autres que la dose en s'appuyant sur la période radioactive du radionucléide et son comportement en solution*

En lien avec les fonctions de sûreté du système de stockage pour l'après fermeture, ce sont pour le transfert de radionucléides et de substances toxiques chimiques, par la voie eau :

- les flux d'eau et les ratios entre les flux convectifs et diffusifs de radionucléides et substances toxiques chimiques dans le stockage et le cas échéant dans la formation géologique hôte (ex : la couche du Callovo-Oxfordien). Ces indicateurs sont utilisés pour évaluer la fonction « S'opposer à la circulation d'eau » (c'est-à-dire évaluer si le transport est bien diffusif dominant) ;
- les répartitions entre la quantité (masses, activités, pourcentages…) de radionucléides et de substances toxiques chimiques émis ou relâchés par les colis et ceux transitant le long et/ou dans les ouvrages de stockage (ex : les galeries et les liaisons surface-fond) et migrant dans le milieu géologique (ex : la couche du Callovo-Oxfordien). Elles permettent d'apprécier les voies de transfert empruntées par les radionucléides et substances toxiques chimiques (*i.e.* Couche du Callovo-Oxfordien ou ouvrages) sur la durée de l'analyse, et ce, en regard de la quantité initiale de radionucléides et de substances toxiques chimiques contenue dans les colis :
  - ✓ ces indicateurs sont appropriés pour évaluer les fonctions « Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser » et « Retarder et atténuer la migration des radionucléides (et substances toxiques chimiques) » ;
- les débits molaires ou d'activité de radionucléides (et débits massiques de substances toxiques chimiques) au cours du temps à la sortie de chacun des composants (colis, alvéole, scellements, formation hôte). Ces débits permettent d'estimer la capacité d'atténuation des différents composants, en particulier de la formation hôte. De manière plus précise, on considère : (i) l'atténuation du flux de radionucléides et de substances toxiques chimiques, c'est-à-dire la fraction de la masse qui ne sort pas de la (ou des) composants(s) considéré(s), (ii) les dates de percée des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les dates d'occurrence des maxima de débit molaire/massique, indicateurs pertinents pour les radionucléides à vie très longue pour lesquels la décroissance joue peu et (iii) l'atténuation des maxima de débit molaire en sortie des composants :
  - ✓ ces indicateurs permettent d'apprécier les performances de la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques » ;
- la cartographie des concentrations des radionucléides et des substances toxiques chimiques en solution dans la couche du Callovo-Oxfordien et/ou dans les formations encaissantes, notamment dans les (horizons) aquifères :
  - ✓ cet indicateur permet d'apprécier, à différentes dates, le cheminement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, le cas échéant jusqu'aux exutoires naturels potentiels.

1.5.1.2 Les enseignements tirés des évaluations de performance des composants

Les indicateurs de performance listés ci-dessus permettent une appréciation de l'atténuation et du retard du transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques, offerts par chaque composant contribuant à la réalisation des fonctions de sûreté.

Les résultats des évaluations peuvent ainsi être utilisés pour analyser l'incidence des choix de sûreté structurant la définition des scénarios, en particulier en fonction de leur conservatisme. C'est le cas notamment pour les deux situations du scénario d'évolution normale.

Ces indicateurs s'appliquent à tous les scénarios SEA et *What-if,* ce qui permet d'apprécier la robustesse du système de stockage et de porter un jugement sur le poids de certains composants dans le niveau de sûreté global du système de stockage.

L'Andra a défini la notion de composants importants pour la protection (CIP) en lien avec la sûreté passive à long terme après-fermeture du stockage (cf. Chapitre 12.4 du présent volume). À titre d'illustration, pour le centre de stockage de Cigéo, la couche du Callovo-Oxfordien, de par ses caractéristiques intrinsèques favorables est un composant important qui constitue l'élément central de la sûreté après fermeture du système de stockage (2). L'analyse des différents indicateurs de performance permet d'apprécier son rôle pour limiter et atténuer le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques vers la biosphère.

Selon une approche similaire, l'analyse des indicateurs en cas de dysfonctionnement des scellements permet de porter un jugement non seulement sur le niveau de sûreté global du stockage mais également sur le poids de certains composants ou dispositions d'architecture à limiter le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques par la voie ouvrage.

1.5.2 La vérification des incidences sanitaires sur l'homme

1.5.2.1 Les indicateurs retenus pour l'évaluation des impacts sanitaires liés à l'éventuelle présence de radionucléides

Tel qu'indiqué au chapitre 1.1.1.1.1 du présent volume, les incidences sur la santé humaine sur le long terme après fermeture s'apprécient par l'évaluation de la dose totale annuelle qui serait reçue par une personne qui ferait usage d'une eau potentiellement contaminée aux exutoires retenus.

La vérification des objectifs de protection radiologique passe par l'évaluation quantitative des incidences sur la santé de l'homme aux exutoires retenus suite à un éventuel transfert des radionucléides vers la biosphère. Pour conduire ces évaluations, l'Andra a développé une démarche de description des biosphères qui s'appuie sur les pratiques internationales et le retour d'expérience acquis sur les dossiers émis précédemment (cf. Chapitre 1.5.2.2 du présent volume). Sa déclinaison pour l'installation de stockage de Cigéo après sa fermeture est présentée dans le chapitre 4 du présent volume.

1.5.2.2 La définition des biosphères et des groupes de référence hypothétiques pour les évaluations quantitatives

La vérification du respect des objectifs de protection, définis au chapitre 1.1.1.1.1 du présent volume, passe par l'évaluation quantitative de l'impact sur l'homme d'un éventuel transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques vers la biosphère.

La biosphère représente ainsi le dernier maillon de la chaîne de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques depuis les colis de déchets jusqu'à l'homme. Il s'agit d'évaluer le risque potentiel résultant de l'exposition aux radionucléides et substances toxiques chimiques issu(e)s du stockage et parvenu(e)s à un exutoire (point d'extraction d'eau) accessible à l'homme. Cette évaluation n'est pas une prédiction des effets mais représente une indication de la protection offerte par le stockage de déchets nucléaires en formation géologique profonde.

Afin de convertir les résultats exprimés en termes de débit molaire ($mol.an^{-1}$) en une dose à l'exutoire ($mSv.an^{-1}$) reçue par un individu du groupe de référence hypothétique, plusieurs opérations successives sont réalisées :

- conversion du débit molaire en débit d'activité faisant intervenir un facteur inversement proportionnel à la période du radionucléide considéré ;
- application d'un facteur de dilution qui dépend de l'exutoire considéré, afin d'obtenir la concentration[27] ou activité volumique ($Bq.L^{-1}$) à l'exutoire ;
- application d'un facteur de conversion biosphère pour chaque radionucléide, qui dépend de la biosphère type considérée, des activités du groupe de référence hypothétique, du régime alimentaire associé, et de la classe d'âge de la personne représentative considérée (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an).

La définition et la description des biosphères appliquées aux évaluations quantitatives de sûreté après fermeture se base notamment sur la méthodologie internationale BIOMASS (*Biosphere Modelling ASSessment*) (16) développée dans le cadre de travaux internationaux avec l'AIEA. Elle est cohérente avec le guide de sureté n° 1 de l'ASN de 2008 (1). Cette démarche s'applique aux évaluations impliquant un

[27] Dans le présent volume, le terme de concentration à l'exutoire pour un radionucléide donné désigne l'activité volumique de ce radionucléide à cet exutoire, exprimée en $Bq.L^{-1}$.

transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques par la voie aqueuse indépendamment des scénarios retenus (SEN, SEA, *What-if* ou SIHI impliquant un transfert par l'eau).

La démarche biosphère établie par l'Andra se décline en cinq étapes présentées sur la figure 1-11 ci-dessous.

DÉMARCHE BIOSPHÈRE

	DÉFINITION DU CONTEXTE
1.	Le type de stockage (ou projet) concerné incluant la durée de vie des déchets (vie longue ou non).
2.	Les échelles de temps relatives aux différentes phases de vie du stockage et leur durée (incluant les dates de sortie aux exutoires si celles-ci sont connues).
3.	Les référentiels applicables.
4.	Le ou les objectifs de l'évaluation.
5.	Le ou les indicateurs retenus.
	CHOIX DES BIOSPHÈRES À RETENIR POUR LES ÉVALUATIONS
1.	Identification et justification des biosphères types pour les différenates phases de vie.
2.	Description phénoménologique de la ou des biosphère(s) type(s) retenue(s).
	IDENTIFICATION ET JUSTIFICATION DES COMPARTIMENTS DU MODÈLE CONCEPTUEL D'UNE BIOSPHÈRE
1.	Choix du ou des exutoires.
2.	Choix du ou des groupes de référence actuel(s) ou hypothétique(s).
3.	Choix des composantes sol, animaux, végétaux et climat local.
	MODÉLISATION DES TRANSFERTS DE RADIONUCLÉIDES OU DE SUBSTANCES TOXIQUES/CHIMIQUES ENTRE COMPARTIMENTS DU MODÈLE
1.	Identification des interrelations entre les composantes.
2.	Description afin de « visualiser » les voies de transfert potentielles.
	DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE NUMÉRIQUE POUR LA QUANTIFICATION
1.	Choix des modèles de transfert.
2.	Principe de sélection des données.

CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-18-0162-A

Figure 1-11 Étapes de la démarche biosphère appliquée aux évaluations quantitatives

Quelques éléments de cette méthodologie sont précisés ci-dessous :

- **choix des biosphères types à retenir pour l'évaluation**

  Il s'agit de la sélection d'une ou plusieurs biosphère(s) type(s) (tempérée(s), froide(s), chaude(s)) à considérer pour l'évaluation. C'est à cette étape que les choix inhérents à la prise en compte des

changements environnementaux (naturels ou anthropiques) sont discutés et justifiés, éventuellement sur la base de modélisations.

Une fois la liste des biosphères types plausibles définie, l'approche consiste à retenir pour les évaluations les différentes biosphères types possibles sur la durée définie pour les évaluations en regard de leur pertinence vis-à-vis du contexte de l'évaluation et en particulier du scénario de sûreté considéré.

Les biosphères types retenues pour l'évaluation sont à considérer individuellement sans prendre en compte leur enchaînement au cours du temps et sont à traiter de manière équiprobable. L'approche conduit ainsi à décrire un modèle conceptuel pour chacune des biosphères types sélectionnées.

Lorsque le choix des biosphères types à retenir pour l'évaluation est fait, la description phénoménologique de ces biosphères est réalisée. Celle-ci conduit à décrire chaque composante de la biosphère type : climat, végétation, faune, sols, géomorphologie, géologie, hydrologie, hydrogéologie et activités humaines ;

- **choix de la localisation des points de prélèvements en eau pour l'alimentation des groupes de référence hypothétiques (exutoires)**

  Cette étape comprend l'identification des exutoires par les études et modélisations hydrogéologiques. La notion d'exutoire renvoie au point de rejet des radionucléides et substances toxiques chimiques dans la biosphère. Cette identification ne préjuge pas des choix qui sont faits pour définir les modèles de biosphères à retenir pour les évaluations. En effet, la démarche peut conduire à :

  - ✓ retenir le ou les exutoire(s) et leurs localisations en cohérence avec les modèles hydrogéologiques et de transport des radionucléides et substances toxiques chimiques lorsque le site ou la région d'implantation sont connus et les données disponibles. Le choix du ou des exutoire(s) alimentant les groupes de référence hypothétiques est alors effectué parmi les exutoires identifiés pour le futur d'après les modélisations hydrogéologiques ;
  - ✓ le cas échéant choisir un exutoire dont la localisation est dépendante des situations à considérer et des activités du groupe de référence hypothétique. Ce choix pourra considérer des hypothèses ou paramètres déconnectés des résultats obtenus par les modélisations hydrogéologiques. La considération d'un tel exutoire peut notamment permettre de pallier aux incertitudes inhérentes aux projections dans le futur ou de pouvoir positionner un exutoire dont la productivité est suffisante pour alimenter un groupe. Dans ce cas, une appréciation sur la vraisemblance de l'exutoire retenu est apportée ;

- **choix des groupes de référence hypothétiques**

  Ce choix s'appuie sur une stratégie dite « *a priori* » qui consiste à considérer plusieurs groupes exposés potentiels avec des comportements représentatifs des habitudes et ressources de la biosphère dans son cadre régional. Il s'agit ensuite de décrire un individu représentatif de chacun des groupes sélectionnés, par sa classe d'âge, ses voies d'exposition et son comportement alimentaire.

  L'approche conduit à examiner d'une part des comportements alimentaires moyens (groupe multi-activités) et des comportements alimentaires particuliers en lien avec une activité particulière (gros mangeur de viande bovine dans le cas d'un individu éleveur de bovins ou gros mangeur de fruits et légumes dans le cas d'un villageois avec un jardin potager par exemple). Cette approche permet de couvrir différentes activités et régimes alimentaires ;

- **définition des voies d'exposition à l'homme et des voies de transfert potentielles entre l'exutoire et l'homme.**

  Les voies d'atteinte à l'homme considérées pour chaque individu représentatif (adulte, enfant de 10 ans ou enfant de 1 an) sont :

  - ✓ l'inhalation (mise en suspension de particules de sols contaminés) ;
  - ✓ l'ingestion (des produits animaux et végétaux, eau de boisson, sol par inadvertance) ;
  - ✓ l'exposition externe (lors du temps de présence sur des sols potentiellement contaminés et uniquement pour les radionucléides).

  À partir d'un point de prélèvement d'eau contenant potentiellement des radionucléides ou des substances chimiques issues du système de stockage, un modèle est défini afin d'avoir une vue d'ensemble des transferts des solutés de l'exutoire jusqu'à l'homme (cf. Figure 1-12). Sont ainsi considérées toutes les voies de transfert potentielles définies selon les activités de la personne représentative.

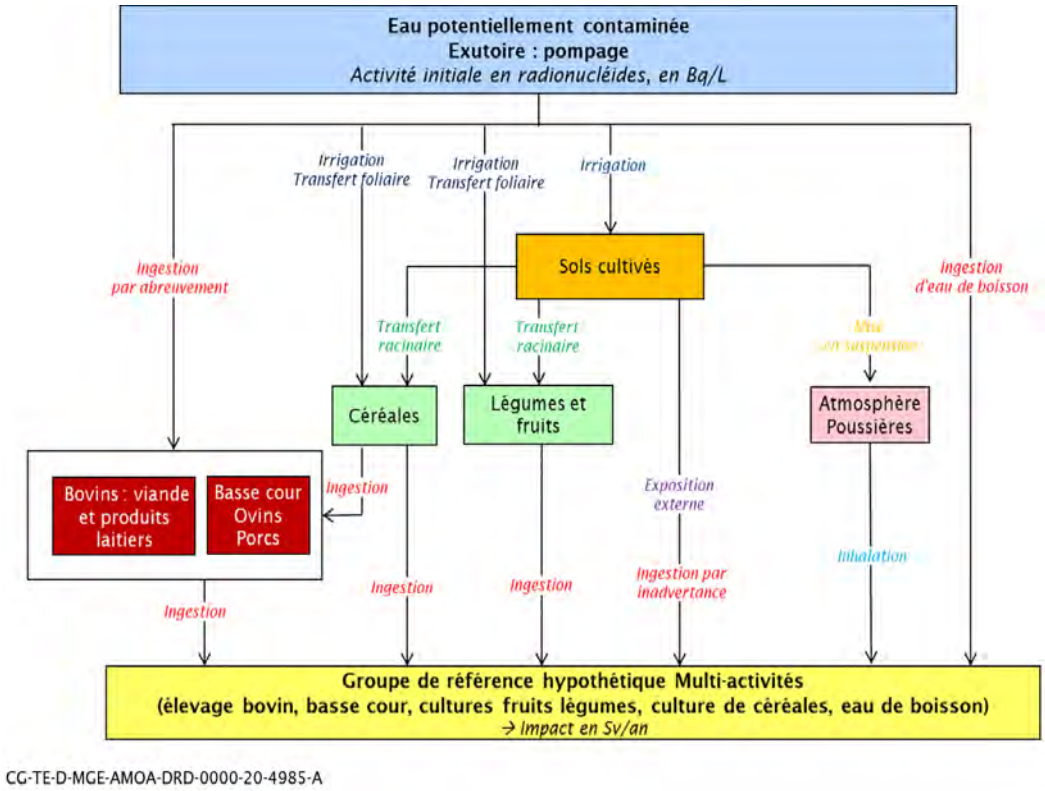


Figure 1-12 Schéma illustratif des transferts de solutés depuis un exutoire jusqu'à l'homme

L'ensemble des transferts identifiés sont ensuite paramétrés selon la connaissance acquise sur site ou le cas échéant selon des guides nationaux ou internationaux comme les CIPR. L'évaluation quantitative de ce modèle de transferts permet d'obtenir un « facteur de conversion biosphère » qui est utilisé pour évaluer la dose associée à chacun des radionucléides qui parvient aux exutoires sur la personne représentative du groupe.

Ce facteur de conversion biosphère est défini pour chaque radionucléide et est utilisé pour un même exutoire, une même biosphère type, et une même personne représentative indépendamment des situations du scénario d'évolution normale ou des scénarios SEA, *What-if* ou scénario d'intrusion humaine induisant un transfert par l'eau[28].

[28] À titre d'illustration, pour la même biosphère type, le même exutoire, et la même personne représentative, le même facteur de conversion biosphère est utilisé pour évaluer la dose associée à chacun des radionucléides

1.5.2.3 Les enseignements tirés des évaluations des incidences sur la santé de l'homme aux exutoires

L'analyse détaillée des résultats d'évaluation des incidences sur la santé de l'homme liées aux transfert potentiels de quelques radionucléides mobiles à vie longue aux différents exutoires permet de vérifier la conformité aux objectifs de protection définis (rappelés ci-avant).

Outre la vérification de la conformité aux objectifs de protection, les résultats peuvent être utilisés pour analyser l'incidence des choix de représentation de la ou des biosphère(s) et des choix de définition des groupes de référence hypothétiques incluant les différentes classes d'âge et leur régime alimentaire.

1.5.3 L'apport des études de sensibilité

Le guide de sûreté n°1 de l'ASN de 2008 (1) recommande que « *des études de sensibilité devront par ailleurs être effectuées afin de mettre en évidence les paramètres les plus importants et de justifier les hypothèses simplificatrices adoptées. Les analyses de sensibilité permettent d'identifier les points sur lesquels devraient porter en priorité l'effort de définition (situations prises en compte), de compréhension et de hiérarchisation des processus mis en jeu (modèles) ou de caractérisation (paramètres) pour accroître la crédibilité des résultats évaluations* ».

En cohérence avec ce guide de sûreté n°1 de l'ASN, des études de sensibilité non paramétriques ou multiparamétriques sont réalisées. L'objectif de ces études de sensibilité est d'évaluer, en faisant varier de manière physique le ou les paramètre(s), l'importance/le poids de ces paramètres dans les évaluations de sûreté et, le cas échéant, de supporter les choix faits de représentation des composants dans le scénario d'évolution normale et de ses situations associées. Les études de sensibilité peuvent également comporter des études sur l'influence de certains dispositifs de conception ou d'architecture.

Du fait de leurs objectifs, elles ne conduisent pas systématiquement à l'évaluation de l'impact radiologique, l'appréciation repose en premier lieu sur les indicateurs de performance exposés au chapitre 1.5.1.1 du présent volume.

Les études de sensibilité conduites dans le cadre du présent rapport sont présentées dans le chapitre 11 du présent volume.

1.5.4 Le schéma général de mise en œuvre des évaluations quantitatives

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

À ce stade, pour représenter le système global combinant toutes les échelles d'espace, l'Andra retient une décomposition du modèle numérique de représentation, qui comprend le milieu géologique multicouches (couche du Callovo-Oxfordien, encaissants sus- et sous-jacents), le stockage et ses composants ouvragés (colis, alvéoles, galeries, liaisons surface-fond…), en plusieurs compartiments

parvenant aux exutoires pour chacune des deux situations (référence et enveloppe). *A contrario*, pour un même exutoire mais pour deux biosphères types différentes, ou deux individus représentatifs différents, on obtient des facteurs de conversion différents du fait notamment d'un régime alimentaire différent et d'une irrigation différente.

d'échelles géométriques emboîtées et agencés en séquence de simulations. Ces compartiments vont de celui du colis à celui du milieu géologique comprenant le stockage, comme illustré sur la figure 1-14. Le sens de l'enchaînement entre les compartiments dépend du type de processus considéré (hydraulique ou transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques).

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

Le sens de l'enchaînement des modèles est inversé entre l'hydraulique et le transport des radionucléides et toxiques chimiques (cf. Figure 1-13) :

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

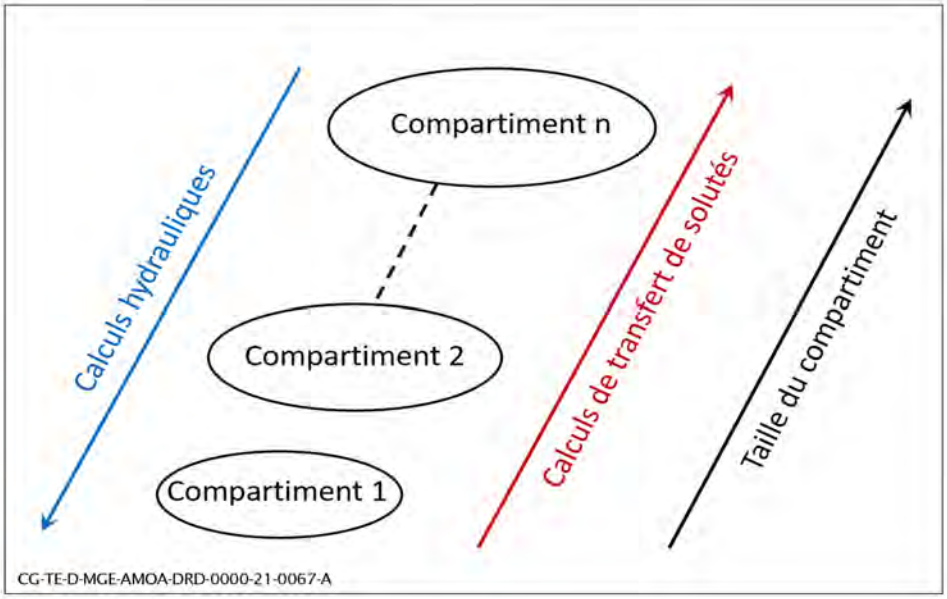


Figure 1-13 Enchaînement des modèles en hydraulique et en transfert de solutés

Comme le présente la figure 1-14, l'architecture de calcul se décompose en trois compartiments emboîtés d'échelle croissante et agencés en séquence :

- **modèle à l'échelle « colis-alvéole »** : sont représentés à cette échelle l'intégralité des éléments constituant l'alvéole HA ou MA-VL (conteneurs, jeux fonctionnels, béton de revêtement-soutènement, matériau compressible) et l'environnement en champ proche des alvéoles : zones à fracturation diffuse et connectée et Callovo-Oxfordien sain sur toute son épaisseur.

  Ce calcul à l'échelle de l'alvéole permet de quantifier (i) les débits molaires/massiques de solutés entrant dans le Callovo-Oxfordien et (ii) les débits molaires/massiques de solutés entrant dans la galerie d'accès pour l'alvéole HA et dans les galeries de liaison et de retour d'air pour l'alvéole MA-VL ;

- **modèle à l'échelle « stockage** » : il comprend les différentes zones de stockage avec l'ensemble des alvéoles de stockage, le système de galeries, les ouvrages de fermeture des galeries, les liaisons surface-fond (puits, descenderies) et leurs ouvrages de fermeture, ainsi que les zones de fracturation diffuse et connectée et la couche du Callovo-Oxfordien sur toute son épaisseur. Chaque alvéole est représenté de manière simplifiée mais néanmoins explicite afin de conserver au mieux la surface excavée totale et la quantité d'eau drainée en provenance du milieu géologique (*i.e.* Flux convectifs drainés par le stockage et cinétique convective).

  À cette échelle également, il est réalisé une quantification des deux voies de transfert des solutés que sont (i) la voie de transfert par le milieu géologique et (ii) la voie de transfert par les ouvrages de stockage. En évolution normale, la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est *a priori* nettement privilégiée ; il s'agit alors de vérifier que la voie de transfert par les ouvrages de stockage est faible et négligeable devant la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien ;
- **modèle à l'échelle « milieu géologique** » : ce modèle comprend les installations de stockage, la couche du Callovo-Oxfordien et ses encaissants sus- et sous-jacents jusqu'aux exutoires. La géométrie de chaque quartier de stockage est assimilée, de manière macroscopique, à une boîte de stockage parallélépipédique, enveloppe des alvéoles la constituant. Les débits molaires/massiques sortant des liaisons surface-fond (au toit du Callovo-Oxfordien) à l'échelle « stockage » sont appliqués directement à ce même endroit dans le milieu géologique multicouche sous forme d'un terme source volumique.

  À cette échelle, il est mis en évidence les débits molaires/massiques de solutés sortant au niveau des différents exutoires ou indicateurs, ceci dans le but de quantifier les impacts radiologiques et chimiques par la suite (modèle biosphère).

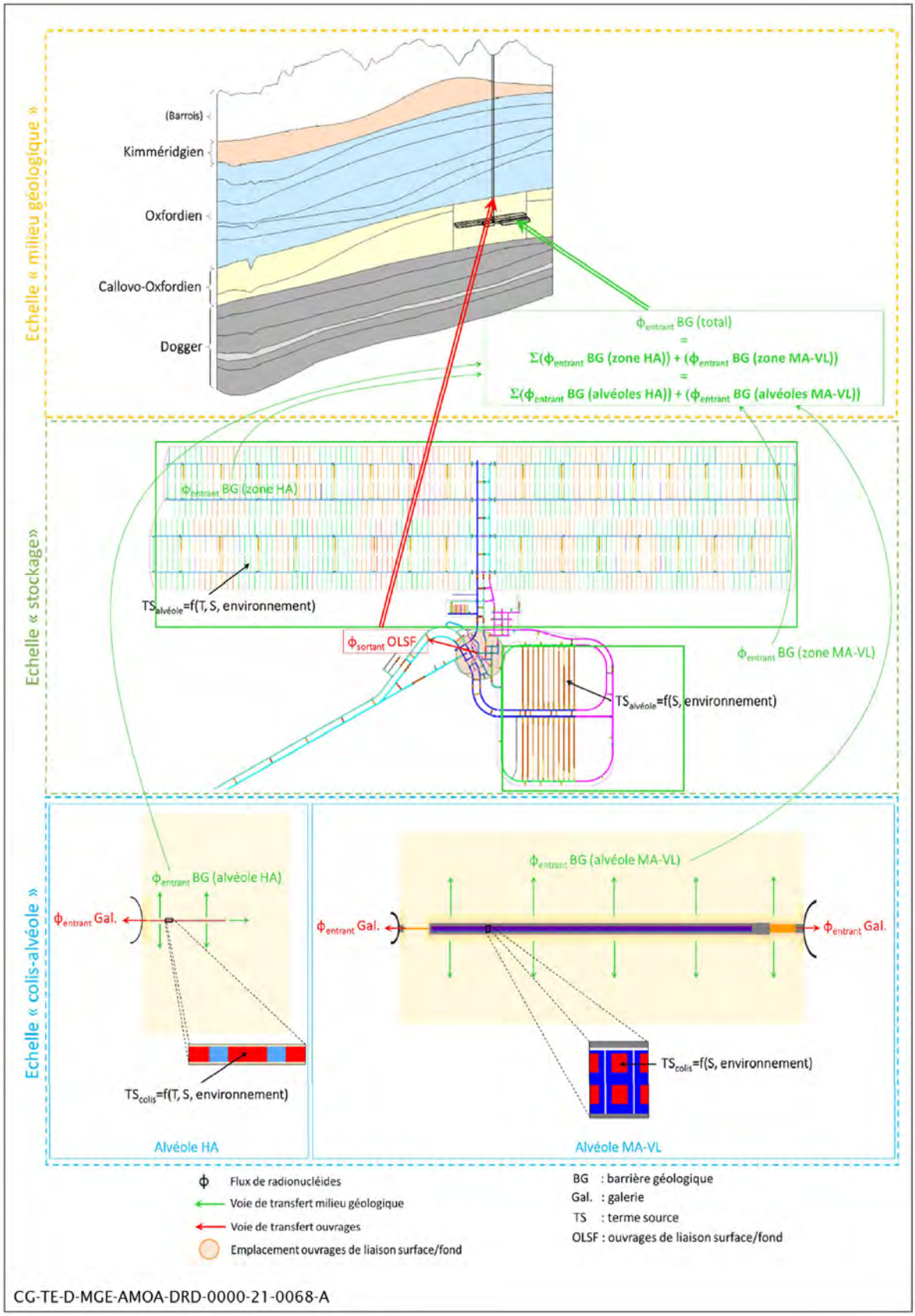


Figure 1-14 Principe de l'architecture de calcul par compartiments emboîtés

1.5.5 La maîtrise des outils de simulation

Les outils de simulation mis en œuvre pour l'évaluation quantitative de sûreté après fermeture font l'objet d'un processus rigoureux de sélection, de développement, de qualification et de validation. Ces outils sont notamment organisés et structurés dans le cadre de la plate-forme Cassandra (Codes appliqués à la simulation des stockages de l'Andra), qui a été développée pour les accueillir dans un cadre unifié (cf. Figure 1-15).

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

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

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

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

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

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

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

Dans la suite des évaluations précédentes, l'Andra a souhaité maintenir une logique de plate-forme pour la réalisation des évaluations de performance et de sûreté de la présente version préliminaire du rapport de sûreté. Afin de maîtriser de manière plus efficiente la totalité des développements, de les focaliser efficacement sur ses besoins et de disposer d'une portabilité et d'une ergonomie optimale, l'Andra a mis en place en propre la plate-forme simplifiée Cassandra, dont les fonctionnalités sont décrites ci-après.

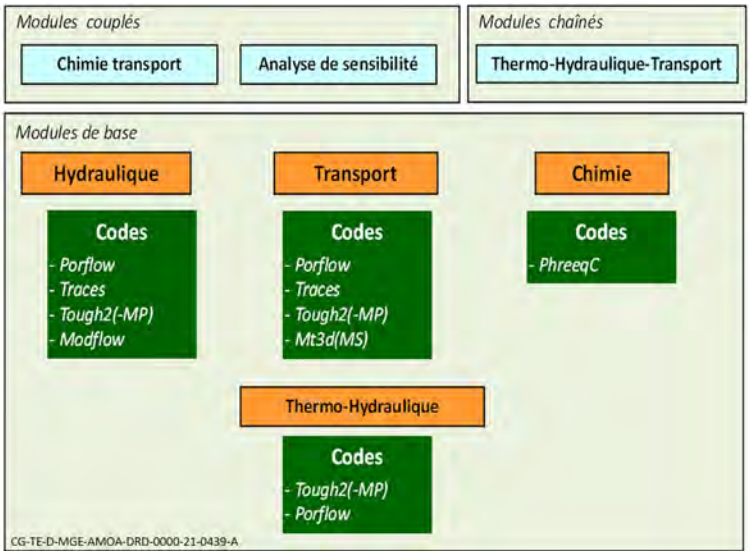


Figure 1-15 Architecture de la plateforme Cassandra

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

1.5.5.3 Une chaîne de simulation intégrée

Pour mener les simulations numériques, l'Andra a mis en œuvre un ensemble d'outils et d'opérations associées, de natures très différentes, suivant une chaine de simulation : (i) des outils de *pre-processing* (mailleurs, outils de gestion des données physiques, géométriques, DAO…), (ii) des outils de *processing* ou de résolution (les outils de calculs de la plate-forme Cassandra et hors Cassandra), et (iii) des outils de *post-processing* (exécutables d'extractions ou de conversion des informations, outils de post-traitement graphique…). Afin de réaliser et d'exploiter de manière simple, lisible, tracée et répétitive la chaîne de calcul des évaluations de sûreté en après fermeture, l'Andra a exploité un logiciel intégrateur dont les fonctionnalités sont décrites sur la figure 1-16.

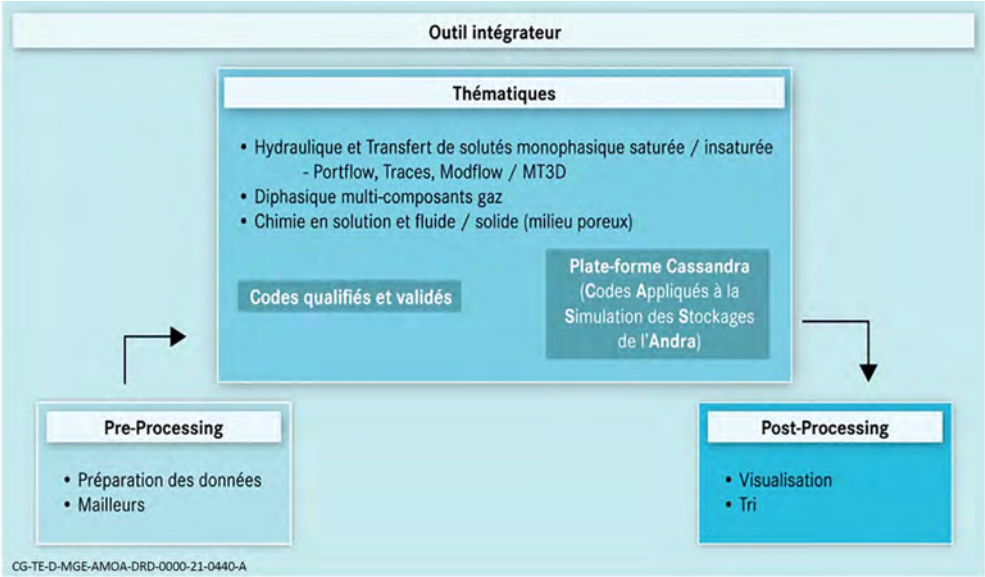


Figure 1-16 Chaîne de calcul intégrant les différents outils de simulation utilisée pour les évaluations de performance et de sûreté en après fermeture

2

L'analyse des risques et incertitudes

2.1 Les composants retenus pour l'analyse des risques et incertitudes 64
2.2 La couche du Callovo-Oxfordien 69
2.3 L'architecture 94
2.4 Les scellements des liaisons surface-fond et des galeries 100
2.5 Le transitoire Hydraulique – Gaz 115
2.6 Les ouvrages remblayés (galeries et descenderies) 123
2.7 Les alvéoles de stockage HA 127
2.8 Les alvéoles de stockage MA-VL 151
2.9 Les formations encaissantes 164
2.10 Les exutoires 169
2.11 Les biosphères 172
2.12 L'analyse spécifique des risques liés aux activités humaines après fermeture du stockage 174
2.13 L'analyse spécifique de l'aléa sismique sur le système de stockage 175

2.1 Les composants retenus pour l'analyse des risques et incertitudes

L'analyse des risques et incertitudes, ci-après, résulte de la déclinaison de la démarche[29] présentée au chapitre 1 du présent volume appliqué à la conception illustrée dans le volume 5 du présent rapport en s'appuyant sur les connaissances scientifiques et technologiques du système de stockage et de son évolution présentée au volume 7 du présent rapport.

Dans son déroulement, l'analyse focalise dans un premier temps sur les composants contribuant à la réalisation des principales fonctions de sûreté résultant de la déclinaison de l'objectif fondamental de protection de l'homme et de l'environnement (cf. Chapitre 1.1.2.2 du présent volume). Pour ces composants, est d'abord analysée l'influence des risques et incertitudes résiduelles sur leurs caractéristiques intrinsèques puis l'influence des processus et phénomènes générés par les composants environnants (dits risques internes, *e.g.* Thermique, hydraulique-gaz, mécanique, chimiques, radiologiques et bactériologiques, cf. Chapitre 1.4.1.2 du présent volume). Le cas échéant certains risques internes sont analysés vis-à-vis du système de stockage dans son ensemble, c'est le cas du transitoire hydraulique-gaz (cf. Chapitre 2.5 du présent volume). Les risques externes (géodynamique, érosion, évolutions climatiques, intrusion humaines involontaires) sont ensuite abordés.

L'analyse intègre également les composants ne contribuant pas directement à la réalisation des fonctions de sûreté mais nécessaires aux évaluations quantitatives car ils peuvent constituer une voie de transfert. L'analyse des formations su- et sous-jacentes au Callovo-Oxfordien et la biosphère, est conduite dans ce cadre.

L'analyse intègre également l'analyse des incertitudes résiduelles sur les données d'entrée relatives aux colis stockés. Ce sont les inventaires en radionucléides et substances toxiques chimiques et le relâchement de ces éléments en conditions de stockage.

2.1.1 Les composants contribuant à la réalisation des fonctions

L'analyse vise à examiner si des risques et incertitudes résiduelles de connaissances scientifiques et technologiques peuvent engendrer un risque de perte des fonctions de sûreté fondamentales. Elle conduit ainsi, sur la base de la connaissance acquise, à examiner :

- d'une part le risque de non-isolation du stockage des phénomènes de surface et des actions humaines ;
- d'autre part le risque de non-limitation du transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets vers la biosphère.

L'analyse des risques et incertitudes relative à la fonction « Limiter le transfert jusqu'à la biosphère des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets », tel qu'illustré en figure 2-1 porte ainsi sur :

- la couche du Callovo-Oxfordien qui est le composant central pour la sûreté après fermeture du stockage dont les caractéristiques favorables contribuent à la réalisation des fonctions de sûreté en particulier vis-à-vis du retard à la migration qu'elle offre.

  L'analyse distingue la couche du Callovo-Oxfordien saine et la zone endommagée mécaniquement lors du creusement des ouvrages. L'analyse intègre dans un second temps l'influence des processus internes en regard de la sous-fonction « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture » ;

[29] L'analyse menée dans le cadre du présent dossier de demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo s'appuie sur celle conduite pour le « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (2). En sus des éléments présentés dans ce document, l'analyse intègre des sujets faisant l'objet de D&E de l'ASN, le cas échéant de nouveaux éléments de connaissances acquis depuis le Dossier d'options de sûreté – Partie après-fermeture.

- les composants ouvragés du stockage :
  - ✓ l'architecture illustrative à terminaison de l'installation souterraine :

    L'analyse conduite vis-à-vis de l'architecture renvoie aux modalités de gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception ;
  - ✓ les scellements des ouvrages :

    L'analyse distingue les scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderie), des scellements de galeries dans l'installation fond. L'analyse porte sur tous les (sous)composants et interfaces contribuant à l'atteinte des performances spécifiées dans les exigences applicables à l'INB Cigéo ;
  - ✓ les composants des alvéoles de stockage HA :

    L'analyse porte sur les composants de la partie utile de l'alvéole HA contribuant à la réalisation des (sous)fonctions de sûreté en après fermeture, à savoir les déchets (inventaires, modèles de relâchement), le conteneur de stockage HA, les vides résiduels de l'alvéole où peuvent se produire des processus de précipitation et le matériau de remplissage de l'espace annulaire à l'extrados du chemisage (MREA), et sur la tête d'alvéole HA comprenant le dispositif de fermeture de l'alvéole ;
  - ✓ les composants des alvéoles de stockage MA-VL :

    L'analyse porte sur les composants de la partie utile de l'alvéole MA-VL contribuant à la réalisation des (sous)fonctions de sûreté en après fermeture, à savoir déchets (inventaires et modèles de relâchement) et les structures en béton (voussoirs, radier, parois internes, voûte) et les vides résiduels de l'alvéole où peuvent se produire des processus de précipitation ;
  - ✓ les remblais des galeries et des liaisons surface-fond qui contribuent à préserver les propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien.

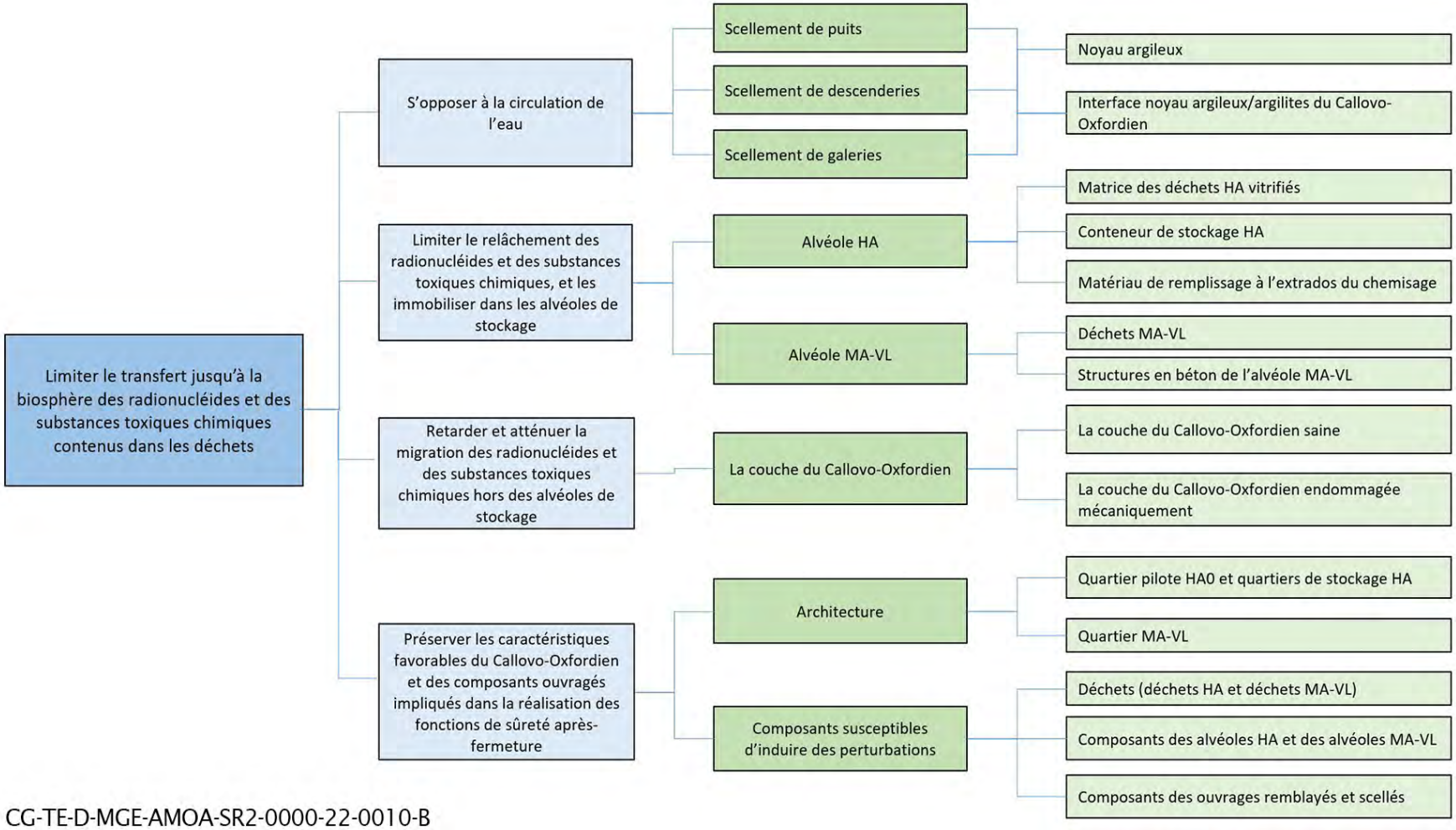


Figure 2-1 Illustration schématique des composants analysés en regard de leur contribution principale aux (sous)fonctions de sûreté après fermeture

2.1.2 Les composants ne contribuant pas à la réalisation des fonctions de sûreté

Les composants ne contribuant pas directement à la réalisation de fonctions de sûreté sont intégrés dans l'analyse des risques et incertitudes car ils peuvent intervenir en tant que voie de transfert des solutés ou engendrer des perturbations susceptibles d'affecter les propriétés des composants voisins. Ce sont (cf. Figure 2-2) :

- les composants des parties remblayées des galeries et des liaisons surface-fond (hors remblais). Ces composants ne contribuent pas directement aux fonctions de sûreté mais ils constituent une voie de transfert potentielle des radionucléides par la voie ouvrage ;
- le chemisage de l'alvéole HA et le dispositif de fermeture de l'alvéole qui constituent sur le long terme des voies de transfert potentielles des radionucléides soit vers la couche du Callovo-Oxfordien, soit vers les galeries par le dispositif de fermeture ;
- le conteneur de stockage MA-VL et le dispositif de fermeture de l'alvéole MA-VL ;
- les formations encaissantes supérieures et inférieures à la couche du Callovo-Oxfordien, qui constituent des voies de transfert vers les exutoires et la biosphère ;
- l'identification et le choix des exutoires qui prennent en compte des risques externes (comme la géodynamique) et des incertitudes résiduelles de connaissance sur l'hydrogéologie ;
- l'identification et le choix des biosphères types qui prennent en compte des risques externes (comme l'évolution climatique) et des incertitudes résiduelles de connaissance sur leur évolution sur le long terme.

L'analyse menée vis-à-vis de ces composants intègre le panorama des risques et incertitudes présentés au chapitre précédent mais il est à noter qu'un focus est fait sur les risques liés à des aléas d'origine externe liés aux évolutions des évènements climatiques et géodynamiques, y compris les effets anthropiques sur le climat et l'environnement dans ce cadre.

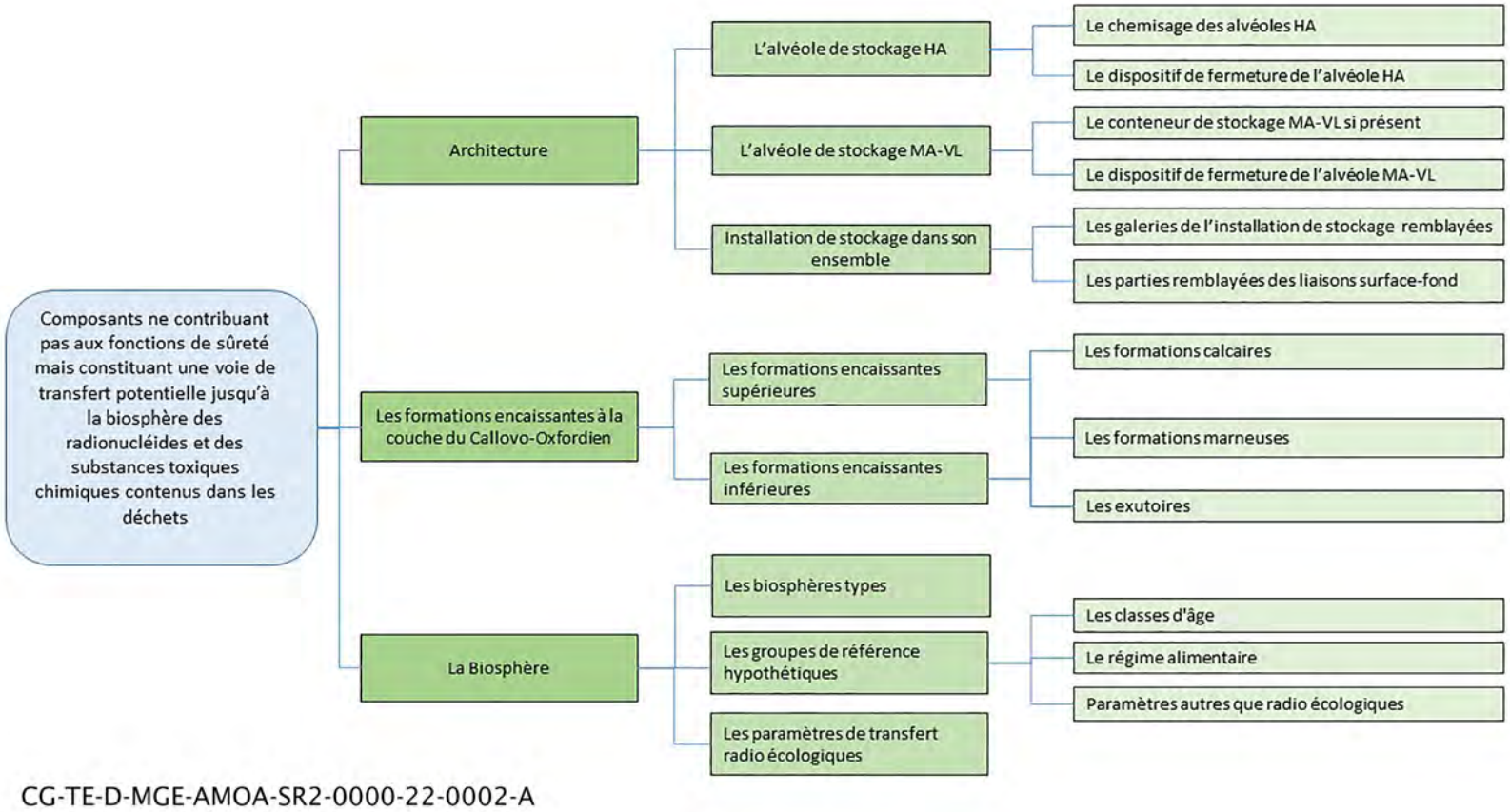


Figure 2-2 Illustration schématique des composants analysés ne contribuant pas à la réalisation des fonctions de sûreté après fermeture mais constituant une voie de transfert potentielle

2.2 La couche du Callovo-Oxfordien

Du fait de ses caractéristiques géométriques et physico-chimiques intrinsèques (profondeur, épaisseur, faible perméabilité, capacité de rétention élevée, faibles coefficients de diffusion…), la couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle sont implantés les ouvrages souterrains constitue le composant central pour assurer la sûreté passive après-fermeture du stockage et à très long terme.

La réalisation des principales fonctions de sûreté après fermeture repose ainsi sur les caractéristiques intrinsèques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien. Tel qu'indiqué dans le volume 2 et le volume 5 du présent rapport, il en résulte des exigences parfois spécifiées afin de préserver ces caractéristiques favorables.

Pour réaliser l'analyse des risques et incertitudes, il est considéré que la couche du Callovo-Oxfordien correspond à la formation non endommagée mécaniquement[30]. L'approche permet de focaliser l'analyse sur les caractéristiques intrinsèques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien en regard de la fonction « *Limiter le transfert jusqu'à la biosphère des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets »,* et en particulier de la (sous)fonction « *Retarder et atténuer la migration des radionucléides et toxiques chimiques* ».

Les diverses sollicitations (thermiques, mécaniques, chimiques, hydraulique-gaz…) générées par les divers composants de l'installation de stockage durant les différentes phases de vie de l'installation sont analysées dans un deuxième temps en regard de la fonction *« Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »* tel qu'indiqué au chapitre 1.1.2.2 du présent volume.

Pour mémoire, l'analyse de la fonction « *Isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines* », fait l'objet d'une analyse spécifique en regard du risque d'intrusions humaines involontaires (cf. Chapitre 2.12 du présent volume).

2.2.1 L'analyse des caractéristiques intrinsèques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien

Comme mentionné dans le volume 4 du présent rapport et le « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (25), la couche du Callovo-Oxfordien bénéficie d'une importante caractérisation aux échelles régionales, de la zone de transposition (ZT), de la Zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) au travers :

- de campagnes de mesures en forages et sur échantillons carottés sur la zone de transposition ;
- de la campagne de sismique 3D menée sur la Zone d'implantation et de recherche approfondie ;
- des expérimentations conduites au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Le corpus de connaissance acquis depuis plus de 25 ans sur la géométrie, la structure de la couche du Callovo-Oxfordien et son pendage fourni une caractérisation détaillée de cette couche et confirment l'homogénéité latérale de la formation et son épaisseur importante, plus de 140 mètres, sur la ZIRA.

Les incertitudes résiduelles résident sur le positionnement exact du toit et du mur de la couche du Callovo-Oxfordien dans la ZIRA, ainsi que son épaisseur exacte dans cette zone (25), aucune reconnaissance intrusive n'étant permise dans la ZIOS. Les études conduites ont néanmoins permis de quantifier ces incertitudes, elles sont estimées de l'ordre d'une dizaine de mètres, et de fournir une gamme d'épaisseur sur toute la ZIOS. Ces incertitudes résiduelles sont gérées par conception en fixant une exigence d'épaisseur minimale de garde (50 mètres) de la couche du Callovo-Oxfordien sain de part et d'autre des quartiers de stockage.

[30] La notion de Callovo-Oxfordien sain renvoie à l'exigence amont de préserver une épaisseur de 50 mètres de Callovo-Oxfordien sain au droit des alvéoles de stockage.

En effet, la conception de l'architecture fond du centre de stockage Cigéo, prend en compte ces données de manière à préserver l'épaisseur de garde minimum tout en tenant compte du pendage de la formation et de la variation de son épaisseur sur la ZIOS. Conformément à l'approche, cette exigence est intégrée à la situation enveloppe du scénario d'évolution normale (SEN).

L'ensemble des investigations menées (forages et sismiques) témoignent de l'absence de fractures de rejet supérieur à deux mètres sur la zone d'implantation et de recherche approfondie. En particulier, les résultats de la sismique 3D dans la zone d'implantation et de recherche approfondie montrent l'absence d'accident décamétrique en planimétrie et de rejet supérieur à 2-4 mètres dans la couche du Callovo-Oxfordien. Aucune structure susceptible de jouer un rôle hydraulique n'a été observée (25, 31). Par ailleurs, les connaissances acquises et les analyses menées depuis le Dossier d'options de sûreté – Partie après-fermeture permettent d'exclure toute discontinuité de type flexure.

Les connaissances acquises permettent donc de disposer d'un ensemble de données d'entrées importantes et robustes à différentes échelles de la couche du Callovo-Oxfordien pour les évaluations quantitatives de sûreté après fermeture. Ces connaissances permettent une représentation homogène de la couche du Callovo-Oxfordien verticalement et latéralement du point de vue de ses caractéristiques hydrauliques (conductivité hydraulique, porosité cinématique), du transport (coefficient de diffusion, porosité accessible) et de la rétention chimique des radionucléides (sorption et précipitation) et exempte de discontinuités dans le scénario d'évolution normale.

Une incertitude résiduelle concerne la présence ou non, au sein de la pile sédimentaire, de failles sub-sismiques ayant une hauteur inférieure à 40 mètres et un rejet inférieur à 2 mètres. Cependant, au vu de l'ensemble des travaux qui ont été menés sur le Laboratoire souterrain et ses alentours (puits d'accès, forages verticaux et déviés, ensemble des galeries), aucune structure de ce type pouvant avoir un impact sur la géométrie des couches n'a été identifiée et la présence telles structures sur la ZIOS est jugée comme très peu vraisemblable. Du fait de ce corpus de connaissances, une discontinuité verticale de type faille de rejet inférieur à 2 mètres, et qui n'aurait pas été détectée est très peu vraisemblable. Ces acquis avaient conduit à postuler cet événement dans le cadre d'un scénario de type *What-if* (cf. « Dossier d'options de sûreté – Partie après-fermeture » (2), volume III chapitre 1.2.3). Pour donner suite à l'instruction du dossier d'options de sûreté, ce scénario *What-if*, a fait l'objet d'une demande et engagement. Les analyses conduites depuis ce dossier ont permis de consolider le caractère très peu vraisemblable d'une discontinuité traversant la couche du Callovo-Oxfordien (25, 31). La prise en compte d'une discontinuité verticale qui n'aurait pas été reconnue et pouvant être hydrauliquement active est « *postulée* » dans le cadre d'un scénario *What-if* défini de manière conventionnelle ce qui permet de répondre à la demande formulée par l'ASN (cf. Tableau 2-1).

Les connaissances acquises et les analyses menées depuis le « Dossier d'options de sûreté -Partie après fermeture » (2) ont permis de conforter les éléments suivants :

- vis-à-vis de la surpression interstitielle naturelle dans la couche du Callovo-Oxfordien :
  - ✓ si des incertitudes résiduelles persistent sur les causes possibles de cette surpression, il n'est pas attendu qu'elle soit d'origine hydraulique. En effet, la connaissance acquise indique que les causes ne générant pas de déplacement d'eau par gradient de pression sont à privilégier comme contributeurs majeurs. Les études menées montrent que la surpression ne participerait pas, ou que très marginalement, au transfert des solutés à grande échelle dans la couche du Callovo-Oxfordien ce qui est en accord avec les observations sur les traceurs naturels montrant un transfert diffusif dominant. La surpression n'est donc pas représentée explicitement dans les scénarios après fermeture ;
  - ✓ afin d'évaluer le poids des paramètres influents/sensibles et d'évaluer la robustesse du système de stockage, une étude de sensibilité prospective est effectuée considérant, notamment en situation enveloppe, une valeur extrême de moteur hydraulique sans fondement physique (perméabilité et gradient de charge à leur valeur maximale) pour le scénario d'évolution normale mais également les SEA et *What-if* de dysfonctionnement des scellements (cf. Chapitre 11 du présent volume) ;

- vis-à-vis de la perméabilité à l'eau de la couche du Callovo-Oxfordien en grand (25). Compte tenu des acquis de connaissances, les incertitudes résiduelles sur la perméabilité (en grand) de la couche du Callovo-Oxfordien (de l'ordre de 10^{-13} m.s^{-1}) à l'échelle de la zone de transposition et donc de la ZIOS, sont considérées comme limitées. La connaissance acquise permet d'avoir une gamme de valeur de perméabilité en grand représentative de la couche du Callovo-Oxfordien. Elles sont intégrées dans les situations du scénario d'évolution normale selon les modalités définies au chapitre 1 du présent volume ;
- vis-à-vis du coefficient de diffusion des éléments dans la couche du Callovo-Oxfordien. Les études conduites depuis le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2) ont visé à diminuer les incertitudes résiduelles sur les éléments dont le coefficient de diffusion est le plus sensible à étudier expérimentalement en lien avec la maîtrise du milieu oxydo-réducteur, de leur spéciation (comme le sélénium) et leur capacité à interagir (essentiellement des métaux de transition, les lanthanides, les actinides…). Les mesures permettent de valider les analogies de comportement prises avec des éléments qui ont fait l'objet de mesures plus nombreuse à l'échelle de la formation (par exemple le chlore) (cf. Volume 4 du présent rapport) ;
- vis-à-vis de la porosité cinématique de la couche du Callovo-Oxfordien. La porosité cinématique correspond à la fraction de la porosité totale susceptible d'être empruntée par un écoulement convectif. Les études conduites depuis le « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (2) ont visé à conforter la gamme de valeur de la porosité cinématique (25, 32), celle-ci étant estimée représenter entre 40 % et 60 % de la porosité accessible à l'eau, c'est-à-dire de la porosité totale. De manière générale, plus faible est la porosité cinématique, plus grande est la vitesse de l'eau et donc du transport des radionucléides dissous. La connaissance acquise permet d'avoir une gamme de valeur de porosité cinématique (cf. Volume 7 du présent rapport). Les incertitudes résiduelles relatives à la porosité cinématique sont gérées en situation enveloppe du SEN ;
- vis-à-vis du gradient de charge hydraulique (cf. Volume 7 du présent rapport). Dans la couche du Callovo-Oxfordien, l'eau peut se déplacer verticalement par drainance selon le sens du gradient imposé par la différence de charge hydraulique entre les formations encaissantes sus- et sous-jacentes (25, 33). L'analyse du gradient de charge hydraulique dans la couche du Callovo-Oxfordien est intégrée dans le chapitre 2.9 du présent volume relatif aux formations sus- et sous-jacentes à la couche du Callovo-Oxfordien ;
- vis-à-vis de la migration des radionucléides, les acquis depuis le « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (2) concernent essentiellement la spéciation et les effets associés en termes de mobilité des deux éléments suivants (32) :
  - ✓ le sélénium 79. Si le sélénium peut présenter des états d'oxydation multiples dans l'eau porale des argilites (32), les processus de réduction de son état d'oxydation +VI (le plus mobile) vers des degrés d'oxydation inférieurs restent à ce jour non démontrés dans le contexte des argilites (argilites non perturbées en champs lointain). Des incertitudes subsistent sur le comportement du sélénium dans l'environnement spécifique de l'alvéole HA en termes de solubilité et de potentiel réduction du Se(+VI). Le traitement de ces incertitudes pourrait potentiellement conduire à limiter les flux en Se vers le Callovo-Oxfordien, cependant, les éléments disponibles à ce stade ont conduit à considérer que la fraction de Se(+VI) qui parvient à la couche du Callovo-Oxfordien, la traverse sans changer de spéciation et migre sans sorption et avec une solubilité infinie ;
  - ✓ l'uranium. La spéciation de l'uranium, en particulier son état d'oxydation, est fortement dépendant du milieu oxydo-réducteur. Les propriétés de sorption de l'uranium ont été caractérisées expérimentalement en fonction du milieu oxydo-réducteur du Callovo-Oxfordien (32). Ces expérimentations ont permis de définir une gamme élargie de valeurs de sorption (Kd). Elle est intégrée dans les situations du scénario d'évolution normale selon les modalités présentées au chapitre 1 du présent volume.

LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN

En regard des travaux de caractérisation menés depuis plus de 25 ans, le niveau de confiance sur les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien est important et les incertitudes résiduelles limitées (cf. Tableau 2-1). Les modalités de gestion sont les suivantes :

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Les incertitudes résiduelles en lien avec la position exacte du toit et du mur du Callovo-Oxfordien et, en corollaire, son épaisseur dans la ZIOS, est gérée par conception en fixant une exigence spécifiée d'épaisseur minimale de Callovo-Oxfordien sain de 50 mètres de part et d'autre des quartiers de stockage ;
- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Le corpus de connaissance permet de disposer de gammes de valeurs sur la profondeur, la géométrie, l'épaisseur, les caractéristiques d'écoulement, de transport et de rétention chimique qui contribuent à retarder et limiter le transfert jusqu'à la biosphère des radionucléides et des substances toxiques chimiques ;
  - ✓ ces acquis permettent une représentation homogène de la couche du Callovo-Oxfordien verticalement et latéralement du point de vue de ses caractéristiques hydrauliques, du transport et de la rétention chimique des radionucléides (sorption et précipitation) et exempte de discontinuités ;
  - ✓ les gammes de valeurs acquises sont prises en compte dans les situations (référence et enveloppe) du scénario d'évolution normale selon la démarche présentée au chapitre 1.3.2.1 du présent volume ;
- **les études de sensibilité**

  Afin d'évaluer le poids des paramètres influents/sensibles et d'évaluer la robustesse du système de stockage, une étude de sensibilité prospective est effectuée considérant une valeur extrême de moteur hydraulique sans fondement physique (valeurs de perméabilité et gradient de charge maximales) ;
- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  La prise en compte d'une discontinuité verticale qui n'aurait pas été reconnue et pouvant être hydrauliquement active est postulée dans le cadre d'un scénario *What-if* défini de manière conventionnelle.

Tableau 2-1 *Synthèse des risques et des incertitudes résiduelles relatives aux caractéristiques intrinsèques du Callovo-Oxfordien et de leurs modalités de gestion*

Fonction de sûreté : « Retarder et atténuer la migration des radionucléides »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien	**Incertitude sur la profondeur du toit et du mur du Callovo-Oxfordien et sur son épaisseur**	Exigence spécifiée d'une épaisseur minimale de Callovo-Oxfordien sain de part et d'autre des quartiers de stockage HA et MA-VL	Intégration de l'exigence spécifiée d'une épaisseur minimale en situation enveloppe du SEN
	Risque de présence d'une discontinuité verticale qui n'aurait pas été détectée	/	Scénario *What-if* qui postule une discontinuité non détectée
	Incertitude sur l'influence de la surpression hydraulique	/	Sensibilité en SEN, et pour les SEA et What-if de dysfonctionnement des scellements.

2.2.2 L'analyse des perturbations susceptibles d'impacter les performances de la couche du Callovo-Oxfordien

Tel que mentionné en introduction à ce chapitre, sont examinés vis-à-vis des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien tous les « risques internes » qui correspondent aux processus et/ou phénomènes d'origine interne. De manière générique ce sont tous les processus thermique, hydraulique-gaz, mécanique, chimiques, bactériologique et radiologiques (THGMCBR), et leurs éventuelles interactions.

L'analyse des risques associés aux processus et/ou phénomènes d'origine interne et leurs éventuelles interactions impose de considérer les dimensions spatio-temporelles des phénomènes susceptibles de se produire au cours de l'évolution du stockage.

Sur la base des différentes phases du projet (conception, construction, fonctionnement puis fermeture) et de la description de l'évolution du stockage sur le long terme (volume 7 du présent rapport) sont considérés successivement :

- les perturbations mécaniques dues au creusement des ouvrages puis leurs évolutions au cours du temps ;
- les perturbations thermo-hydro-mécaniques (THM) de la couche du Callovo-Oxfordien en lien avec la puissance thermique apportée par les déchets et le dimensionnement THM associé ;
- les perturbations issues de la ventilation pendant la phase de fonctionnement ;
- la perturbation liée au transitoire hydraulique-gaz associée à la production de gaz (essentiellement par corrosion des matériaux métalliques en conditions anoxiques) ;
- en lien avec l'arrivée de l'eau et l'initiation des processus de dégradation des matériaux de toute nature, sont considérées les perturbations suivantes :
  - ✓ la perturbation alcaline liée à l'interface entre les argilites avec des matériaux cimentaires ;
  - ✓ des perturbations chimiques liées à la dégradation des déchets MA-VL dont la nature dépend des différentes catégories physico-chimiques présentes dans les différentes typologies des déchets MA-VL ;

- l'activité bactérienne ;
- le transport par colloïdes ;
- les perturbations liées à la présence de matières fissiles dans les colis de déchets.

Les risques d'origine externe sont analysés dans des chapitres spécifiques à savoir le risque lié aux activités humaines au chapitre 2.12 et le risque sismique au chapitre 2.13 du présent volume. Le Callovo-Oxfordien étant isolé des phénomènes de surface, les risques liés aux évolutions climatiques ne sont pas examinés.

2.2.2.1 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien

2.2.2.1.1 L'endommagement initial et le comportement différé

Le comportement à long terme des argilites endommagées mécaniquement est décrit dans le volume 7 du présent rapport et les documents du socle de connaissance (cf. Le « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » et le référentiel, tome IV « Le comportement thermo-hydro-mécanique des formation géologiques » (25, 34).

Les opérations de construction du stockage induisent un endommagement mécanique des argilites. Les nombreuses mesures et expérimentations conduites au Laboratoire souterrain fournissent un corpus de connaissances important sur les caractéristiques de la zone d'argilites endommagée mécaniquement, en champ proche des ouvrages (notamment en termes d'extension, de structure et de conductivité hydraulique à l'eau), tant dans l'unité argileuse (UA) où serait construit le centre de stockage Cigéo que dans l'unité silto-carbonatée (USC)/unité de transition (UT) où seraient construits les scellements des liaisons surface-fond.

Ces acquis concernent :

- les grands mécanismes qui pilotent le comportement mécanique dans les différentes unités qui composent la couche du Callovo-Oxfordien. La connaissance acquise depuis plus de 20 ans au Laboratoire souterrain a permis d'établir un modèle conceptuel de développement de la zone endommagée autour des ouvrages en lien avec les contraintes mécaniques majeures naturelles dans la couche du Callovo-Oxfordien :
  - ✓ dans l'unité argileuse (UA), la zone d'argilites endommagées mécaniquement est ainsi composée en une zone fracturée connectée (ZFC) et une zone à fracturation discrète (ZFD) ;
  - ✓ dans l'unité USC/UT, La fracturation est très différente de celle observée dans l'UA. Elle est très hétérogène, peu dense et discontinue, et d'extension beaucoup plus faible ;

  Ces acquis permettent d'évaluer l'extension de l'endommagement mécanique en fonction de la dimension excavée de l'ouvrage (*i.e.* Diamètre), de son orientation par rapport à la direction de la contrainte horizontale naturelle majeure et de l'unité de la couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle l'ouvrage est réalisé ;
- l'influence des différentes techniques de creusement et de revêtement-soutènement vis-à-vis de l'endommagement mécanique de la roche en champ proche des ouvrages. La connaissance acquise, notamment au Laboratoire souterrain montrent le peu d'effet de ces techniques sur le modèle d'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien.

  Il y a donc peu d'incertitudes résiduelles sur la fracturation induite par le creusement des ouvrages que ce soit dans l'UA ou l'USC. Les incertitudes résiduelles à ce stade (25) concernent :
  - ✓ la valeur de la contrainte horizontale majeure par rapport à la contrainte horizontale mineure qui ne peut pas être mesurée directement. Un ratio majorant σ_H/σ_h de 1,3 est pris en compte afin de couvrir cette incertitude dans le modèle conceptuel ;
  - ✓ les mécanismes à l'origine de l'état des contraintes *in situ* anisotrope dans le Callovo-Oxfordien à l'actuel. Cette incertitude est couverte par la prise en compte de l'anisotropie lors du dimensionnement des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo ;

- ✓ l'effet de la vitesse d'excavation sur la zone fracturée. En effet, les vitesses de creusement au Laboratoire de recherche souterrain sont plus faibles que celles industrielles. Toutefois, il est très peu probable que des vitesses plus élevées conduisent à une fracturation significativement différente de celle observée au laboratoire de recherches ;
- ✓ la représentation spatiale de la relation entre l'endommagement et l'alternance de niveaux plus ou moins carbonatés dans l'USC.

Selon le « Recueil de fiches bilan scientifiques et techniques » (25), ces incertitudes résiduelles ne sont pas de nature à remettre en cause le schéma conceptuel de représentation général de l'endommagement que ce soit dans l'UA ou dans l'USC/UT. Le modèle conceptuel de représentation de la zone endommagée des argilites intègre ces incertitudes.

L'ensemble des acquis permet de prendre en compte les processus d'auto-colmatage et de cicatrisation hydraulique pour définir les caractéristiques hydro-dispersives des ZFC et ZFD sur le long terme. Les acquis de connaissances sur la conductivité hydraulique de la ZFD montrent que ses caractéristiques hydrauliques sont proches de la roche saine. En particulier, dans l'unité argileuse de la couche du Callovo-Oxfordien, le phénomène d'auto-colmatage des fractures en lien avec la présence de smectites, minéraux gonflants, dans les argilites a été observé à différentes échelles spatiales. En association aux dispositions prises pour limiter les déformations de la zone endommagée, l'auto-colmatage conduit à une cicatrisation hydraulique des fractures de la zone endommagée, notamment la zone fracturée connectée (ZFC).

Les incertitudes résiduelles sur la cicatrisation hydraulique et le comportement différé concernent :

- dans l'UA, les incertitudes résiduelles sur l'auto-colmatage des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien sont considérées comme faibles (25). De manière prudente, le cas d'une évolution potentielle défavorable des argilites endommagées mécaniquement au droit des scellements pouvant conduire à une dégradation de leur performance est envisagé dans le cadre d'un scénario d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des scellements (cf. Chapitre 2.4 du présent volume) ;
- dans l'USC/UT, l'auto-colmatage en lien avec la variabilité de la teneur en carbonates, cette incertitude n'est pas de nature à remettre en cause l'absence de zone endommagée dans l'USC/UT du même type que celle de l'UA. La présence de ce type d'endommagement dans l'USC/UT est jugée peu vraisemblable. Cette incertitude est couverte à travers un SEA de dysfonctionnement des scellements (cf. Encadré chapitre 2.4 du présent volume) ;
- le modèles élasto-viscoplatiques prenant en compte l'anisotropie mécanique ne considère pas d'évolution du module d'Young dans les zones plastifiées *in situ* par essais à la plaque. Il a été montré que la rigidité de la zone fracturée était plus faible que celle du Callovo-Oxfordien « sain » du fait de la présence des fractures qu'il faut refermer. Ce processus n'est pas pris en compte dans la modélisation ce qui signifie qu'elle tend à surestimer le chargement des structures. Les approches discrètes, avec la présence explicite de fractures, devraient permettre une meilleure représentation du comportement de la zone fracturée, mais la difficulté reste avec cette approche la modélisation du creusement avec l'apparition des fractures lors du passage d'un milieu continu à un milieu discontinu. Cette incertitude est couverte par le dimensionnement des structures en cohérence avec l'approche considérée (25) ;
- la présence ou non d'un seuil de fluage où les déformations différées s'arrêteraient. L'évolution des déformations autour des ouvrages montre, sur la durée de suivi, une décroissance des vitesses de déformation sans pour autant que celles-ci s'arrêtent. Cette incertitude est couverte par le dimensionnement qui ne prend pas en compte de seuil, ce qui conduit à un chargement plus important du revêtement-soutènement (25).

L'ENDOMMAGEMENT MÉCANIQUE DES ARGILITES DU CALLOVO-OXFORDIEN

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Les incertitudes de connaissance sont couvertes par le dimensionnement des ouvrages du centre de stockage Cigéo qui prennent en compte l'anisotropie de l'état des contraintes mécaniques naturelles et ne prend pas d'évolution du module d'Young dans les zones plastifiées (35) ;

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Les acquis de connaissances, notamment au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne ont permis d'établir un modèle conceptuel de développement de la zone endommagée autour des ouvrages tenant compte de son comportement initial et différé et en fonction des ouvrages et des unités géologiques.

  Compte tenu de la connaissance acquise et des incertitudes résiduelles (cf. Tableau 2-2), l'endommagement mécanique est représenté de la manière suivante :

  ✓ pour tirer parti de la connaissance acquise :
    - il n'est pas considéré de ZFC dans les unités USC/UT ;
    - il n'est pas considéré de ZFD dans l'UA ou les unités USC/UT en situation de référence du SEN. Afin de couvrir les incertitudes résiduelles sur l'endommagement mécanique dans l'UA et l'USC/UT, la zone fracturée discrète (ZFD) est représentée en situation enveloppe du SEN dans l'UA et l'USC/UT selon le modèle conceptuel de l'endommagement mécanique ;

  ✓ pour couvrir l'incertitude sur l'intensité de la cicatrisation hydraulique et de son comportement différé, l'endommagement mécanique des argilites est représenté avec la même extension et les mêmes caractéristiques hydrauliques, de transport et de rétention, sur toute la durée des évaluations :
    - les caractéristiques hydrauliques, de transport et de rétention de l'endommagement mécanique sont définies pour chacune des situations du SEN selon les modalités définies au chapitre 1 du présent volume ;
    - les extensions de la ZFC et de la ZFD sont définies sur la base des connaissances et des gammes de valeurs disponibles issues des mesures effectuées au Laboratoire souterrain (valeurs conservatives en situation enveloppe et valeurs de référence en situation de référence) ;

- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Une évolution hydromécanique non anticipée de l'endommagement mécanique au droit des scellements est jugée comme peu vraisemblable. Une telle situation est considérée dans le cadre d'un SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface (cf. Chapitre 2.4 du présent volume).

2.2.2.1.2 L'influence de la présence de vides dans les alvéoles

L'évolution à long terme de la zone endommagée est un processus dont la cinétique est très lente (25) et qui accompagne l'évolution des matériaux placés à proximité et la reprise des vides apicaux. Ainsi, pendant la phase de fonctionnement, le comportement des argilites est maîtrisé par la conception des revêtements/soutènements (ou chemisage pour les alvéoles HA). Sur le long terme, ce comportement est maîtrisé notamment par le remblayage des ouvrages, le remplissage de certaines zones par du béton et la pose de scellements. La conception de l'installation souterraine visant à préserver les propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien, elle retient certaines dispositions pour limiter son endommagement sur le long terme (par exemple en limitant les taux de vides dans les alvéoles de stockage).

En effet, la limitation par conception des vides résiduels initiaux dans les alvéoles de stockage et le maintien de caractéristiques mécaniques résiduelles des bétons (malgré leur dégradation chimique), n'entraînent pas un effondrement mécanique de l'alvéole mais plutôt une extension de la zone endommagée mécaniquement de la couche du Callovo-Oxfordien initiale.

Ce processus qualifié de foisonnement est intégré dans la représentation de l'endommagement mécanique des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles HA et MA-VL où une exigence de 50 mètres de couche du Callovo-Oxfordien saine doit être respectée.

La rupture du revêtement de l'alvéole MA-VL ou le flambement du chemisage de l'alvéole HA peut entraîner un processus de reprise des vides par foisonnement des argilites et, *in fine*, un sur-endommagement des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien. Les principales incertitudes résiduelles portent non pas sur les grands mécanismes/processus mis en œuvre mais sur la description détaillée (précise) dans le temps et l'espace de ce qui se passe mécaniquement au sein d'un alvéole étant donné le nombre de composants mis en jeu, les effets locaux en lien avec les processus hydrauliques-gaz, mécaniques et chimiques, et les incertitudes sur certains paramètres de couplage (couplage chimie/mécanique des bétons…) (25).

Sur la base des connaissances acquises sur le comportement mécanique des argilites, des dispositions de conception visant à limiter les vides dans les alvéoles (cf. Volume 5 du présent rapport), en particulier l'alvéole MA-VL, et l'analyse du foisonnement possible des argilites conduit à retenir une zone de surextension de la ZFC (appelée ZFC-f) au droit des alvéoles qui est définie selon la méthodologie décrite dans les documents « Le comportement mécanique des alvéoles MA-VL (après-fermeture) » (36) et « Dossier de justification de la conception de l'alvéole MA-VL » (37) afin de respecter l'exigence de 50 mètres de garde saine de la couche de Callovo-Oxfordien, composant central de la protection à long terme.

LA PRÉSENCE DE VIDES DANS LES ALVÉOLES DE STOCKAGE

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir au moins 50 mètres de couche du Callovo-Oxfordien saine mécaniquement au droit des alvéoles de stockage, il est fait le choix de conception de limiter le taux de vide dans les alvéoles HA et MA-VL de manière à limiter la surextension de la ZFC après foisonnement des argilites ;

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Le sur-endommagement de la couche du Callovo-Oxfordien issu de la reprise des vides (ZFC-f) est représenté dès le début des évaluations et se caractérise par une surextension de la ZFC initiale en lien avec le foisonnement en fonction du taux de vide résiduel dans les alvéoles :

  - ✓ en situation de référence, l'extension de la zone de foisonnement est définie en considérant les taux de vide résiduels dans les alvéoles suivants :
    - pour les alvéoles MA-VL il est considéré la moyenne du taux de vide résiduel de l'ensemble des alvéoles ;
    - pour les alvéoles du quartier pilote HA et les alvéoles du quartier de stockage HA avec des colis en intercalaire, il est considéré le cas d'un alvéole plein de colis de stockage ;
    - pour les autres alvéoles du quartier de stockage HA, il est considéré le taux de vide résiduel correspondant au pas le plus grand entre colis ;
  - ✓ en situation enveloppe, l'extension de la zone de foisonnement est définie en considérant une valeur plus conservative du taux de vide résiduel dans les alvéoles :
    - pour les alvéoles MA-VL, il est considéré le taux de vide résiduel maximal obtenu parmi l'ensemble des alvéoles ;
    - pour le quartier pilote HA, comme en situation de référence, il est considéré le cas d'un alvéole plein de colis de stockage ;
    - pour les alvéoles du quartier de stockage HA, il est considéré le cas où le pas entre colis est le plus grand.

Tableau 2-2 *Synthèse des risques et incertitudes de l'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées*

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement	**Influence de la vitesse d'excavation sur le modèle conceptuel de l'endommagement mécanique**	/	Intégrée dans le modèle conceptuel d'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien support à la représentation de cet endommagement en SEN (ZFC et ZFD)
	Incertitude sur l'influence de la relation entre l'endommagement et l'alternance de niveaux plus ou moins carbonatés dans l'USC sur le modèle conceptuel de l'endommagement	/	Intégrée dans le modèle conceptuel d'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien support à la représentation de cet endommagement en SEN (ZFC et ZFD)
	Intensité du processus de cicatrisation hydraulique dans l'USC/UT en lien avec l'alternance de phases carbonatées	/	Situation enveloppe du SEN : représentation d'une ZFD
	Intensité du processus de cicatrisation hydraulique dans l'UA	/	Situation enveloppe du SEN : représentation de la ZFD
	Incertitude sur l'extension de la zone de foisonnement liée à la présence de vides résiduels dans les alvéoles	Exigence de limitation des vides dans les alvéoles permettant de préserver les épaisseurs de gardes minimales	Situation enveloppe du SEN : Extension de la zone de foisonnement définie en considérant des valeurs de taux de vide résiduels dans les alvéoles conservatives
	Présence ou non d'un seuil où les déformations différées s'arrêteraient	Pris en compte dans le dimensionnement du revêtement/soutènement	Intégrée dans le modèle conceptuel d'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien support à la représentation de cet endommagement en SEN (ZFC et ZFD)
	Influence de la non prise en compte de la diminution de la rigidité de la zone fracturée		
	Incertitude sur les mécanismes à l'origine de l'état des contraintes *in situ*	Pris en compte de l'anisotropie dans le dimensionnement des ouvrages souterrains	Intégrée dans le modèle conceptuel d'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien support

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
	anisotrope dans le Callovo-Oxfordien à l'actuel		à la représentation de cet endommagement en SEN (ZFC et ZFD)
	Incertitude sur la valeur de la contrainte horizontale majeure par rapport à la contrainte horizontale mineure qui ne peut pas être mesurée directement	/	Intégrée dans le modèle conceptuel d'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien support à la représentation de cet endommagement en SEN (ZFC et ZFD)

2.2.2.2 La perturbation oxydante induite, durant la phase de fonctionnement, par l'oxygène de l'air de ventilation

L'excavation de l'installation souterraine et la ventilation de certains ouvrages de stockage pendant la phase de fonctionnement entraînent une désaturation des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien et la pénétration d'oxygène au voisinage immédiat de ces ouvrages dans l'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien (25).

Les processus d'oxydation des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien, au voisinage immédiat des ouvrages (*e.g.* Dans la ZFC de l'UA), liés à la pénétration de l'oxygène sont bien connus, notamment grâce aux données acquises au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (25, 32). Les conséquences de l'exposition à l'air des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien sur la composition de l'eau porale ont été étudiées et sont également bien connues. De même, la dissipation de ces effets lors de la resaturation a fait l'objet d'études et de travaux expérimentaux et de modélisations. Cet ensemble de travaux permet d'établir un schéma conceptuel de cette perturbation qui tient compte de la nature des ouvrages concernés (notamment s'ils sont restés ouverts ou bien fermés à la ventilation pendant la phase de fonctionnement).

Les incertitudes résiduelles portent sur la quantification précise de la perturbation pour certains ouvrages, par exemple les alvéoles HA, notamment en lien avec les dispositifs mis en œuvre pour limiter les flux d'oxygène (25).

La conception de l'installation souterraine, visant à préserver les propriétés favorables des conteneurs de stockage des déchets vitrifiés, retient certaines dispositions pour limiter l'influence de cette perturbation lors de la resaturation (notamment en introduisant un matériau de remplissage dans l'espace annulaire en extrados du chemisage de l'alvéole HA (MREA), limitant l'influence de ses effets lors de la resaturation (cf. Chapitre 2.7.2.1 du présent volume).

L'INFLUENCE DE LA VENTILATION SUR LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN PENDANT LA PHASE DE FONCTIONNEMENT

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Compte tenu de son extension limitée aux argilites au voisinage immédiat des ouvrages et de son caractère transitoire, la perturbation oxydante induite pendant la phase de fonctionnement n'est pas explicitement représentée en SEN :
  - ✓ son influence sur les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien est couverte par des choix conservatifs des caractéristiques de rétention chimique dans la ZFC ;
  - ✓ son influence au niveau des alvéoles HA est couverte par des dispositions de conception (MREA), (cf. Chapitre 2.7.2.1 du présent volume).

Tableau 2-3 Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation oxydante induite par l'oxygène de l'air pendant la phase de fonctionnement et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement	**Quantification précise de la perturbation oxydante induite par l'oxygène de l'air pendant la phase de fonctionnement**	Pour les alvéoles HA : matériau de remplissage dans l'espace annulaire de l'alvéole (MREA)	L'influence de la perturbation oxydante induite par l'oxygène de l'air pendant la phase de fonctionnement est couverte par des choix conservatifs des caractéristiques de rétention chimique dans la ZFC en SEN

2.2.2.3 La perturbation d'origine thermique

Les effets de l'élévation de la température sur la couche du Callovo-Oxfordien sont bien appréhendés et des dispositions sont prises au niveau de l'architecture d'ensemble et au niveau des alvéoles de stockage[31] pour préserver les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien pour retarder et atténuer la migration des radionucléides et des toxiques chimiques. Les critères de dimensionnement thermique permettent de limiter les niveaux de température atteints dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien et leurs conséquences sur les propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien.

Des simulations permettent d'évaluer l'intensité et l'extension spatio-temporelle résultant de ces dispositions de conception en intégrant les caractéristiques thermiques de la couche du Callovo-Oxfordien (25). Les connaissances acquises, notamment par des mesures expérimentales permettent de prendre en compte explicitement au sein des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien les effets d'élévation de la température vis-à-vis des mécanismes de transport et rétention des radionucléides et des substances chimiques toxiques.

[31] Pour rappel, les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien contribuant aux fonctions de sûreté (en particulier pour la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides ») sont dépendantes de la température. Les options de sûreté et de conception associées visent à se prémunir des effets irréversibles de la température sur la couche du Callovo-Oxfordien et à limiter son influence sur la migration des radionucléides et toxiques chimiques (cf. Volume 2 du présent rapport). Ces options comprennent notamment :
- la limitation de l'exothermicité des colis de stockage ;
- l'espacement des colis, le cas échéant, par des intercalaires ;
- l'espacement des alvéoles de stockage exothermiques ;
- la mise en place de conteneurs de stockage étanches pour les déchets vitrifiés.

Ces acquis permettent de :

- représenter les effets du transitoire thermique sur la diffusion des éléments chimiques ;
- définir un facteur correctif à appliquer aux coefficients de distribution des alcalins et alcalino-terreux, pour les températures supérieures à 50 °C ;
- de déterminer pour certains radionucléides sensibles à la température des facteurs correctifs applicables aux limites de solubilité pour des températures de 50 °C.

Par ailleurs, la température génère au sein des argilites une augmentation de la pression interstitielle[32]. Le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA sont dimensionnés de manière à éviter un risque de fracturation au sein des argilites. L'indicateur retenu est la contrainte effective maximale de Terzaghi (σ_{eff}), en lien avec un comportement en traction (cf. Volume 5 du présent rapport).

Les incertitudes résiduelles de connaissances (*i.e.* Hors évolution de dimensionnement) sont liées :

- aux paramètres thermiques et leur variabilité à l'échelle de la ZIOS, et aux choix de représentations conceptuelles. Les incertitudes sur la conductivité thermique des argilites et la variabilité des paramètres thermiques à l'échelle de la ZIOS sont connues et évaluées (25). Les choix de représentations conceptuelles et les modèles sont conservatifs en lien avec les approximations géométriques et physiques retenues. Le critère de dimensionnement de 90 °C au contact des argilites provenant d'un critère de 100 °C affecté d'une marge de 10 °C permet de couvrir ces incertitudes résiduelles ;
- aux connaissances sur les effets cinétiques sur les équilibres solides fluides et les transformations des minéraux argileux (25). Cependant, au regard de l'intensité et de la temporalité de la perturbation thermique, il est estimé que cette incertitude n'est pas de nature à modifier le caractère nul à très limité de l'effet de la charge thermique du centre de stockage Cigéo sur les propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien. Comme indiqué précédemment, l'influence de la perturbation thermique sur les propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien est prise en compte en SEN de manière conservative.

LE TRANSITOIRE THERMIQUE

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Les dispositions de conception prises en compte par le dimensionnement thermique et thermo-hydro-mécanique afin de couvrir les incertitudes résiduelles associées au transitoire thermique sont détaillées au chapitre 2.3.2.1 du présent volume défini sur la base du document « Dossier justificatif des choix d'architecture souterraine » (35) ;
- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Les effets d'élévation transitoire de température sur la couche du Callovo-Oxfordien (incluant les effets thermo-hydromécaniques) sont limités par conception.

  Les connaissances acquises permettent pour tous les scénarios de représenter ces effets transitoires :
  - ✓ selon l'intensité et l'extension spatio-temporelle du panache thermique résultant des dispositions de conception et intégrant les caractéristiques thermiques de la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ vis-à-vis des paramètres de transport et de rétention dans le volume de la couche du Callovo-Oxfordien qui est affecté par le transitoire thermique résiduel après disposition de conception (diffusion, coefficient de distribution et limite de solubilité).

[32] L'augmentation de la pression interstitielle dans le Callovo-Oxfordien résulte de sa faible perméabilité et de la différence de dilation thermique entre l'eau porale et les phases solides des argilites. Suivant les niveaux de pression interstitielle et de contraintes atteints, ainsi que le chemin de chargement suivi (extension, cisaillement…), la combinaison de ces deux augmentations peut conduire à un endommagement des argilites diffus et/ou localisé (fracturation/rupture).

Tableau 2-4 Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation d'origine thermique des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien	**Incertitudes sur les paramètres thermiques et leur variabilité à l'échelle de la ZIOS, choix de représentation conceptuelle du panache thermique**	Dimensionnement thermique et thermo-hydro-mécanique. Le critère de dimensionnement de 90 °C au contact des argilites provenant d'un critère de 100 °C affecté d'une marge de 10 °C	EN SEN, les choix de représentations conceptuelles/modèles sont conservatifs en lien avec les approximations géométriques et physiques retenues.
La couche du Callovo-Oxfordien	**Incertitude sur les effets cinétiques sur les équilibres solides fluides et les transformations des minéraux argileux**	/	Prise en compte de la perturbation thermique en SEN de manière conservative selon son intensité

2.2.2.4 La perturbation alcaline au droit des ouvrages en béton

Les connaissances acquises par les études expérimentales et les simulations menées depuis plus de 20 ans (25, 32) ont permis :

- d'établir les modèles réactionnels qui se produisent dans les argilites au contact de matériaux cimentaires. Les principaux processus pilotant les interactions bétons/argilites sont acquis. Ces connaissances ont permis d'établir un modèle conceptuel définissant deux zones d'argilites affectées de manière distincte par la perturbation :
  - ✓ une première zone dite « zone reminéralisée » qui correspond à une modification importante des caractéristiques texturales, minéralogiques et géochimiques des argilites à proximité de l'interface avec le matériau (ou le fluide) cimentaire ;
  - ✓ une seconde zone dite « zone affectée par un panache alcalin sans reminéralisation » correspondant à une zone d'argilites peu ou non reminéralisées mais avec un pH élevé (pH ~10) et une modification de la population de cations en position échangeable dans les feuillets des minéraux argileux ;
- d'évaluer le développement de la perturbation alcaline en termes d'intensités et d'extensions spatio-temporelles, dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien au droit de différents ouvrages, en particulier des galeries, des scellements et des alvéoles. Ces simulations rendent compte des couplages entre les phénomènes chimiques et les propriétés de transport.

Ces acquis montrent des transformations minéralogiques limitées (dans la zone « reminéralisée »), d'ordre de quelques décimètres sur le million d'années selon l'ouvrage concerné. Le fluide interstitiel et les sites d'échanges des argilites (dans la zone « sans reminéralisation ») peuvent être affectés sur des distances métriques. Si l'on se rapporte à l'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien, ces effets sont contenus dans la ZFC. Les épaisseurs de ces zones n'affectent pas la garde d'argilites saines (fixée *a minima* à 50 mètres selon les exigences applicables au centre de stockage Cigéo).

Des données relatives aux caractéristiques de rétention chimique sont disponibles pour certaines phases secondaires avérées.

Dans la zone sans reminéralisation, les modifications sont de moindres ampleurs que dans la zone reminéralisée avec une modification des propriétés de sorption des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien en fonction de la concentration en potassium ([K]). Des facteurs correctifs sont définis permettant de corriger les Kd des ions alcalins et alcalino-terreux en fonction de la concentration en potassium.

Les incertitudes résiduelles concernent essentiellement (25) :

- la prise en compte de la zone fracturée connectée du point de vue de son état d'oxydation et des propriétés de transport en regard des fractures. Les connaissances à ce stade montrent un effet plutôt bénéfique de l'oxydation des argilites qui tend à diminuer l'extension de la perturbation alcaline, effet qu'il faut confirmer ;
- la robustesse du modèle d'altération vis-à-vis des phases néoformées et la prédictibilité du comportement des radionucléides dans la zone reminéralisée où se forment ces phases ;
- la quantification du couplage de l'effet des transformations minéralogiques et/ou la présence d'un fluide cimentaire dans la porosité sur les propriétés de transport. À ce jour, ce point est apprécié de manière simplifiée dans les simulations.

Ces incertitudes résiduelles ne sont pas de nature à remettre en cause le schéma réactionnel pris en compte ni les résultats des évaluations de l'extension spatio-temporelle de la perturbation alcaline (25). Si les incertitudes restent limitées sur l'évolution de cette perturbation alcaline, il est néanmoins fait l'hypothèse pénalisante qu'elle se produit dès la fermeture du stockage et qu'elle perdure sur toute la durée de l'évaluation.

Ces incertitudes résiduelles sont prises en compte en situation enveloppe du SEN (cf. Tableau 2-5) pour définir les extensions et les propriétés hydro-dispersives de la couche du Callovo-Oxfordien au contact de ces matériaux cimentaires, en particulier de la ZFC et de la ZFD.

LA PERTURBATION ALCALINE DE LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Les acquis de connaissances ont permis d'établir un modèle conceptuel (intensité, extension, temporalité) de développement de la perturbation alcaline dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien au contact de matériaux cimentaires. Sur cette base, les choix suivants sont faits pour le scénario d'évolution normale :

  - ✓ dans toutes les situations du SEN, les volumes de roche concernés par la perturbation alcaline correspondent à l'extension spatio-temporelle maximale obtenue par modélisations appliquées dès la fermeture du stockage et ce sur toute la durée des évaluations ce qui permet de couvrir les incertitudes résiduelles (cf. Tableau 2-5) ;
  - ✓ en situation de référence, l'influence de la perturbation alcaline sur les propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique est prise en compte par l'application de facteurs correctifs sur les paramètres hydro-dispersifs et de rétention ;
  - ✓ en situation enveloppe, l'influence de la perturbation alcaline sur les propriétés hydro-dispersives est prise en compte en représentant la zone reminéralisée avec des caractéristiques hydrauliques assimilées à celles d'un sable pour couvrir les incertitudes résiduelles (cf. Tableau 2-5) ce qui est pénalisant. Aucune propriété de transport et de rétention n'est prise en compte dans cette zone. Dans la zone sans reminéralisation, les mêmes facteurs correctifs sur les paramètres de rétention des alcalins et alcalino-terreux qu'en situation de référence du SEN sont appliqués.

  L'influence favorable de la perturbation alcaline sur la limite de solubilité des radionucléides et des toxiques chimiques n'est pas valorisée. De même, les propriétés de rétention des phases néoformées avérées ne sont pas prises en compte.

Tableau 2-5 Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation alcaline de la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement	**Incertitude sur l'influence du réseau de fracture (de la ZFC) et de l'état d'oxydation sur l'extension de la perturbation alcaline**	/	L'effet de l'oxydation et du réseau de fracture des argilites n'est pas valorisé en SEN
	Incertitude sur la robustesse du modèle d'altération vis-à-vis des phases néoformées et la prédictibilité du comportement des radionucléides dans la zone reminéralisée où se forment ces phases	/	Pas de rétention chimique dans la zone reminéralisée en situation enveloppe du SEN Les propriétés favorables des phases néoformées avérées ne sont pas valorisées
	Incertitude sur l'effet des transformations minéralogiques liées à la perturbation alcaline sur la porosité	/	En SEN : la porosité est prise égale à celle d'un sable dans la zone reminéralisée par la perturbation alcaline
	Incertitude sur l'extension spatio-temporelle de la perturbation alcaline	/	En SEN : Extension maximale de la perturbation alcaline obtenue par simulation et appliquée dès la fermeture du stockage et maintenue sur la durée des évaluations

2.2.2.5 Les perturbations chimiques de la couche du Callovo-Oxfordien issues des déchets MA-VL

Avec l'arrivée de l'eau sur les déchets, des perturbations chimiques se produisent en lien avec la dégradation de substances accompagnant ces déchets. La nature de ces perturbations dépend des différentes catégories physico-chimiques des déchets MA-VL. Les principales perturbations chimiques induites par les déchets sont :

- la perturbation saline due à la dégradation des déchets MA-VL salins ;
- la perturbation organique due à la dégradation des déchets MA-VL riches en composés organiques susceptibles de générer des espèces complexantes ;
- la perturbation oxydante due à certains sels présents dans les déchets.

Selon les déchets MA-VL concernés, des perturbations peuvent se cumuler ou être en compétition[33] au droit de l'alvéole concerné. L'analyse et la prise en compte de ces différentes perturbations sur les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien, en particulier de la ZFC et de la ZFD au droit des alvéoles MA-VL sont exposées dans les chapitres suivants.

[33] Pour limiter la mobilité des radionucléides et des toxiques chimiques dans le système de stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien, l'Andra a défini des dispositions de conception restrictives en matière de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL. Une exigence porte ainsi sur la séparation des colis de déchets MA-VL susceptibles de générer des perturbations chimiques de ceux n'en générant pas ou peu en les plaçant dans des alvéoles dédiés. Les options de conception à l'échelle du quartier de stockage MA-VL et l'entraxe entre ces différents types d'alvéoles limitent par ailleurs les effets des premiers sur les seconds.

2.2.2.5.1 La perturbation saline issue des déchets MA-VL

Que ce soit lors de leur resaturation progressive par l'eau de la formation hôte ou après fermeture à long terme (milieu saturé), les sels solubles (nitrate, sulfate, potassium, sodium) contenus dans les alvéoles de déchets MA-VL salins (MA-VL 1 et MA-VL 2 selon la catégorisation physico-chimique des alvéoles cf. Volume 3 du présent rapport) peuvent être mis en solution. Ce phénomène est susceptible de provoquer de fortes concentrations en sels (molaires à plurimolaires) dans les eaux au sein des alvéoles et dans les argilites au contact et induire un accroissement de la force ionique. Cet effet a pour conséquence (i) de modifier la réactivité et la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans les argilites[34] et (ii) d'imposer des effets hygroscopiques et osmotiques dans les ouvrages (32).

L'effet de la présence de sels de nitrates sur la spéciation et la solubilité d'un grand nombre d'éléments est présentée dans le document en référence « Le comportement des radionucléides et des toxiques chimiques » (32).

Ces acquis de connaissance ont permis de définir un seuil (2.10^{-1} M) au-delà duquel la force ionique a un effet sensible sur les propriétés de transport diffusif et de rétention dans les argilites :

- une légère augmentation des propriétés de diffusion pour les espèces anioniques (diminution de l'exclusion anionique, co-diffusion) qui restent inférieures à celles des espèces neutres ;
- une légère diminution des propriétés de diffusion pour les espèces cationiques qui restent supérieures à celles des espèces neutres ;
- une légère diminution de la sorption des ions alcalins et alcalino-terreux ;
- une augmentation de la solubilité de certains éléments (au maximum d'un facteur 10).

Les incertitudes résiduelles concernent l'influence de la perturbation saline pour des forces ioniques au-delà de 1 M. Cette incertitude résiduelle est couverte par les choix des paramètres effectués dans le scénario d'évolution normale.

Du fait d'une chronique de livraison non figée pour les évaluations de sûreté après fermeture (cf. Chapitre 2.8.1.1.1 du présent volume, il persiste une incertitude sur l'extension de la perturbation associée à chacun des alvéoles MA-VL. Pour couvrir cette incertitude, il est retenu en scénario d'évolution normale, l'application à tous les alvéoles de la même catégorie physico-chimique, l'extension maximale obtenue par simulation avec l'alvéole MA-VL 1 ou MA-VL 2[35] le plus chargé en sels.

Si les incertitudes restent limitées sur l'évolution spatio-temporelle de cette perturbation, il est fait l'hypothèse pénalisante qu'elle se produit dès la fermeture du stockage et qu'elle perdure sur toute la durée de l'évaluation.

Les modèles réactionnels développés à ce stade n'intègrent pas le développement d'une activité bactérienne avec ses conséquences favorables sur la cinétique de réduction des nitrates ce qui conduirait à limiter le panache salin (38).

[34] Ces effets sont d'autant plus importants que la force ionique est élevée.
[35] Nomenclature telle que définie au volume 3 du présent rapport.

LA PERTURBATION SALINE ISSUE DES DÉCHETS MA-VL

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Des dispositions techniques ont été définies en matière de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL ce qui permet de limiter les perturbations chimiques sur la mobilité des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2.3.2.2 du présent volume, resituées dans le volume 3 du présent rapport) ;

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Les connaissances acquises permettent de représenter la propagation d'un panache salin et son influence sur les propriétés de transport et de rétention des argilites issu de la mise en solution de sels contenus dans les déchets et de ses effets sur les propriétés de diffusion et rétention chimique du Callovo-Oxfordien.

  Pour couvrir les incertitudes résiduelles, il est fait les choix suivants :

  - ✓ des facteurs correctifs sont appliqués sur les propriétés de transport et de rétention des argilites en fonction de l'intensité de la perturbation saline, pour une force ionique qui serait supérieure à 1 M, la rétention chimique ne sera pas prise en compte dans le volume de Callovo-Oxfordien affecté ;
  - ✓ pour tenir compte des incertitudes résiduelles sur l'extension de la perturbation au droit de chacun des alvéoles, la perturbation saline est représentée avec son extension maximale issue des modélisations sur l'alvéole contenant l'inventaire en sels le plus important appliquée à tous les alvéoles de la même catégorie physico-chimique ;
  - ✓ pour tenir compte des incertitudes sur l'évolution-spatio-temporelle de la perturbation, la représentation retenue est appliquée dès la fermeture du stockage et sur toute la durée des évaluations.

  L'influence favorable de la perturbation saline sur la diffusion des cations (coefficient de diffusion et porosité accessible) n'est pas valorisée en SEN (toutes les situations) de manière pénalisante.

Tableau 2-6 Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation saline dans la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien	**Incertitude sur l'influence de la force ionique au-delà de 1 M**	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	En SEN : si la force ionique est supérieure à 1 M, la rétention chimique n'est pas prise en compte
	Incertitude sur l'extension de la perturbation saline associée à chacun des alvéoles MA-VL concerné	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	En SEN : extension maximale de la perturbation saline de l'alvéole le plus chargé appliquée à l'ensemble des alvéoles MA-VL concernés
	Incertitude sur l'extension spatio-temporelle de la perturbation saline	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	En SEN : représentation de la perturbation saline appliquée dès la fermeture du stockage et maintenue sur toute la durée des évaluations

2.2.2.5.2 La perturbation organique issue des déchets MA-VL

Lors de leur dégradation, les colis de déchets MA-VL contenant des composants organiques peuvent générer des espèces complexantes de radionucléides et de substances toxiques chimiques qui sont susceptibles d'influencer ainsi leur migration dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien.

Au cours des dernières décennies, des connaissances ont été acquises (25, 32) :

- sur la nature et l'origine des composés organiques contenus dans les déchets, en particulier sur ceux susceptibles de se dégrader en complexants organiques. Elles incluent tout type de déchets y compris les matériaux organiques issus des enrobages de déchets bitumés ;
- sur les effets de la radiolyse et de la présence de micro-organismes, notamment la nature et la teneur des molécules hydrosolubles pouvant être relâchées par la dégradation des matériaux organiques par radiolyse et hydrolyse dépendant des matières présentes dans les déchets ainsi que les conditions d'exposition au rayonnement et de lixiviation de l'eau ;
- sur la quantification de l'effet des produits de dégradation hydrosolubles organiques sur le comportement des radionucléides, en indiquant les limites de connaissances actuelles. Des mesures ont permis de caractériser le transport de certains radionucléides complexés.

L'influence des ligands organiques sur la rétention et la diffusion des radionucléides et des substances toxiques chimiques (lanthanides, actinides et certains métaux de transition) a été étudiée et a fait l'objet de mesures expérimentales (25, 32). Les études menées mettent en évidence une diminution de la sorption et une augmentation de la limite de solubilité à partir d'une valeur seuil. Au-delà de cette valeur, ces variations sont d'environ un ordre de grandeur par ordre de grandeur de la concentration en ligands organiques. Les autres effets sont des effets favorables à une diminution de la vitesse de transfert des éléments chimiques (coefficient de diffusion et porosité accessible).

Des incertitudes résiduelles persistent sur l'effet complexant du phosphate de tributyle (TBP). Elles sont gérées par analogies avec d'autres ligands organiques, comme l'acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA).

Les études menées ont également intégré des simulations de la propagation de la perturbation organique qui ont été réalisées en considérant trois composés organiques représentatifs (acide iso-saccharinique (ISA), phtalates, TBP) et en considérant les valeurs seuils obtenues induisant une diminution des propriétés de rétention utilisant les colis MA-VL de plus forte concentration en composants organiques (25).

Les incertitudes résiduelles à ce jour sont les suivantes :

- la stabilité à long terme de certains acides carboxyliques qui pourrait conduire à la formation d'espèces moins complexantes (25, 32). Un éventuel effet moins complexant des composés organiques n'est pas valorisé ;
- les effets de compétition entre les molécules organiques et certaines espèces chimiques (dont le fer) qui peuvent limiter la formation de complexes organique-radionucléide. Ces effets ne sont pas valorisés dans les simulations caractérisant l'extension et l'intensité de la perturbation organique.

Les modèles réactionnels n'intègrent pas le développement d'une activité bactérienne avec ses conséquences favorables sur la dégradation des matières organiques ce qui conduirait à limiter le panache organique (38).

Du fait d'une chronique de livraison non figée pour les évaluations de sûreté après fermeture (cf. Chapitre 2.8.1.1.1 du présent volume, il persiste une incertitude sur l'extension de la perturbation associée à chacun des alvéoles MA-VL. Pour couvrir cette incertitude, il est retenu en scénario d'évolution normale, l'application à tous les alvéoles de la même catégorie physico-chimique, l'extension maximale obtenue par simulation avec l'alvéole MA-VL 1, MA-VL 2 ou MA-VL 3 le plus chargé en organiques.

LA PERTURBATION ORGANIQUE ISSUE DES DÉCHETS MA-VL

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Des dispositions techniques ont été définies en matière de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL ce qui permet de limiter les perturbations chimiques sur la mobilité des radionucléides et des toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2.3.2.2 sur la base du volume 3 du présent rapport).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**
  - ✓ les connaissances acquises permettent de représenter la propagation des perturbations organiques dans les argilites au droit des alvéoles qui en contiennent. Les incertitudes résiduelles sur l'effet complexant du phosphate de tributyle (TBP) sont gérées par analogies avec d'autres ligands organiques, comme l'acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA) ;
  - ✓ pour tenir compte des incertitudes résiduelles, la perturbation organique est représentée avec son extension maximale issue des modélisations sur l'alvéole contenant l'inventaire en organique le plus important de la catégorie physico-chimique étudiée (catégorie physico-chimique MA-VL 1 et MA-VL 2 pour le TBP et MA-VL 3 pour l'acide iso-saccharinique (ISA) et les phtalates) et ce pour tous les alvéoles de la même catégorie physico-chimique. Cette représentation est appliquée dès la fermeture du stockage et sur toute la durée des évaluations ;
  - ✓ pour les deux situations, la connaissance acquise permet de prendre en compte l'influence de la perturbation organique sur la sorption et la solubilité de certains radionucléides et substances toxiques chimiques (lanthanides, actinides et certains métaux de transition) dans les argilites en appliquant des facteurs correctifs lorsqu'une concentration seuil en complexants est atteinte ;
  - ✓ l'influence favorable de la complexation sur la diffusion des éléments complexés (coefficient de diffusion effectif (De), porosité accessible (ω_{acc})) n'est pas valorisée.

Tableau 2-7 Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation organique dans la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien	**Incertitude résiduelle sur l'effet complexant du TBP**	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	En SEN : analogie avec d'autres ligands organiques (EDTA) pour tenir compte de l'effet complexant du TBP
La couche du Callovo-Oxfordien	**Incertitude sur la stabilité à long terme de certains acides carboxyliques, notamment en conditions biotiques**	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	En SEN : Représentation de la perturbation organique selon son extension maximale dès la fermeture du stockage et maintenue sur toute la durée des évaluations
La couche du Callovo-Oxfordien	**Incertitude sur l'influence de la compétition entre les molécules organiques et d'autres espèces en solution**	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	Ce phénomène favorable n'est pas pris en compte dans les modélisations de l'extension et de l'intensité de la perturbation organique

2.2.2.5.3 La perturbation oxydante liée aux sels des déchets MA-VL

La présence de nitrates relâchés par les déchets salins (catégorie physico-chimique MA-VL 1 et MA-VL 2) peut augmenter le potentiel oxydo-réducteur du milieu et peut ainsi affecter le degré d'oxydation de certains éléments, pour tendre vers un état oxydé.

Ces phénomènes concernent essentiellement les alvéoles MA-VL et leur structure en béton (cf. Chapitre 2.8.2.1 du présent volume). En effet, les conditions réductrices de la couche du Callovo-Oxfordien permettent la réduction chimique à proximité de l'alvéole des radionucléides et substances toxiques chimiques présentant une forme oxydée et seul le Se(+VI), déjà sous cette forme, devrait persister sous une forme métastable dans la couche du Callovo-Oxfordien.

LA PERTURBATION OXYDANTE LIÉE AUX SELS ISSUS DES DÉCHETS MA-VL

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN) :**
  Au regard des connaissances acquises, la perturbation oxydante liée aux sels de nitrates relâchés par les déchets salins (catégorie physico-chimique MA-VL 1 et MA-VL 2) n'impacte pas le degré d'oxydation des éléments dans la couche du Callovo-Oxfordien, elle n'est donc pas représentée dans le scénario d'évolution normale (SEN).

2.2.2.6 Le cumul des perturbations chimiques

Suivant les catégories physico-chimiques des alvéoles MA-VL, plusieurs perturbations issues des déchets peuvent se superposer avec des effets qui peuvent se cumuler ou être en compétition. De plus, ces perturbations viennent complexifier un milieu déjà perturbé par l'endommagement mécanique et par la perturbation alcaline avec là encore des effets compétitifs ou cumulatifs.

Des incertitudes persistent sur les effets de ces cumuls, en lien notamment avec leur propagation spatio-temporelle respective et leurs influences qui ne sont pas nécessairement de même nature selon les radionucléides et les substances toxiques chimiques concernés. Sur la base des acquis de connaissances, des principes de représentation des cumuls de perturbation chimiques ont été retenus tels que détaillés dans l'encadré ci-dessous et le tableau 2-8.

LE CUMUL DES PERTURBATIONS CHIMIQUES (ALCALINE, SALINE, ORGANIQUE) DANS LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Des dispositions techniques ont été définies en matière de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL, ce qui permet de limiter les effets des perturbations chimiques sur la mobilité des radionucléides et des toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2.3.2.2 du présent volume et volume 3 du présent rapport) ;

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Compte tenu de la connaissance disponible, il est retenu pour les deux situations du SEN les principes de représentation des cumuls de perturbations suivants :

  - ✓ le cas échéant si deux perturbations ont un effet sur les mêmes éléments et paramètres hydrauliques, de transport, de sorption ou de solubilité, la plus pénalisante des deux perturbations est prise en compte et représentée explicitement (i.e. Le facteur correctif le plus pénalisant sur les paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique des radionucléides et toxiques chimiques est retenu) ;
  - ✓ si ces perturbations n'affectent pas les mêmes éléments, leurs effets sur les paramètres hydrauliques, de transport, de sorption ou de solubilité sont pris en compte de manière indépendantes ;
  - ✓ en situation enveloppe, il est considéré de manière pénalisante afin de couvrir les incertitudes sur l'influence des perturbations et de leurs cumuls dans la zone fracturée connectée initiale liée au creusement (ZFC-0) des alvéoles MA-VL (perturbations chimiques, injection d'un matériau compressible à l'extrados des voussoirs), de représenter la ZFC-0 avec des propriétés hydrauliques équivalentes à celles d'un sable sans propriétés de transport ou de rétention sur toute son extension.

Tableau 2-8 Synthèse des risques et incertitudes liés au cumul des perturbations chimiques dans la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien saine et endommagée mécaniquement	**Incertitude sur les effets du cumul éventuel des perturbations chimiques : alcaline (hors zone reminéralisée), organique, et saline**	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	En SEN selon leurs influences : • si deux perturbations ont un effet sur les mêmes éléments et paramètres hydrauliques, de transport, de sorption ou de solubilité, la plus pénalisante des deux perturbations est prise en compte et représentée explicitement ; • si ces perturbations n'affectent pas les mêmes éléments, leurs effets sur les paramètres hydrauliques, de transport, de sorption ou de solubilité sont pris en compte de manière indépendantes ; • en situation enveloppe du SEN : prise en compte de propriétés pénalisantes dans la ZFC-0 des alvéoles MA-VL.

2.2.2.7 L'activité bactérienne

2.2.2.7.1 L'activité bactérienne dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien sain

Les effets potentiels de l'activité microbienne sur le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans différents contextes géochimiques, en particulier des alvéoles HA et des alvéoles MA-VL ont été étudiés (32, 38). Ces études ont porté plus particulièrement sur les effets de modification de la chimie des eaux et des effets induits sur le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques. La présence de microorganismes en tant que facteur du transport des radionucléides et des substances toxiques chimiques renvoie aux potentialités du transfert colloïdal qui n'est pas attendu dans les argilites saines.

Les réactions oxydo-réductrices catalysées par les microorganismes sont bien connues. La présence d'activité microbienne peut ainsi avoir une influence sur le comportement des radionucléides et toxiques chimiques :

- directement par le contrôle du potentiel oxydo-réducteur ;
- indirectement par :
  - ✓ la réduction totale et partielle des nitrates et la formation de nitrites, N_2 et NH_4 avec des effets sur la géochimie des eaux (diminution de la force ionique, modification de la population d'échangeurs cationiques…) ;
  - ✓ l'oxydation des matières organiques ;
  - ✓ la réduction du Fe(III) des smectites avec un effet potentiel sur leur gonflement.

Ces études intègrent les situations de stockage pour évaluer l'occurrence d'activité microbienne (évaluation de la disposition d'eau libre, d'espace, de nutriments majeurs et de traces, et également considération de l'augmentation de la température, des rayonnements ionisants et du pH).

Dans la couche du Callovo-Oxfordien, aucune activité microbienne significative n'est attendue. Les connaissances acquises sur les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien indiquent que les tailles de pores nano à microscopiques des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien sain ne permettent pas un développement bactérien significatif à cause d'un manque d'espace, d'eau libre ou de nutriments. Divers travaux sur des matériaux argileux y compris des argiles gonflantes confortent ces éléments.

Il n'est donc pas attendu d'occurrence ni d'effets d'une activité bactérienne dans la masse des argilites saines de la couche du Callovo-Oxfordien.

2.2.2.7.2 L'activité bactérienne dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien endommagées mécaniquement

C'est aux interfaces entre composants que l'activité la plus importante a été observée, et ce, grâce aux tailles de pores suffisamment grandes et à l'arrivée de nutriments par diffusion depuis la roche argileuse et les colis de déchets stockés (32, 38).

Les études ont ainsi porté sur les interfaces avec la zone endommagée mécaniquement de la couche du Callovo-Oxfordien où des augmentations locales de la taille des pores au niveau des fractures/fissures pourraient permettre un développement microbien bien qu'il soit attendu que les phénomènes d'auto-colmatage réduisent cet espace. Ces études ont intégré la nature des ouvrages et des évolutions physico-chimiques associées :

- au niveau des ouvrages de fermeture : chapitres 2.4 et 2.6 du présent volume ;
- au niveau des alvéoles HA : chapitre 2.7 du présent volume ;
- au niveau des alvéoles MA-VL : chapitre 2.8 du présent volume.

L'INFLUENCE DE L'ACTIVITÉ BACTÉRIENNE DANS LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN SAINE ET ENDOMMAGÉE MÉCANIQUEMENT

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Au regard des acquis de connaissances, il n'est pas attendu d'occurrence ni d'effets d'une activité bactérienne dans les argilites saines de la couche du Callovo-Oxfordien. L'influence de l'activité microbienne n'est donc pas représentée dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien saine pour toutes les situations du SEN.

  L'influence de l'activité microbienne au niveau des interfaces entre les argilites et les ouvrages est traitée de manière spécifique pour chacun des composants : ouvrages de fermeture (cf. Chapitres 2.4 et 2.6 du présent volume), alvéoles HA (cf. Chapitre 2.7 du présent volume) et alvéoles MA-VL (cf. Chapitre 2.8 du présent volume).

2.2.2.8 Les phénomènes de transport par colloïdes dans la couche du Callovo-Oxfordien

2.2.2.8.1 Les phénomènes de transport par colloïdes dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien saine

Des connaissances ont été acquises, y compris par essais, sur les conditions du transfert colloïdal dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien (32).

Les acquis de connaissances montrent que les colloïdes ne peuvent pas migrer à travers le réseau de pores des argilites car la taille des pores (et des connections entre les pores) est petite (quelques nanomètres). De plus, la mobilité des radionucléides et des substances toxiques chimiques au travers des argilites est fortement réduite par les phénomènes de sorption et/ou par la domination du processus de diffusion dans leur transport.

Compte tenu de ces éléments, la possibilité de transfert de colloïdes dans la couche du Callovo-Oxfordien non endommagée n'est pas retenue en scénario d'évolution normale.

2.2.2.8.2 Les phénomènes de transport par colloïdes dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement

Les colloïdes pourraient éventuellement migrer par la zone endommagée fracturée (ZFC) en supposant que celle-ci ne soit pas cicatrisée mais dans ce cas, ce transfert ne concernerait que les fractures et non les blocs d'argilites inter-fractures supposés comme sains d'un point de vue textural. Les flux correspondants seront limités.

Pour que le transport des colloïdes soit possible dans une ZFC le long des ouvrages, il est nécessaire (i) d'avoir un transport par advection, (ii) que les colloïdes aient une taille suffisamment petite pour migrer à travers la porosité, (iii) qu'ils soient peu ou pas retenus et (iv) que les fractures de la ZFC soient connectées longitudinalement le long des ouvrages.

De telles conditions ne seraient envisageables qu'en scénarios de dysfonctionnement des scellements dans lesquels est postulée une ZFC aux propriétés hydro-dispersives dégradées. La possibilité de transport par colloïdes serait donc limitée à la voie ouvrage et par la ZFC.

Bien que la possibilité de transfert des colloïdes y soit très peu vraisemblable, cette hypothèse est postulée dans les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par l'interface. Il est alors fait l'hypothèse que la possibilité de transport des colloïdes par advection corresponde à la possibilité de migration dans un milieu poreux présentant une porosité importante, considérant l'absence d'auto-colmatage et de cicatrisation hydraulique et avec des conditions de transport advectives.

LES PHENOMÈNES DE TRANSPORT PAR COLLOÏDES

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Sur la base des éléments de connaissances disponibles, la possibilité de transfert de colloïdes dans la couche du Callovo-Oxfordien non endommagée mécaniquement n'est pas retenue dans le scénario d'évolution normale y compris aux interfaces.

- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les SEA et les scénarios *What-if***

  Un transport par colloïdes est postulé dans le cadre des scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par l'interface. Il est alors postulé que la possibilité de transport des colloïdes par advection corresponde à la possibilité de migration dans un milieu poreux présentant une porosité importante, considérant l'absence d'auto-colmatage et de cicatrisation hydraulique et avec des conditions de transport advectives.

Tableau 2-9 Synthèse des risques et incertitudes liés au transport colloïdal dans le Callovo-Oxfordien endommagé ou non et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement	**Influence du transfert colloïdal sur la migration des radionucléides et toxiques chimiques**	/	Transfert colloïdal postulé dans le scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements par l'interface

2.2.3 Les performances de la couche du Callovo-Oxfordien préservées du risque de criticité à long terme

Pour garantir le respect de la fonction *« Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »* vis-à-vis de potentielles perturbations liées au risque de criticité au sein des alvéoles induit par la présence de matières fissiles dans les colis, le principe retenu est d'exclure l'occurrence d'une excursion critique sur le long terme après la fermeture du stockage.

L'évaluation de la sous-criticité du stockage à long terme tient compte des données d'entrée suivantes pour lesquelles des choix pénalisants sont retenus conformément à la démarche classique de criticité :

- les caractéristiques géométriques et les matériaux des colis primaires et colis de stockage (cf. Volume 3 du présent rapport) situés dans l'environnement proche des matières fissiles ;
- leur disposition dans les alvéoles de stockage ;
- les caractéristiques géométriques et les matériaux des alvéoles de stockage (cf. Volume 5 du présent rapport).

Le mode de contrôle retenu est la masse de matières fissiles contenue dans les colis de déchets. L'optimum de modération est systématiquement recherché. Les poisons sont négligés. Certaines caractéristiques géométriques sont considérées (cf. Modèles d'évaluation présentés ci-après).

L'évaluation de la sous-criticité après fermeture et à long terme s'appuie également sur la connaissance de l'évolution phénoménologique du système de stockage (cf. Volume 7 du présent rapport). La connaissance associée aux paramètres qui influent la réactivité d'un « système nucléaire » est analysée pour les besoins de la démonstration de sous-criticité à long terme : nature physico-chimique, quantité et répartition spatiale de matières fissiles, caractéristiques de son environnement proche (réflecteurs, modérateurs, interactions avec des matières fissiles proches).

Cette analyse conduit à retenir comme phénomènes d'évolution support à l'évaluation de la sous-criticité la dégradation progressive des colis et autres composants de l'environnement concomitamment à la resaturation en eau des alvéoles et la migration des radionucléides à travers les composants ouvragés et la couche du Callovo-Oxfordien après leur relâchement hors de leur matrice de confinement. Pour couvrir ces phénomènes, trois configurations enveloppes du point de vue de la criticité et qui servent de modèles aux évaluations de la sous-criticité sont identifiées :

- modèle « État initial à la fermeture du stockage » afin de couvrir toute la phase durant laquelle la géométrie des colis est conservée ;
- modèle « Dégradation des colis » qui considère que toute la matière fissile est encore présente dans les colis mais l'épaisseur des matériaux qui constituent les colis disparaît progressivement ;
- modèle « Migration de la matière fissile » qui considère la dégradation complète des colis, le relâchement intégral des radionucléides et une éventuelle précipitation des éléments fissiles en des zones chimiquement favorables conduisant à la reconcentration de ces matières fissiles.

Ces modèles et les résultats des évaluations associées sont présentés dans la note relative à l'analyse des risques et incertitudes après fermeture du centre de stockage Cigéo en référence (39).

Les masses maximales admissibles par colis permettant d'assurer la sous-criticité à long terme après fermeture sont inférieures à celles permettant de garantir l'absence de risque de criticité durant la phase de fonctionnement de l'installation pour tous les colis quel que soit leur mode de stockage à l'exception des deux cas suivants :

- pour le colis CSD-C en stockage direct, 160 g d'équivalent ^{239}Pu ;
- pour le colis 500 L FI en stockage direct, 225 g d'équivalent ^{239}Pu.

Les masses maximales admissibles les plus restrictives issues des études de criticité menées pour les phases de fonctionnement et après fermeture sont reportées dans la version des spécifications préliminaires d'acceptation des colis de déchets radioactifs (40) ce qui permet de garantir la maîtrise du risque de criticité après fermeture et à long terme. Aucune perturbation induite par ce risque n'est donc susceptible de dégrader les caractéristiques physico-chimiques intrinsèques favorables du Callovo-Oxfordien sur le long terme.

2.3 L'architecture

2.3.1 La position verticale du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien

La conception de l'architecture souterraine de l'INB Cigéo, doit permettre de préserver l'épaisseur de garde saine minimum de la Couche du Callovo-Oxfordien exigée (d'au moins 50 mètres) tout en tenant compte du pendage de la couche et de la variation de son épaisseur sur la ZIOS.

Les études conduites (cf. Volume 4 du présent rapport) ont permis de définir une gamme d'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien dans la ZIOS et de quantifier les incertitudes résiduelles qui sont estimées de l'ordre d'une dizaine de mètres au toit de la formation. Ces incertitudes résiduelles sont gérées par conception en s'assurant qu'au droit des quartiers de stockage l'exigence de 50 mètres minimum de Callovo-Oxfordien sain est préservée.

À ce stade, la position verticale finale du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien n'est pas arrêtée. L'exigence permettant de préserver l'épaisseur de garde saine en s'affranchissant de l'épaisseur exacte du Callovo-Oxfordien dans la ZIOS est intégrée en situation enveloppe du scénario d'évolution normale et les scénarios de dysfonctionnement des scellements (cf. Tableau 2-10). Les hypothèses de sûreté permettent ainsi de couvrir les différents positionnements possibles. La position exacte des ouvrages sera prise en compte lors des réexamens de sûreté pendant la phase de fonctionnement une fois les ouvrages construits.

LA POSITION VERTICALE DU STOCKAGE DANS LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Le dimensionnement des installations fond au sein de la couche du Callovo-Oxfordien est effectué de sorte à garantir au moins 50 mètres de garde saine au droit des alvéoles de stockage. Ce dimensionnement prend en compte le pendage de la couche et les incertitudes résiduelles sur la position du toit et du mur du Callovo-Oxfordien (cf. Tableau 2-10).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Afin de couvrir les incertitudes résiduelles à ce stade sur la position des quartiers de stockage et galeries de liaison dans la couche du Callovo-Oxfordien, il est fait les choix suivants :

  - ✓ en situation de référence du SEN, il est considéré une profondeur d'implantation « réaliste »[36] des quartiers de stockage et des galeries de liaison au sein de la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ en situation enveloppe du SEN, il est considéré deux cas de calcul considérant une position haute et une position basse des quartiers de stockage et galeries de liaison au sein de la couche du Callovo-Oxfordien.

- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les SEA et les scénarios *What-if***

  Afin de couvrir les incertitudes résiduelles sur l'influence hydraulique de la position des galeries et alvéoles de stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien, il est fait le choix de retenir la position verticale du stockage dans son ensemble dans la ZIOS dans les scénarios de dysfonctionnement des scellements qui à maximise les transferts par la voie « ouvrages », c'est-à-dire, en position basse (cf. Chapitre 8 du présent volume).

2.3.2 La conception des quartiers de stockage HA et MA-VL

2.3.2.1 Le dimensionnement thermo-hydro-mécanique (THM) du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA

Pour gérer le risque lié aux effets induits par la thermicité des déchets HA (notamment pour préserver les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2.2.1 du présent volume)), un dimensionnement thermo-hydro-mécanique du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA est réalisé.

[36] Prise en compte de la cote verticale d'implantation de l'architecture illustrative dans la couche du Callovo-Oxfordien. Les gardes inférieures et supérieures sont déduites à partir des cotes locales du toit et du mur de la couche du Callovo-Oxfordien et intègrent le pendage et les variations d'épaisseurs de ce dernier.

Ce dimensionnement est réalisé de manière prudente en prenant en compte les incertitudes résiduelles sur le comportement thermique de la couche du Callovo-Oxfordien (paramètres thermiques, représentations conceptuelles, prise en compte de la surpression interstitielle (25)) en retenant[37] :

- une température de dimensionnement inférieure à la température maximale admissible de 100 °C. La température de 90 °C retenue pour le dimensionnement permet ainsi de couvrir les incertitudes résiduelles sur les propriétés thermiques de la couche du Callovo-Oxfordien par conception ;
- le champ de contraintes effectives transitoire généré par la charge thermique doit toujours rester dans le domaine de l'absence de fracturation de la couche du Callovo-Oxfordien, plus particulièrement par la génération de contraintes en traction et en cisaillement. La contrainte effective de Terzaghi dans la couche du Callovo-Oxfordien doit toujours rester négative (au sens du formalisme de signe de la mécanique des roches) traduisant l'absence d'un champ de contrainte en traction dans la formation.

Ce dimensionnement thermo-hydro-mécanique des quartiers de stockage HA conduit à définir une densité de chargement traduite par des entraxes spécifiques entre alvéoles HA et le cas échéant des espacements entre colis. Ils sont définis selon des hypothèses de puissance thermique des colis et la connaissance acquise sur les caractéristiques intrinsèques du Callovo-Oxfordien (conductivité thermique, contrainte de contrainte effective maximale de Terzaghi (σ_{eff})) (cf. Volumes 5 et 7 du présent rapport, le « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (25) et le « Dossier de justification des choix d'architecture » (35)).

LE DIMENSIONNEMENT THERMO-HYDRO-MÉCANIQUE (THM) DU QUARTIER PILOTE HA ET DU QUARTIER DE STOCKAGE HA

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Le dimensionnement THM du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA prend en compte les incertitudes résiduelles sur les propriétés thermiques et la surpression interstitielle de la couche du Callovo-Oxfordien, ainsi que celles intrinsèques aux modélisations dans la définition des entraxes spécifiques entre les alvéoles HA (cf. Tableau 2-10).

2.3.2.2 Le co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL

Certaines substances issues des déchets MA-VL peuvent être à l'origine de perturbations du Callovo-Oxfordien et modifier ses propriétés de transport et de rétention (solubilité et sorption). Les principales perturbations chimiques induites par ces déchets sont (i) la perturbation organique due à la dégradation des déchets MA-VL riches en composés organiques susceptibles de générer des espèces complexantes, et (ii) la perturbation saline due aux déchets MA-VL salins.

Pour gérer ce risque, les choix de conception visent à en réduire l'effet à la fois dans le Callovo-Oxfordien et sur les autres alvéoles. Ainsi des dispositions de conception restrictives sont prises en matière de co-stockage des déchets MA-VL dans un alvéole et en matière de séparation entre les alvéoles de déchets MA-VL susceptibles de générer des perturbations chimiques.

[37] Sans préjuger des optimisations futures (intégrant le retour d'expérience de l'exploitation du quartier pilote HA et des évolutions technologiques disponibles) qui pourraient être mises en œuvre d'ici la mise en service envisagée à l'horizon 2080 (35).

LE CO-STOCKAGE PHYSICO-CHIMIQUE DES COLIS DE DÉCHETS MA-VL

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  La gestion de ce risque est assurée par la définition de sept catégories physico-chimiques de déchets MA-VL (cf. Volume 3 du présent rapport) en fonction des caractéristiques des colis de déchets, catégorisation ensuite utilisée pour l'identification des déchets MA-VL susceptibles d'être placés dans un même alvéole. Sur cette base des distances minimales entre des alvéoles contenant des types de déchets différents susceptibles d'interagir entre eux sont définies.

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Ces dispositions de conception pour gérer ces risques de perturbations issues des déchets MA-VL sont intégrées dans toutes les situations du scénario d'évolution normale (cf. Tableau 2-10).

2.3.2.3 La distribution de l'inventaire de référence dans les quartiers de stockages HA et MA-VL

2.3.2.3.1 La distribution des inventaires en radionucléides et toxiques chimiques dans les quartiers de stockage HA

La chronique de livraison des colis de déchets HA comprend un certain nombre d'incertitudes (hormis pour les colis de déchets de la première mise en service prévue en phase industrielle pilote). En effet, il convient de ne pas préjuger des chroniques prévisionnelles de livraison sur une durée séculaire dans le cadre de l'évaluation de sûreté après fermeture.

Pour le stockage des déchets HA, un dimensionnement thermo-hydro-mécanique (THM) des quartiers est réalisé pour préserver les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien. Ce dimensionnement THM conduit donc à faire des hypothèses de chroniques de livraison des familles de déchets HA, sachant que cette chronique n'est à ce jour qu'illustrative et ne préjuge pas de ce qu'elle sera *in fine* (35). De plus, les quartiers de stockage HA sont situés en aval hydraulique de la base des liaisons surface-fond (LSF) par rapport à l'Oxfordien carbonaté, qui limite l'effet de drain hydraulique vers les LSF, et donc l'importance de cette voie de transfert en SEN et plus particulièrement en situation de dysfonctionnement des scellements.

Il a ainsi été fait le choix de retenir une distribution de l'inventaire des déchets HA cohérente avec les chroniques de livraison retenues pour le dimensionnement THM des quartiers de stockage HA à ce stade (35).

LA DISTRIBUTION DES INVENTAIRES EN RADIONUCLÉIDES ET TOXIQUES CHIMIQUES DANS LES QUARTIERS DE STOCKAGE HA

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Pour les quartiers de stockage HA, la distribution de l'inventaire en radionucléides, retenue dans les évaluations de sûreté après fermeture, correspond à celle des chroniques de livraison supports au dimensionnement thermique des quartiers HA (cf. Tableau 2-10).

  Les substances toxiques chimiques étant des accompagnants des déchets HA, la distribution de l'inventaire en toxiques chimiques dans l'architecture correspond à celle définie pour l'inventaire radiologique des mêmes familles de colis dans les quartiers HA.

2.3.2.3.2 La distribution des inventaires en radionucléides et toxiques chimiques dans le quartier de stockage MA-VL

Comme pour les déchets HA, en effet, il convient de ne pas préjuger des chroniques prévisionnelles de livraison sur une durée d'ordre séculaire (hormis pour les colis de déchets de la première mise en service prévue en phase industrielle pilote) dans le cadre de l'évaluation de sûreté après fermeture.

Pour s'affranchir de l'incertitude associée aux chroniques de livraisons, les évaluations de sûreté après fermeture considèrent une distribution de l'inventaire radiologique des déchets MA-VL indépendante des chroniques de livraison. À l'instar de l'approche retenue pour le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2), le mode de distribution retenu vise à majorer les transferts des radionucléides et des substances toxiques chimiques par la voie ouvrage (puits et descenderies) pour les scénarios de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture, sachant qu'une telle distribution n'influence pas les évaluations du scénario d'évolution normale. L'influence de différentes distributions sur les scénarios de sûreté est étudiée dans le cadre d'une étude de sensibilité.

LA DISTRIBUTION DES INVENTAIRES EN RADIONUCLÉIDES ET TOXIQUES CHIMIQUES DANS LE QUARTIER DE STOCKAGE MA-VL

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Pour le quartier de stockage MA-VL, la distribution de l'inventaire en radionucléides retenue pour les évaluations de sûreté après fermeture s'affranchit des incertitudes liées aux chroniques de livraison (cf. Tableau 2-10).

  La distribution proposée repose sur une répartition de l'inventaire qui consiste :

  - ✓ au remplissage des alvéoles de stockage par activité décroissante depuis le fond du quartier de stockage MA-VL (partie nord-est du quartier) ;
  - ✓ à classer les familles de colis de déchets par activité linéique décroissante ($Bq.m^{-1}$ linéaire de l'alvéole de stockage en tenant compte des modalités de stockage (empilements) et de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL.

  Tel que mentionné précédemment, les substances toxiques chimiques étant des accompagnants des déchets MA-VL, la redistribution de leur inventaire correspond à celle retenue pour l'inventaire radiologique des mêmes familles.

- **les études de sensibilité**

  Une étude de sensibilité sera effectuée afin d'évaluer l'influence de plusieurs modes de répartition de l'inventaire dans les alvéoles MA-VL sur les évaluations en après-fermeture, notamment les SEA et *What-if* de dysfonctionnement des scellements.

Tableau 2-10 Synthèse de l'analyse des risques et incertitudes vis-à-vis de l'architecture illustrative retenue pour les évaluations

Fonctions de sûreté : « Limiter le transfert jusqu'à la biosphère des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets » et « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
L'installation souterraine	**Épaisseur de couche du Callovo-Oxfordien dans la ZIOS en lien avec la position exacte du toit de la formation dans cette zone**	Positionnement des quartiers de stockage pour préserver une garde minimum de 50 m de Callovo-Oxfordien sain	En situation enveloppe du SEN : prise en compte de l'exigence de préserver une garde de 50 m

Fonctions de sûreté : « Limiter le transfert jusqu'à la biosphère des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets » et « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
	Incertitude sur la position finale du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien	Positionnement des quartiers de stockage pour préserver une garde minimum de 50 m de Callovo-Oxfordien sain	En situation enveloppe : prise en compte de deux positions du stockage par rapport au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien préservant une garde de 50 m
	Incertitude sur les propriétés thermiques de la couche du Callovo-Oxfordien	Prises en compte dans le dimensionnement THM du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA	Cf. Chapitre 2.2.2.3 du présent volume
	Incertitude sur l'occurrence d'une surpression interstitielle (contrainte de Terzaghi (σ_{eff}))	Prises en compte dans le dimensionnement THM du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA	/
	Influence de certaines substances contenues dans les déchets MA-VL sur les propriétés du Callovo-Oxfordien	Règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL	En SEN : Prise en compte des perturbation chimiques issus des déchets MA-VL sur la couche du Callovo-Oxfordien
	Chroniques de livraison	/	Pour les déchets MA-VL, redistribution des inventaires s'affranchissant des chroniques de livraison Pour le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA, redistribution des inventaires calé sur le dimensionnement THM du quartier Étude de sensibilité intégrant plusieurs manières de distribuer l'inventaire dans les alvéoles MA-VL

2.4 Les scellements des liaisons surface-fond et des galeries

La contribution des scellements des liaisons surface-fond (LSF) et des scellements des galeries aux fonctions de sûreté en après-fermeture est synthétisée dans le tableau 2-11 ci-après.

Tableau 2-11 Contribution des différents types de scellements dans le Callovo-Oxfordien à la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau »

Fonction de sûreté : « S'opposer à la circulation de l'eau »			
Sous-fonction	**Objectif**	**Type de scellement**	
Limiter les flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations sus-jacentes *via* les liaisons surface-fond	Limiter les flux d'eau provenant des formations sus-jacentes pendant le transitoire de saturation du stockage	Scellement des liaisons surface-fond dans l'USC/UT	
	Limiter les flux d'eau provenant du Callovo-Oxfordien drainés par le stockage après saturation totale du stockage (régime permanent)		Scellements des galeries dans l'UA
Limiter les vitesses de circulation d'eau dans les galeries	Organiser la distribution des gradients hydrauliques dans le stockage		

Pour rappel, la conception et les exigences spécifiées associées à chaque typologie de scellements sont les suivantes (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » et « Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond » (41, 42)) :

- les scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) sont réalisés dans l'unité silto-carbonatée (USC)/unité de transition (UT) et sont constitués d'un noyau argileux soutenu par un dispositif de confinement mécanique. Le soutènement est totalement déposé au droit du noyau argileux de sorte à assurer un contact direct entre le noyau argileux et les argilites :
  - ✓ la performance visée est une conductivité hydraulique[38] en grand du scellement $\leq 10^{-11}$ m.s^{-1} avec un noyau argileux dont la conductivité hydraulique envisagée à saturation est de 10^{-11} m.s^{-1} ;
- les scellements de galerie sont réalisés dans l'unité argileuse (UA) et sont constitués d'un noyau argileux également soutenu par un dispositif de confinement mécanique et des zones de dépose partielles du revêtement en béton remplies par le même matériau argileux que le noyau :
  - ✓ la performance visée est une conductivité hydraulique en grand du scellement $\leq 10^{-9}$ m.s^{-1} avec un noyau argileux dont la conductivité hydraulique envisagée à saturation est de 10^{-11} m.s^{-1}.

L'analyse des risques et incertitudes des scellements concerne les composants suivants :

- le noyau argileux dont l'analyse est effectuée de manière commune aux deux types de scellements (LSF et galeries) au regard des similarités de conception et des exigences associées ;
- l'interface noyau-argilites dont l'analyse prend en compte les différences de conception entre les deux types de scellements (dépose totale ou partielle du revêtement-soutènement) et la différence de comportement hydromécanique selon l'unité (UA, USC/UT) de la couche du Callovo-Oxfordien.

[38] La notion de perméabilité en grand doit être complétée par des éléments de géométrie (longueur et section du noyau de scellement) pour correspondre à une performance hydraulique.

CRITÈRE DE DYSFONCTIONNEMENT DES SCELLEMENTS

Dans le cadre de l'analyse des risques et incertitudes des scellements, le dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond et des scellements des galeries est caractérisé par :

- un noyau argileux dont la conductivité hydraulique est significativement supérieure à 10^{-11} m.s^{-1} (typiquement d'un ordre de grandeur) ;
- les scellements des liaisons surface-fond sont considérés dysfonctionnant si une conductivité hydraulique significativement supérieure à 10^{-11} m.s^{-1} de l'un des deux composants (typiquement un ordre de grandeur), même de faible section, conduit à une conductivité hydraulique équivalente du scellement « en grand » également supérieure à 10^{-11} m.s^{-1} ;
- les scellements des galeries sont considérés dysfonctionnant si une conductivité hydraulique significativement supérieure à 10^{-9} m.s^{-1} de l'un des deux composants (typiquement un ordre de grandeur), même de faible section, conduit à une conductivité hydraulique équivalente du scellement « en grand » également supérieure à 10^{-9} m.s^{-1}.

2.4.1 Le noyau argileux des scellements

2.4.1.1 Les caractéristiques intrinsèques du noyau argileux des scellements et sa mise en place

L'Andra possède un important corpus de connaissances acquises sur les matériaux ouvragés argileux, en particulier ceux à base d'argile gonflante, tant sur leur comportement que sur leur mise en œuvre, grâce à de nombreux essais menés sur différents types d'argile gonflante et différents modes de mise en forme (briques, pellets, par damage, par injection…), de mise en place, seuls ou de manière combinée, à échelles métriques à pluri-métriques. La composition minéralogique du matériau argileux ainsi que la longueur du noyau argileux ne sont pas spécifiées à ce stade[39].

Les études de mise en forme et de mise en place, *in situ* dans des configurations proches ou identiques à celles d'un stockage ou en surface par démonstrateur ont consolidé (41) :

- la faisabilité de la mise en place de noyau en argile gonflante :
  - ✓ jusqu'à une échelle verticale de 8 mètres à 9 mètres pour ce qui concerne les galeries ;
  - ✓ pour les puits, la verticalité est une aide à la mise en place et contribue à ce que celle-ci ne présente pas de problème particulier ;
  - ✓ l'essai de remblayage d'une maquette de galerie en surface, à Richwiller (remblayage mis en œuvre avec le marin issu de la couche du Callovo-Oxfordien) conforte la faisabilité des scellements de descenderies (ouvrages inclinés) ;
- la faisabilité d'une gamme de solutions de mise en forme du noyau, notamment l'utilisation des pellets, pour assurer un remplissage optimal et ainsi un contact aussi parfait que possible et maîtrisé entre le noyau et les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- la faisabilité de la mise en place de volumes de béton significatifs en configuration de galerie, avec notamment une bonne interface avec la roche (ou le revêtement) et des caractéristiques mécaniques conformes à celles attendues et mesurées sur échantillon) ;
- la faisabilité du creusement de saignées (variante). La méthode de remplissage doit être adaptée à des cas où la saignée réalisée dans l'argilite a potentiellement des épontes irrégulières (phénomène non constaté en Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne).

[39] Plusieurs types d'argile gonflante ont été étudiés sur les plans de leurs caractéristiques physico-chimiques et de leur mise en œuvre (technologie), et particulièrement celle de type bentonite MX80 (Montmorillonite sodique). Les performances associées à leur utilisation pour constituer le noyau argileux ont été évaluées.

Cet acquis montre que l'objectif d'une conductivité hydraulique du noyau argileux à saturation de 10^{-11} m.s^{-1} peut être atteinte avec différents types d'argile et correspond à un large domaine de densité sèche de mise en place et donc à diverses méthodes de mise en forme et de mise en place. De plus, un contrôle de la mise en place des noyaux de scellements sera réalisé. Ainsi, le risque associé à une situation où le noyau argileux n'atteindrait pas la performance hydraulique voulue (pression de gonflement et conductivité hydraulique) est jugée comme très peu vraisemblable. Ce risque est postulé sous la forme d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements (cf. Encadré ci-après).

La présence d'argile dans le noyau du scellement représente une caractéristique favorable à la rétention de radionucléides et de substances toxiques chimiques et peut ainsi contribuer à la fonction de sûreté « Retarder et atténuer les flux de radionucléides relâchés dans les ouvrages », bien que ce ne soit pas une exigence.

LES CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES DU NOYAU ARGILEUX DES SCELLEMENTS ET SA MISE EN PLACE

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que les scellements remplissent leurs exigences, un contrôle qualité de la fabrication et de la réalisation des scellements sera mis en place (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » et « Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond » (41, 42)).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Sur la base des exigences spécifiées et des connaissances scientifiques et technologiques, il est fait les choix suivants en scénario d'évolution normale (SEN) :

  - ✓ dans toutes les situations du SEN, la longueur du noyau est définie comme la longueur minimale issues des options de conception définies à ce stade (41) ;
  - ✓ en situation enveloppe, les caractéristiques intrinsèques du noyau argileux sont définies sur la base des exigences spécifiées (conductivité hydraulique de 10^{-11} m.s^{-1}). Le noyau argileux n'ayant pas de fonction au regard de ses caractéristiques de transport par diffusion ou de rétention, ces caractéristiques favorables ne sont pas prises en compte ;
  - ✓ en situation de référence, les caractéristiques intrinsèques du noyau argileux sont définies au plus proche de la connaissance sur les matériaux à base de bentonite (y compris pour ses caractéristiques de transport et rétention).

- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Dans le cadre des études de robustesse, le risque associé à un noyau argileux qui n'atteindrait pas la performance hydraulique voulue est jugé comme très peu vraisemblable. Une telle situation est postulée dans le cadre d'un scénario de type « *What-if* » qui considère une absence de gonflement du noyau argileux suite à la mise en place d'un matériau ou une évolution non anticipée du noyau qui ne permettrait pas d'atteindre la performance voulue.

Tableau 2-12 *Synthèse des risques et incertitudes vis-à-vis des caractéristiques intrinsèques du noyau argileux et de la mise en place et des modalités de gestion associées*

Fonction de sûreté : « S'opposer à la circulation de l'eau »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Le noyau argileux des scellements des LSF	**Le risque de réalisation d'un noyau argileux des scellements des LSF qui n'atteindrait pas la performance hydraulique voulue**	Choix des argiles gonflantes et de leur densité Contrôle qualité à la mise en place : noyau argileux conforme aux exigences	• Situation enveloppe du SEN : représentation selon les exigences spécifiées ; • Situation de référence du SEN : représentation au meilleur de la connaissance ; • Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des LSF par le noyau argileux.
Le noyau argileux des scellements de galerie	**Le risque de réalisation d'un noyau argileux de scellements de galerie dans l'UA qui n'atteindrait pas la performance hydraulique voulue**	Choix des argiles gonflantes et de leur densité Contrôle qualité à la mise en place : noyau argileux conforme aux exigences	• Situation enveloppe du SEN : représentation selon les exigences spécifiées ; • Situation de référence du SEN : représentation au meilleur de la connaissance ; • Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux.

2.4.1.2 Les perturbations issues des composants environnants sur le noyau argileux des scellements

Compte tenu des caractéristiques intrinsèques du noyau sollicitées pour contribuer à la réalisation des (sous)fonctions de sûreté après fermeture (conductivité hydraulique), ce sont essentiellement les perturbations susceptibles d'impacter ces caractéristiques qui sont analysées.

2.4.1.2.1 Perturbation mécanique en lien avec le dispositif de confinement mécanique du noyau argileux des scellements

Le noyau argileux des scellements doit être confiné mécaniquement afin de permettre sa mise en charge hydromécanique à volume constant et ainsi favoriser la reprise éventuelle des jeux de mise en place et une bonne interface hydraulique avec les argilites. S'il est admis que les terrains sus et sous-jacents permettent intrinsèquement de confiner le noyau radialement, un dispositif particulier doit être conçu pour étendre ce confinement dans la direction longitudinale (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » (41)).

Il est considéré à ce stade de la conception, la mise en place (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » et « Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond » (41, 42)) :

- pour les scellements des descenderies dans l'unité silto-carbonatée (USC) et des galeries dans l'unité argileuse (UA), deux grandes familles de solutions techniques de scellements horizontaux (25, 41) :
  - ✓ un noyau confiné entre des massifs de béton de part et d'autre du noyau (ancrés ou non) dont le but est de limiter l'expansion longitudinale du noyau, plus particulièrement pendant sa resaturation. Leur longueur et leurs modalités d'ancrage (redan, frettage…) sont dimensionnés à cette fin ;
  - ✓ un noyau directement au contact du remblai de galerie, et avec une longueur suffisamment grande pour limiter les déformations d'extension longitudinale au niveau des zones de dépose du revêtement/soutènement, en mobilisant le frottement du noyau sur le revêtement/soutènement laissé en place. Il n'y a plus besoin d'assurer un confinement mécanique total du noyau ; celui-ci peut se déformer longitudinalement à l'interface avec le remblai sans entrainer des déformations importantes au niveau des zones de déposes qui font la performance hydraulique des scellements ;
- pour les scellements des puits :
  - ✓ en partie supérieure, le dispositif de confinement du noyau de scellement est un massif d'appui en béton peu épais et frottant dont le seul rôle est de protéger le noyau des arrivées d'eau à court terme (le temps de la construction) ;
  - ✓ compte-tenu de la proximité du fond du puits, le noyau s'appuie, en partie basse, sur un remplissage complet du fond du puits par un matériau non compressible de type béton, en s'affranchissant ainsi de la construction du massif inférieur d'appui du scellement.

Les incertitudes résiduelles concernent le choix final de la conception du dispositif de confinement du scellement, notamment la faisabilité de l'ancrage des massifs d'appui dans l'argilite et l'atteinte de la performance mécanique visée de ces derniers. Cependant, les connaissances acquises à ce stade (expérimentation FSS, essai canadien) ont montré la faisabilité de ce type d'ouvrages en béton.

Un contrôle qualité de la fabrication et de la réalisation des scellements sera réalisé au moment de la fermeture (mise en place, résistance au glissement sous la poussée du noyau argileux, maîtrise de la température d'hydratation du béton des massifs d'appui en fonction de la classe de ciment choisie (25)). Ainsi, le risque d'une mise en place d'un dispositif de confinement non conforme aux exigences est jugé comme très peu vraisemblable, il est néanmoins postulé pour la définition de scénarios *What-if* (cf. Encadré ci-dessous).

LE DISPOSITIF DE CONFINEMENT MÉCANIQUE DU NOYAU ARGILEUX

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que les scellements remplissent leurs exigences de performance, un contrôle qualité de la fabrication et de la réalisation des scellements sera mis en place (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » et « Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond » (41, 42)).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Le dispositif de confinement mécanique du noyau favorise le développement d'une pression de gonflement dans le noyau apte à refermer les fractures connectées de la zone endommagée par le creusement, puis à permettre leur auto-colmatage, et ainsi à garantir un bon contact de la bentonite du noyau avec la roche. À ce stade le choix suivant est retenu en scénario d'évolution normale (SEN) :

  ✓ le dispositif de confinement mécanique des scellements assure son rôle de confinement mécanique du noyau. Il est représenté dans toutes les situations du SEN comme un matériau poreux homogène avec des propriétés hydro-dispersives pénalisantes (assimilé à un sable) et sans rétention chimique pour s'affranchir de ces caractéristiques qui ne sont pas sollicitées.

- **la gestion des risques internes et incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Le risque d'une non tenue mécanique du dispositif de confinement du noyau argileux qui induirait des performances de celui-ci inférieures à celles attendues est jugé comme un risque très peu vraisemblable. Dans le cadre des études de robustesse, le dysfonctionnement est postulé dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux qui postule une absence de gonflement de ce dernier.

Tableau 2-13 Synthèse des risques et incertitudes associées aux perturbations mécaniques du scellement et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « S'opposer à la circulation de l'eau »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Le noyau argileux des scellements des LSF	**Risque de mise en place du dispositif de confinement mécanique des scellements des LSF non conforme aux exigences**	Contrôle qualité à la mise en place : dispositif de confinement conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des LSF par le noyau argileux
Le noyau argileux des scellements des LSF	**Risque de non tenue des massifs d'appui sous la poussée du noyau argileux des scellement de LSF**	Dimensionnement et contrôle qualité à la mise en place : dispositif de confinement conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des LSF par le noyau argileux
Le noyau argileux des scellements de galeries	**Risque de mise en place du dispositif de confinement mécanique des scellements des galeries dans l'UA non conforme aux exigences**	Contrôle qualité à la mise en place : dispositif de confinement conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux
Le noyau argileux des scellements de galeries	**Risque de non tenue des massifs d'appui sous la poussée du noyau argileux des scellements de galerie**	Dimensionnement et contrôle qualité à la mise en place : dispositif de confinement conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux

2.4.1.2.2 La perturbation alcaline des noyaux argileux de scellements

Afin de couvrir la flexibilité de la conception, il est considéré que les composants en béton adjacents au noyau argileux sont en béton « usuels » afin de maximiser l'extension de la perturbation alcaline dans les évaluations de performance et de sûreté.

L'Andra dispose d'un bon niveau de connaissance sur l'influence de la perturbation alcaline induite par un milieu cimentaire sur les matériaux à base de bentonite notamment à travers des études de caractérisation de la porosité, du comportement hydromécanique, du potentiel de gonflement suite à une resaturation à long terme par de l'eau cimentaire (32).

Les évaluations numériques de type transport réactif permettent de caractériser les extensions spatiales de la perturbation alcaline qui, pour ce qui concerne la zone reminéralisée dans le noyau argileux (ou les argilites au contact, (cf. Chapitre 2.2.2.4 du présent volume), sont au plus de l'ordre de quelques décimètres au contact d'un béton de type CEM I après 100 000 ans (25). Par ailleurs, si des matériaux cimentaires bas pH devaient être utilisés, il est à noter qu'il n'y a pas de perturbation de la minéralogie des matériaux argileux à leur contact.

La conception et le dimensionnement des scellements des galeries, plus particulièrement une proportion adaptée d'argile gonflante vis-à-vis de la quantité de béton et le retrait local du revêtement-soutènement permet un contact direct du noyau avec les argilites sur une longueur d'ordre métrique à pluri-métrique avec une zone du noyau peu affectée par la perturbation alcaline.

Les incertitudes résiduelles concernent principalement l'organisation spatiale de la perturbation alcaline dans le noyau lors de sa resaturation par une eau cimentaire et son influence sur ses propriétés de gonflement et la perméabilité aux gaz (25).

Ces incertitudes sont prises en compte dans les modalités de représentation de la perturbation alcaline susceptible d'affecter le noyau argileux (cf. Encadré ci-dessous et tableau 2-14). Au regard de l'ensemble des connaissances acquises, une évolution chimique non anticipée du noyaux argileux (par la perturbation alcaline) est considérée comme très peu vraisemblable. Un tel évènement est postulé dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements.

LA PERTURBATION ALCALINE DU NOYAU ARGILEUX

- **gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que les scellements remplissent leurs exigences, le choix du béton au contact du noyau argileux (usuel ou bas-pH) sera effectué de sorte à ce qu'il n'engendre pas, de par sa présence, d'effet négatif sur les capacités de gonflement du noyau argileux (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » et « Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond » (41, 42)).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  La zone reminéralisée du noyau argileux est assimilée dans toutes les situations du SEN au composant en béton dont est issue la perturbation (propriétés hydrauliques assimilées à celles d'un sable sans propriétés de transport ni rétention chimique).

  Pour tenir compte de la connaissance acquise, la rétention par sorption est valorisée dans le noyau argileux en situation de référence du SEN (cf. Chapitre 2.4.1.1 du présent volume). À ce titre, l'influence de la zone influencée sur les paramètres de sorption et de solubilité est représentée en situation de référence.

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Le cas d'un évènement où le noyau argileux n'atteindrait pas la performance hydraulique voulue en lien avec sa resaturation en milieu cimentaire est jugée comme très peu vraisemblable. Il conduit à postuler ce dysfonctionnement dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement du noyau argileux.

Tableau 2-14 Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation alcaline des noyaux argileux de scellements et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « S'opposer à la circulation de l'eau »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Le noyau argileux des LSF et galeries	**Incertitude sur l'organisation spatiale de la perturbation alcaline au regard de la resaturation du noyau argileux par une eau cimentaire**	Choix du béton au contact du noyau argileux	• En SEN : Prise en compte de l'influence d'un béton usuel pour tous les ouvrages et prise en compte de l'extension maximale de la perturbation ; • Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux.

2.4.1.2.3 L'activité bactérienne dans le noyau argileux de scellements

Au sein des argiles gonflantes constituant le noyau des scellements, l'espace nécessaire pour le développement des microorganismes demeure très limité (comme pour la couche du Callovo-Oxfordien saine, cf. Chapitre 2.2.2.7.1 du présent volume). À ce stade des connaissances, une activité microbienne pourrait être attendue dès lors que la densité sèche des bentonites est inférieure à 1 400 kg.m^{-3} (38).

En cas de présence d'une activité microbienne, la transformation minéralogique des smectites est un phénomène réactionnel potentiel. Toutefois, ces effets sont attendus comme limités en termes de réduction des capacités de gonflement au regard notamment des densités envisagées (>1 400 kg.m^{3}), de la nature de la bentonite considérée et de la quantité limitée de nutriments/sources d'énergie disponible. Ainsi, le risque associé à une situation où le noyau argileux n'atteindrait pas la performance hydraulique voulue en lien avec l'activité bactérienne est jugée comme très peu vraisemblable. Ce risque est postulé dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements.

Des développements microbiens significatifs ne seraient ainsi attendus qu'au niveau des interfaces avec les argilites ce qui renvoi aux chapitres 2.2.2.7.2 et 2.4.2.3.3 du présent volume.

L'ACTIVITÉ BACTÉRIENNE DANS LE NOYAU ARGILEUX

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**
  Les risques associés à une influence de l'activité bactérienne sur les propriétés de gonflement du noyau argileux sont pris en compte dans le choix de la densité de la bentonite considérée.
- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**
  Au regard des connaissances acquises (38), il n'est pas considéré d'influence de l'activité bactérienne sur les performances du noyau argileux et en conséquence du scellement en grand.
- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***
  Le cas d'un évènement où le noyau argileux n'atteindrait pas la performance hydraulique voulue en lien avec une activité bactérienne est jugée comme très peu vraisemblable. Il est postulé dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement du noyau argileux des scellements.

Tableau 2-15 *Synthèse des risques et incertitudes liés à l'activité bactérienne dans les noyaux argileux des scellements et des modalités de gestion associées*

Fonction de sûreté : « S'opposer à la circulation de l'eau »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Le noyau argileux des scellements de LSF et de galeries	**Incertitude sur une influence de l'activité bactérienne sur les propriétés de gonflement du noyau argileux**	Densité de la bentonite	SEN : Pas d'influence de l'activité bactérienne Couvert par le *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux

2.4.2 L'interface noyau-argilites

2.4.2.1 Le linéaire de dépose des scellements des liaisons surface-fond

Au niveau des scellements des liaisons surface-fond, le revêtement-soutènement est entièrement déposé sur toute la longueur de mise en place du noyau argileux afin d'avoir un contact direct argile gonflantes/argilites de la couche du Callovo-Oxfordien permettant l'atteinte des performances visées des scellements.

Dans l'unité silto-carbonatée (USC) concernant les scellements de puits et descenderies, la faisabilité de la dépose en sécurité d'un revêtement a été étudiée notamment par expérimentations effectuées au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Les propriétés mécaniques des argilites de l'USC sont favorables à la limitation d'une zone endommagée. La très bonne tenue constatée des terrains non soutenus est un élément favorable du point de vue de la mise en œuvre technologique et les essais au Laboratoire souterrain (expérimentation DCN en niche -445 mètres) ne montrent pas d'extension de la zone endommagée après avoir enlevé les cintres, ni une reprise de convergence.

Les connaissances démontrent la possibilité de déposer le revêtement-soutènement sur toute la hauteur du noyau argileux. De plus, un contrôle qualité de la réalisation de la dépose sera réalisé au moment de la fermeture (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » et « Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond » (41, 42)).

À ce titre, l'analyse des risques et incertitudes de cette zone d'interface qui est entièrement constituée de noyau argileux renvoie à l'analyse du noyau argileux de scellements (cf. Chapitre 2.4.1 du présent volume).

2.4.2.2 Le linéaire de dépose des scellements des galeries

L'interface entre le noyau argileux des scellements de galerie réalisés dans l'unité argileuse (UA) et les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien comprend la dépose partielle des voussoirs (ou revêtement) et leur remplissage par le même matériau à base d'argile gonflante afin d'avoir un contact direct argile gonflantes/argilites de la couche du Callovo-Oxfordien permettant l'atteinte des performances visées des scellements de galeries.

Le linéaire de dépose dans sa globalité correspond au linéaire situé entre le noyau et les argilites en paroi et constitué d'une succession de portions de revêtement-soutènement laissées en place et de l'argile gonflante de même nature que le noyau argileux. Ce linéaire de dépose contribue à la performance hydraulique du scellement (cf. Chapitre 2.4 du présent volume) et n'a pas d'autres fonction de sûreté en dehors de sa participation à la détermination de la conductivité hydraulique en grand du scellement.

La faisabilité de la dépose du revêtement-soutènement dans l'UA reste à démontrer et l'expérimentation DDV « Dépose de voussoirs » réalisé au Laboratoire souterrain du centre de Meuse/Haute-Marne est programmée à cette fin et visera à démontrer la performance d'une solution dans des conditions représentatives (25, 41). Néanmoins, il existe un retour d'expérience à l'international qui permet de justifier la faisabilité technologique (41).

L'objectif de résistance hydraulique visé nécessite de pouvoir remplir les zones de dépose avec de l'argile gonflante et ce, avec une bonne homogénéité et en minimisant les vides au niveau le plus faible possible. À ce stade des connaissances (25, 41), le traitement des interfaces ne pose pas de problème particulier, et l'Andra dispose d'une palette de solutions, notamment l'utilisation des pellets, pour assurer un remplissage optimum et un contact aussi parfait que possible et maitrisé entre le noyau et la roche.

De plus, un contrôle qualité de la réalisation de la dépose et la mise en place du noyau argileux dans les zones de dépose sera réalisé au moment de la fermeture (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » (41)). Les risques d'une dépose du revêtement/soutènement non conforme aux exigences ou d'une mise en place du noyau argileux dans ces zones de dépose non conforme aux exigences sont jugés comme très peu vraisemblables, néanmoins ces éventualités sont postulées dans le cadre d'un scénario *What-if* (cf. Encadré ci-après).

Au regard des connaissances acquises sur la dégradation mécanique dans le temps des ouvrages en béton, il n'est pas attendu que cette dégradation du revêtement-soutènement laissé en place dans le temps puisse remettre en cause l'atteinte des performances hydrauliques exigées des scellements des galeries dans l'UA (25, 41).

LE LINÉAIRE DE DÉPOSE AU NIVEAU DES SCELLEMENTS DE GALERIES

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que les scellements remplissent leurs exigences, un contrôle qualité de la fabrication et de la réalisation des scellements sera mis en place (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » et « Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond » (41, 42)).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Au regard des dispositions de conceptions actuelles et des connaissances scientifiques et technologiques disponibles, le linéaire de dépose est représenté comme un milieu poreux homogène dont la conductivité hydraulique est égale à la moyenne harmonique de celle des portions de revêtement-soutènement laissées en place et des zones de dépose remplies par de l'argile gonflante.

  Les propriétés de transport du linéaire de dépose sont assimilées à celles d'un sable sans rétention chimique par précipitation ou sorption.

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Les incertitudes résiduelles associées à la réalisation des zones de dépose et le risque associé à une mise en place du noyau argileux dans les zones de dépose qui ne respecterait pas les exigences (défaut du contrôle qualité) sont jugés très peu vraisemblables. Ils sont postulés dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements de galeries par l'interface.

  Les risques associés à une mise en place d'un noyau argileux dans les zones de dépose qui ne respecterait pas ses exigences et/ou d'un défaut du contrôle qualité lors de la réalisation du scellement sont postulés dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux.

Tableau 2-16 Synthèse des risques et incertitudes associés au linéaire de dépose des scellements de galerie et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « S'opposer à la circulation de l'eau »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Linéaire de dépose des scellements des galeries	**Risque d'une zone de dépose non conforme aux exigences**	Contrôle qualité : dépose partielle conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface
Linéaire de dépose des scellements des galeries	**Risque de mise en place du noyau argileux dans les zones de dépose non conforme aux exigences**	Contrôle qualité : mise en place du noyau dans les zones de dépose conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux

2.4.2.3 Les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien au contact des scellements

Les argilites au contact des scellements contribuent à la performance hydraulique « en grand » des scellements (cf. Chapitre 2.4 du présent volume).

2.4.2.3.1 Interface noyau-argilites des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies)

Au Laboratoire souterrain, la zone fracturée connectée (ZFC) et la zone fracturée discrète (ZFD) ne sont pas observées dans l'unité silto-carbonatée (USC/UT) de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2.2.2.1 du présent volume) où sont réalisés les scellements des liaisons surface-fond.

À ce stade, en lien avec les incertitudes actuelles sur le comportement différé des argilites dans l'USC/UT (cf. Chapitre 2.2.2.1 du présent volume), et bien que la structure carbonatée de ces argilites rende peu vraisemblable un comportement différé significatif (qui serait limité par ailleurs par la présence du noyau des scellements), la situation considérant la formation au cours du temps d'une zone fracturée connectée[40] continue longitudinalement au droit du noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond ne peut être totalement exclue. Elle est considérée dans le cadre d'un scénario d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface (cf. Encadré ci-après et tableau 2-17).

Il est à noter que lors de la réalisation du scellement, après dépose du revêtement-soutènement, la surface d'argilite qui apparaîtrait fracturée ou altérée est purgée (suppression de la surface d'argilite qui apparaîtrait fracturée ou altérée) (41). De plus, l'Andra a retenu que, dans le cadre de la mise en place d'un matériau de bourrage derrière les voussoirs dans l'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien et notamment au niveau des sections accueillant un scellement, des dispositions permettant l'auto-colmatage des fractures connectées sur de longues durées seront prises (choix de matériau compatible avec les argilites, faible pression d'injection) (34).

À ce stade des dispositions de conception (purge) et des connaissances sur l'infiltration des matériaux injectés dans l'unité argileuse (UA) avec présence d'une ZFC (34), les risques sur les propriétés de l'interface associés à la mise en place d'un matériau de bourrage qui ne respecte pas ses exigences ou à une purge des argilites non conforme aux exigences sont jugés comme très peu vraisemblables notamment dans l'USC/UT où il n'est pas observé de ZFC. Ces éventualités sont néanmoins postulées dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface.

[40] Au sens structure de la zone fracturée connectée (ZFC) observée dans l'unité argileuse (UA) où sont implantés les ouvrages de stockage.

L'ENDOMMAGEMENT MÉCANIQUE DE LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN AU DROIT DU NOYAU ARGILEUX DES SCELLEMENTS DES LIAISONS SURFACE-FOND

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que les scellements remplissent leurs exigences, un contrôle qualité de la fabrication et de la réalisation des scellements sera mis en place (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » et « Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond » (41, 42)).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Au niveau des scellements des liaisons surface-fond, le revêtement-soutènement est entièrement déposé sur toute la longueur du scellement et le linéaire de dépose du revêtement-soutènement est assimilé au noyau argileux.

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Les incertitudes résiduelles de connaissance sur l'autocolmatage et le comportement différé des argilites dans l'unité silto-carbonatée (USC) ont conduit à l'identification d'un SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface (cf. Chapitre 2.2.2.1 du présent volume).

  les risques d'un matériau de bourrage non purgé et/ou qui ne resperait pas ses exigences, ou d'une purge non conforme aux exigences sont considérés comme très peu vraisemblables. Ces évènements sont postulés dans le cadre d'un What-if de dysfonctionnement des scellements par l'interface.

  L'effet induit d'un dysfonctionnement de l'interface à la suite d'un dysfonctionnement du noyau argileux (mauvais contact hydromécanique) est postulé dans le cadre d'un scénario What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau.

Tableau 2-17 Synthèse des risques et incertitudes associées au comportement des argilites au droit du noyau argileux des scellements des LSF et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « S'opposer à la circulation de l'eau »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Les argilites au droit du noyau des LSF	**Incertitude résiduelle sur l'auto-colmatage et le comportement différé des argilites dans l'USC/UT**	/	SEA de dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface
Les argilites au droit du noyau des LSF	**Risque d'injection d'un matériau de bourrage non conforme aux exigences**	Contrôle qualité de la purge : interface dans l'USC/UT conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface
Les argilites au droit du noyau des LSF	**Risque d'une purge des argilites fracturées ou altérées non conforme aux exigences.**	Contrôle qualité de la purge : interface dans l'USC/UT conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface

2.4.2.3.2 Interface noyau-argilites des scellements des galeries

De par ses caractéristiques mécaniques, le noyau argileux contribue à limiter toute évolution de la zone endommagée et notamment à favoriser la cicatrisation hydraulique de la zone fracturée connectée (ZFC) (25).

Les incertitudes résiduelles résident principalement sur le couplage hydromécanique entre le noyau argileux et les argilites suite à la dépose du revêtement et sur la capacité du noyau à reproduire par sa pression de gonflement l'effet mécanique bénéfique à la récupération d'une faible conductivité hydraulique sur toute la profondeur de la ZFC (34). Au regard des connaissances acquises à ce stade sur l'auto-colmatage et l'évolution différée des argilites dans l'unité argileuse (UA) sous contrainte mécanique (25, 41), l'occurrence d'une interface qui ne permettrait pas d'atteindre les exigences de conductivité hydraulique est jugée comme peu vraisemblable. Ces éléments conduisent à l'identification d'un scénario d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface (cf. Encadré ci-après et tableau 2-18).

À ce stade, des dispositions de conception (purge, exigences sur le matériau injecté à l'extrados des voussoirs sur l'auto-colmatage de l'interface (34)), les risques sur les propriétés de l'interface associés à la mise en place d'un matériau de bourrage qui ne respecte pas ses exigences ou à une purge des argilites non conforme aux exigences sont jugés comme très peu vraisemblables. Ces risques sont postulés dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface (cf. Encadré ci-après et tableau 2-18).

Au regard de sa très faible extension, la perturbation alcaline au sein de l'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien au droit des revêtements-soutènements laissés en place n'est pas de nature à remettre en cause les performances hydrauliques du scellement en grand (25). Sa représentation reste celle définie au chapitre 2.2.2.4 du présent volume.

Au droit des revêtements-soutènements laissés en place des scellements des galeries dans l'UA, l'analyse des risques et incertitudes de l'endommagement mécanique est identique à celle aux droits des galeries remblayées et n'est pas de nature à remettre en cause les performances hydrauliques du scellement en grand (cf. Chapitre 2.4 du présent volume).

L'ENDOMMAGEMENT MECANIQUE DE LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN AU DROIT DU LINEAIRE DE DEPOSE DES SCELLEMENTS DES GALERIES

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que les scellements remplissent leur exigences, un contrôle qualité de la fabrication et de la réalisation des scellements sera mis en place (41).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Les connaissances acquises permettent de prendre en compte le processus de cicatrisation hydraulique dans le scénario d'évolution normale (SEN), ce qui conduit à considérer :

  ✓ en situation enveloppe du SEN :
  - une zone fracturée connectée (ZFC) au droit du linéaire de dépose du revêtement représentée comme un matériau poreux homogène dont la conductivité hydraulique correspond à la valeur minimale pour que la conductivité hydraulique en grand du scellement soit égale à la valeur exigée de 10^{-9} m.s^{-1} en grand ;
  - une zone fracturée discrète (ZFD) représentée selon les modalités présentées au chapitre 2.2.2.1 du présent volume avec des caractéristiques hydro-dispersives et de rétention conservatives ;

  ✓ en situation de référence du SEN, la ZFC au droit du linéaire de dépose est représentée comme un matériau poreux homogène dont la conductivité hydraulique correspond à la moyenne harmonique des conductivités hydrauliques « de référence » des sections suivantes de ZFC :
  - la ZFC au droit du revêtement-soutènement laissée en place est considérée identique à la ZFC au droit du revêtement-soutènement des galeries remblayées dans l'UA et intègre l'influence de la perturbation alcaline (cf. Chapitre 2.2.2.4 du présent volume) ;
  - la ZFC au droit des zones de dépose où est valorisé un processus de cicatrisation hydraulique « efficace » induit un « bon contact » entre le noyau gonflant et les argilites.

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Les incertitudes résiduelles sur l'auto-colmatage et le comportement différé des argilites au droit du noyau argileux des scellements sont gérées par un scénario d'évolution altérée (SEA) qui considère le dysfonctionnement des scellements de galerie par l'interface.

  Les risques d'un matériau de bourrage non purgé et/ou qui ne respecterait pas ses exigences, ou d'une purge non conforme aux exigences sont considérés comme très peu vraisemblables. Ces évènements sont postulés dans le cadre d'un *What-if* de dysfonctionnement des scellements par l'interface.

  L'effet induit d'un dysfonctionnement de l'interface à la suite d'un dysfonctionnement du noyau argileux (mauvais contact hydromécanique) est postulé dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau.

Tableau 2-18 *Synthèse des risques et incertitudes des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien au droit du noyau argileux des scellements et des modalités de gestion associées*

Fonction de sûreté : « S'opposer à la circulation de l'eau »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Les argilites au droit du noyau des scellements des galeries	**Incertitude sur l'auto-colmatage et le comportement différé des argilites dans l'UA**	/	SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface
Les argilites au droit du noyau des scellements des galeries	**Incertitude résiduelle sur le couplage hydromécanique entre le noyau argileux des scellements et les argilites dans l'UA**	Choix des argiles gonflantes et de leur densité : interface dans l'UA conforme aux exigences	SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface
Les argilites au droit du noyau des scellements des galeries	**Incertitude sur l'évolution de la zone endommagée des argilites suite à la dépose partielle du soutènement**	Choix des argiles gonflantes et de leur densité : interface dans l'UA conforme aux exigences	SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface
Les argilites au droit du noyau des scellements des galeries	**Risque d'injection d'un matériau de bourrage non conforme aux exigences**	Contrôle qualité de la purge : interface dans l'UA conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface
Les argilites au droit du noyau des scellements des galeries	**Risque d'une purge des argilites fracturées ou altérées non conforme aux exigences.**	Contrôle qualité de la purge : interface dans l'UA conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface

2.4.2.3.3 L'activité bactérienne au niveau de l'interface noyau-argilites

Des études sur l'influence de l'activité bactérienne sur le fonctionnement des scellements ont été conduites depuis le dossier d'option de sûreté. C'est aux interfaces entre composants que l'activité la plus importante a été observée, et ce grâce aux tailles de pores suffisamment grandes et à l'arrivée de nutriments par diffusion depuis les roches argileuses (38).

Les études ont ainsi porté sur les interfaces entre le noyau et la zone endommagée mécaniquement de la couche du Callovo-Oxfordien où des augmentations locales de la taille des pores au niveau des fractures/fissures pourraient permettre un développement bactérien bien qu'il soit attendu que les phénomènes d'auto-colmatage réduisent cet espace (38). Par ailleurs, les phénomènes et les cinétiques associées à l'activité bactérienne peuvent modifier la composition et la pression des gaz mais ne sont pas de nature à dégrader les performances globales des scellements (38).

L'ACTIVITÉ BACTÉRIENNE AU NIVEAU DE L'INTERFACE NOYAU-ARGILITES DES SCELLEMENTS

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**
  Au regard des connaissances acquises (38), l'influence de l'activité bactérienne au niveau de l'interface noyau-argilites est considérée comme négligeable en SEN.

2.5 Le transitoire Hydraulique – Gaz

Après sa fermeture, le stockage entre dans une phase de transitoire hydraulique-gaz, due à sa resaturation progressive par les eaux de la couche du Callovo-Oxfordien et à la production transitoire d'hydrogène principalement par corrosion en condition anoxique des composants métalliques présents dans le stockage et dans une bien moindre mesure par la radiolyse des déchets organiques MA-VL (25, 43).

Cette phase est un état transitoire dit « non saturé » de tout ou partie des composants du stockage qui se caractérise par une montée en pression en gaz dans le stockage et dont la durée est variable selon les ouvrages, du fait de la combinatoire entre d'un côté la production d'hydrogène et d'un autre coté sa migration sous forme dissoute dans la couche du Callovo-Oxfordien ou sous forme gazeuse par la voie ouvrage. L'influence du transitoire insaturé sur le modèle de relâchement des déchets HA vitrifiés est traitée au chapitre 2.7.1 du présent volume.

2.5.1 Le transfert des solutés en fonction de l'état de saturation des composants du stockage

Les études conduites (cf. Volume 7 du présent rapport) montrent que les processus phénoménologiques du transitoire hydraulique-gaz sont connus. Les incertitudes résiduelles de connaissance portent ainsi, non pas sur les grands mécanismes/processus dominant le transitoire hydraulique-gaz et la tendance générale des évolutions, mais sur la description détaillée dans le temps et l'espace du transitoire compte tenu notamment du nombre élevé de composants mis en jeu, des couplages locaux avec la mécanique et la chimique et les domaines de variabilité et d'incertitudes des valeurs de certains paramètres des modèles de représentation des processus (25).

Pour gérer les incertitudes résiduelles, notamment celles liées à la durée d'atteinte de la saturation totale des différents composants, y compris les ouvrages de fermeture, ceux-ci sont représentés dans un état initial « saturé » dès la fermeture du stockage dans les scénarios après fermeture. Cette approche est conservative vis-à-vis du transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques par la voie eau. En effet, elle ne tire pas parti d'un relâchement différé ou très faible des radionucléides et substances toxiques chimiques pendant la période de non saturation (le temps de resaturation totale du stockage est de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années (25)) et d'une limitation des flux d'eau et donc du transfert par convection et diffusion des radionucléides et substances toxiques chimiques dans les composants du stockage non saturés, notamment les alvéoles de stockage, et de la décroissance de certains radionucléides pendant cette période.

Les études menées depuis le Dossier d'options de sûreté confirment que cette approche est conservative. Elles montrent qu'à l'échelle du stockage, le flux maximal de solutés sortant des liaisons surface-fond est deux à trois fois plus faible (et décalé de 300 000 ans) par rapport à une situation considérant un état saturé dès l'instant initial. Cette faible différence est due à des temps de transfert dans les ouvrages de l'ordre du million d'années, supérieurs à la durée du transitoire hydraulique-gaz (25).

L'influence du transitoire hydraulique-gaz sur la migration des radionucléides sous forme gazeuse est précisée au chapitre 2.5.2 du présent volume.

LA MIGRATION DES SOLUTES SELON L'ÉTAT DE SATURATION DES COMPOSANTS DU SYTÈME DE STOCKAGE

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  À l'instar des hypothèses prises dans le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2), les scénarios (SEN, SEA, *What-if* et SIHI (hormis le cas d'un forage pendant le transitoire hydraulique gaz)) considèrent uniquement un transport par l'eau des radionucléides et substances toxiques chimiques reposant sur un état saturé du stockage et à l'équilibre hydraulique dès la fermeture définitive du stockage. Cet état saturé est conservatif vis-à-vis du transfert des solutés

par voie aqueuse et permet de s'affranchir des incertitudes résiduelles sur la durée d'atteinte de la saturation totale des différents composants (cf. Tableau 2-19).

Tableau 2-19 *Synthèse de l'analyse des risques et incertitudes vis-à-vis de la migration des solutés pendant le transitoire hydraulique gaz et des modalités de gestion associées*

Fonctions de sûreté : « Limiter le transfert jusqu'à la biosphère des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets » et « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
L'installation souterraine	**Incertitude sur la description détaillée dans le temps et l'espace du transitoire hydraulique-gaz**	/	En SEN : État initial saturé dès la fermeture du stockage

2.5.2 Le transfert des radionucléides sous forme gazeuse

Certains radionucléides peuvent se trouver sous forme gazeuse dans les conditions du stockage. Il s'agit notamment du carbone 14, sous différentes formes chimiques (CO_2, CH_4…). Concernant l'influence du transitoire hydraulique-gaz sur la migration de ces radionucléides sous forme gazeuse, les études conduites (cf. Volume 7 du présent rapport) montrent qu'au regard de la durée du transfert gazeux depuis les alvéoles (quelle que soit la zone de stockage) vers les liaisons surface-fond de l'ordre de quelques milliers d'années, seul le carbone 14 a une demi-vie suffisamment longue (5 700 ans) pour être susceptible d'arriver au toit du Callovo-Oxfordien notamment après transfert dans les ouvrages souterrains jusqu'aux liaisons surface-fond ou, dans une bien moindre mesure par le Callovo-Oxfordien.

L'inventaire en carbone 14 présent dans les colis de déchets est de l'ordre de quelques dizaines de milliers de moles, dont plus de 99 % proviennent des colis de déchets MA-VL.

Les études montrent que la migration du carbone 14 sous forme gazeuse dans le stockage est liée au transitoire hydraulique-gaz qui offre ainsi une voie de transfert gaz. Les simulations considèrent la migration du carbone 14 sous forme de CO_2, en tenant compte notamment de l'équilibre entre la fraction gazeuse et la fraction dissoute *via* la loi de Henry.

Elles montrent également que le transfert depuis les alvéoles de stockage dans les galeries s'effectue principalement par convection en phase gazeuse avec des temps d'arrivées vers la zone centrale de regroupement de la base des liaison surface-fond, plus particulièrement dans la zone de soutien logistique de l'ordre de quelques milliers à une dizaine de milliers d'années (soit du même ordre de grandeur que la période du carbone 14), ce qui limite l'effet de disparition du carbone 14 par décroissance radioactive. Du carbone 14 sous forme gazeuse est donc susceptible de migrer jusqu'aux liaisons surface-fond à partir des zones de stockage. Cependant, lors de son transfert au sein des galeries, les phénomènes de dissolution/diffusion dans le Callovo-Oxfordien (notamment l'effet de pompe diffusive du Callovo-Oxfordien) réduisent progressivement, depuis les alvéoles de stockage vers la zone centrale, la quantité de carbone 14 sous forme gazeuse qui y arrive. *In fine*, seule une très faible quantité de carbone 14 sous forme gazeuse atteint les liaisons surface-fond (de l'ordre de quelques pourcents de l'inventaire total) (25).

La quantité de carbone 14 sous forme gazeuse qui arrive ainsi dans l'Oxfordien *via* les liaisons surface-fond au cours des premiers milliers d'années après fermeture reste faible par rapport à la quantité stockée (de l'ordre de quelques pourcents de l'inventaire initial) et s'y dissout immédiatement. De plus, de manière générale, au regard des temps de transfert longs dans les formations encaissantes

supérieures et la période radioactive du carbone 14, une grande partie de celui-ci aura fortement décru avant d'atteindre les exutoires.

Au regard de ces acquis, l'impact radiologique sur l'homme du carbone 14 sous forme gazeuse issu du transfert gazeux jusqu'aux exutoires de l'Oxfordien calcaire est négligeable par rapport à celui estimé pour le scénario d'évolution normale qui considère un état saturé du stockage dès sa fermeture et la migration de l'ensemble de l'inventaire en carbone 14 en solution.

Outre les incertitudes résiduelles sur la temporalité du transitoire hydraulique-gaz telles que mentionnées au chapitre précédent, les incertitudes résiduelles sur la migration du carbone 14 pendant le transitoire hydraulique-gaz concernent (25) :

- l'inventaire en carbone 14 initial (incertitude de l'ordre d'un facteur 10) qui sera présent les ouvrages de stockage ;
- la forme chimique sous laquelle migrerait le carbone 14 (CO_2, CO, CH_4…, qui implique une incertitude de l'ordre d'un facteur 2 sur les temps d'arrivée) en lien avec les interactions physico-chimiques avec l'environnement lors du transfert.

En tenant compte de l'ensemble de ces incertitudes, les flux maximums de carbone 14 arrivant aux liaisons surface-fond peuvent augmenter d'un facteur 10 environ. Cependant, bien que ces incertitudes tendent à augmenter le flux de carbone 14 susceptible d'arriver sous forme gazeuse au toit du Callovo-Oxfordien *via* les ouvrages souterrains, elles ne sont pas de nature à modifier les conclusions quant à la dissolution du carbone 14 dans les formations encaissantes.

LA MIGRATION DES RADIONUCLÉIDES GAZEUX PENDANT LE TRANSITOIRE HYDRAULIQUE-GAZ

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  À l'instar des hypothèses prises dans « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2), les scénarios (SEN, SEA, *What-if* et SIHI (hormis le cas d'un forage pendant le transitoire hydraulique gaz)) considèrent uniquement un transport par l'eau des radionucléides et substances toxiques chimiques reposant sur un état saturé du stockage et à l'équilibre hydraulique dès la fermeture définitive du stockage.

  Le transfert du carbone 14 sous forme gazeuse n'est pas représentée dans les deux situations du SEN du fait qu'elles reposent sur l'hypothèse d'un état saturé dès la fermeture définitive du stockage. Des évaluations conduites en considérant le transfert du carbone 14 sous forme gazeuse indiquent qu'une faible quantité est susceptible d'arriver aux exutoires retenus.

Tableau 2-20 Synthèse de l'analyse des risques et incertitudes vis-à-vis la migration des radionucléides gazeux pendant le transitoire hydraulique gaz et des modalités de gestion associées

Fonctions de sûreté : « Limiter le transfert jusqu'à la biosphère des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets » et « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Les déchet	**Incertitude sur l'inventaire initial en carbone 14**	/	En SEN : État initial saturé dès la fermeture du stockage
L'installation souterraine	**Incertitude sur la forme chimique sous laquelle migrerait le carbone 14**	/	En SEN : État initial saturé dès la fermeture du stockage

2.5.3 L'influence de la pression de gaz sur la couche de Callovo-Oxfordien

L'évaluation de l'évolution de la pression de gaz au sein des ouvrages souterrains durant le transitoire hydraulique gaz, a fait l'objet d'études expérimentales, notamment *in situ*, de modélisations et de simulations numériques, en particulier dans le cadre de projets de recherche européens mobilisant de nombreuses équipes et permettant de s'assurer de la robustesse des connaissances et de l'identification des incertitudes résiduelles, en particulier au travers d'intercomparaison des travaux et des résultats (cf. Volume 7 du présent rapport, le « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (25) et la note conceptuelle sur « Le transitoire hydraulique-gaz et le devenir des radionucléides gazeux (après-fermeture) » (43)).

Ces études ont visé à déterminer les tendances sur l'évolution des principaux indicateurs pertinents dans les évaluations de performance du stockage (pression de gaz et d'eau maximale, flux de gaz et d'eau, temps de saturation…) en lien avec la fonction de préservation des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien. Ces études permettent de vérifier que la pression maximale de gaz atteinte dans le stockage n'entraine pas une fracturation traversante de la couche du Callovo-Oxfordien depuis le stockage jusqu'au toit et/ou mur.

Il est montré que (25) :

- la propagation jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien d'une fracture créée par le gaz n'est possible que si la pression de gaz dans le stockage est supérieure à la contrainte horizontale mineure (compte tenu de l'état de contrainte anisotrope *in situ* avec une contrainte horizontale majeure orientée suivant N155°E-N335°O).

  La connaissance acquise de l'état de contrainte de la couche du Callovo-Oxfordien, au niveau des ouvrages de la ZIOS, met en évidence que la contrainte horizontale mineure et la contrainte verticale sont très proches l'une de l'autre. À l'aplomb des vallées la contrainte verticale est la contrainte mineure et sa valeur correspond également à la valeur minimale de la contrainte verticale à l'échelle d'un quartier (traversé par une vallée). Ainsi, l'analyse du risque de fracturation au gaz en grand de la couche du Callovo-Oxfordien est basée sur la valeur minimale de la contrainte verticale à l'échelle de la ZIOS ;
- la contrainte verticale minimale est estimée à :
  - ✓ 11,3 ± 0,3 MPa au niveau du quartier de stockage HA au droit de la vallée de l'Orge ;
  - ✓ 11,5 ± 0,3 MPa au niveau du quartier de stockage MA-VL (où la pression de gaz est maximale dans les simulations) au droit de la vallée de l'Ormançon ;
- une propagation des fractures de la zone endommagée en champ proche des ouvrages à des valeurs de pression en gaz plus faibles est possible en raison notamment de la modification du champ de contrainte local par le creusement. Cependant cette propagation finirait par rencontrer, au-delà du champ proche des ouvrages, le champ de contraintes naturelles et elle ne pourrait plus alors se propager au-delà dans la couche du Callovo-Oxfordien. Les caractéristiques considérées en situation enveloppe du SEN pour représenter l'endommagement mécanique permettent de couvrir cet effet.

Les dispositions de conception prévoient (cf. Volume 5 du présent rapport) :

- une limitation du terme source en gaz à travers la limitation de l'utilisation d'acier dans les ouvrages souterrains. En effet, l'utilisation d'acier est limitée autant que possible au juste besoin dans la constitution des composants laissés en place après-fermeture (cf. Volume 5) ;
- des solutions techniques des ouvrages de fermeture (scellements et remblais) qui laissent « passer » les gaz. La faisabilité de tels ouvrages permettant l'atteinte des deux fonctions « *s'opposer à la circulation de l'eau* » (scellements uniquement) et « *préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien* » est considérée comme acquise par le choix de base des matériaux, en particulier les argiles gonflantes pour les noyaux des scellements, matériaux naturels aux propriétés remarquables, et la capacité à adapter les propriétés hydrauliques, hydraulique-gaz et hydromécaniques de ces matériaux constitutifs des ouvrages de fermeture pour répondre aux fonctions. Ces solutions techniques permettent *de facto* à long terme de limiter la pression de gaz

maximale dans l'installation souterraine et *de facto* de limiter fortement les gradients de pression de gaz au sein de l'installation, donc les vitesses d'écoulement du gaz au sein de l'installation (41).

Les études menées qui considèrent des ouvrages « passant aux gaz » (caractérisés par une pression d'entrée de gaz « faible ») et des valeurs de paramètres définies au meilleur de la connaissance, indiquent une pression maximale de gaz dans le stockage bien inférieure à celle pouvant conduire à une propagation de fracture dans le Callovo-Oxfordien jusqu'au toit (25).

Des études de sensibilité multiparamétriques ont été réalisées de manière à étudier l'influence d'incertitudes résiduelles sur la pression maximale en gaz dans le stockage (43), notamment (25) :

- le terme source en gaz en lien avec les connaissances phénoménologiques (vitesses de corrosion, rendement radiolytique…), la conception (densité de ferraillage, épaisseur des pièces…) et les caractéristiques des colis de déchets (épaisseurs et surface des pièces métalliques, masse des composés organiques…) ;
- la perméabilité aux gaz du Callovo-Oxfordien endommagé en champ proche des ouvrages souterrains ;
- la variabilité des caractéristiques de composants du système de stockage, en particulier les caractéristiques de transfert du gaz du noyau à base d'argile gonflante dans une gamme suffisamment large pour couvrir un jeu de possible.

Il ressort des études de sensibilité, qu'en considérant tous les paramètres à des valeurs extrêmes, jugées très peu vraisemblables, plus particulièrement leur combinatoire, la pression maximale de gaz reste inférieure à la contrainte verticale de la couche du Callovo-Oxfordien minimale sur la ZIOS à la profondeur du stockage, ce qui permet d'écarter l'occurrence d'une propagation d'une fracturation au gaz sur toute la couche du Callovo-Oxfordien.

Concernant l'incertitude résiduelle sur la perméabilité aux gaz de la zone endommagée du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains, il est acquis que du fait des dispositions de conception précitées, celle-ci a un poids faible sur la valeur de pression maximale de gaz. En effet la conception d'ouvrages de fermeture « passants aux gaz », privilégie un passage du gaz principalement par le système de fermeture plutôt que par la zone endommagée de Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains.

INFLUENCE DE LA PRESSION DE GAZ SUR LA COUCHE DE CALLOVO-OXFORDIEN

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Les dispositions de conception visent à limiter autant que possible l'utilisation d'acier dans la constitution des composants laissés en place après-fermeture afin de limiter le terme source en gaz.

  Les dispositions de conception et de fabrication d'ouvrages de fermeture « passant au gaz » permettent de limiter les pressions de gaz dans le stockage durant le transitoire hydraulique gaz et ainsi de préserver les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien en évitant le risque de fracturation (41). Pour les scellements, la notion de « passant au gaz » s'entend par rapport à des matériaux argileux gonflants de densité élevée et souvent pur (non en mélange avec un autre matériau par exemple un sable) donc développant des pressions de gonflante de plusieurs MPa et des pressions d'entrée du gaz élevées. Cette notion ne doit pas être assimilée à celle d'un matériaux type sable : par rapport à un sable, les matériaux argileux gonflants envisagés pour les noyaux sont peu « passants au gaz », mais suffisamment « passants » pour limiter des pressions de gaz élevées.

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Les études menées prenant en compte les incertitudes résiduelles permettent d'exclure que la pression maximale de gaz durant le transitoire hydraulique-gaz puisse conduire à une propagation d'une fracture à travers toute la couche de Callovo-Oxfordien (pression dans le stockage, en tout état de cause, inférieure à la contrainte verticale).

  Ces acquis conduisent à représenter la couche du Callovo-Oxfordien exempt d'une fracturation imputable à la pression de gaz maximale durant le transitoire hydraulique gaz en scénario d'évolution normale.

Tableau 2-21 Synthèse des risques et incertitudes du transitoire hydraulique-gaz affectant la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien saine	**Incertitude sur le terme source en gaz**	Disposition de conception (*e.g.* Limitation de la quantité d'acier, ouvrages de fermeture « passants aux gaz » …)	Prise en compte des incertitudes dans les études multiparamétriques de la pression en gaz
La couche du Callovo-Oxfordien saine	**Incertitude sur la perméabilité au gaz du Callovo-Oxfordien endommagé en champ proche des ouvrages souterrains**	Disposition de conception (*e.g.* Limitation de la quantité d'acier, ouvrages de fermeture « passants aux gaz » …)	Prise en compte des incertitudes dans les études multiparamétriques de la pression en gaz

2.5.4 L'influence du transitoire hydraulique-gaz sur les scellements

Compte tenu des propriétés capillaires du noyau à base d'argile gonflante (succion élevée), l'évolution hydraulique des scellements est peu affectée par la production de gaz dans le stockage. Elle est due à l'eau issue de la couche du Callovo-Oxfordien et elle est pilotée par la faible perméabilité de cette dernière (cas des scellements des galeries) ou à l'eau issue des horizons poreux de l'Oxfordien (cas de la partie supérieure des scellements de liaison surface-fond où la resaturation est plus rapide que pour les scellements des galeries du fait d'une perméabilité des horizons poreux supérieure à celle du Callovo-Oxfordien). Elle est qualitativement similaire pour tous les scellements (25).

Les acquis de connaissance permettent une formulation du noyau de scellement pouvant atteindre le double objectif, d'une part celui de laisser « passer les gaz », et d'autre part celui de « s'opposer à la circulation de l'eau » lorsque ces composants seront resaturés (41). Ainsi les scellements pourront jouer leur rôle en regard des fonctions de sûreté à long terme, à savoir privilégier le transfert (lent) des radionucléides et substances toxiques chimiques par la couche du Callovo-Oxfordien (voie principale) et limiter corrélativement le transfert de ces éléments par les ouvrages souterrains.

Les incertitudes résiduelles concernent la modélisation et la simulation numérique détaillée du transitoire de saturation compte tenu notamment de la taille des scellements et des structures porales pouvant être complexes (*e.g.* Cas des mélanges de pellets présentant une double porosité) (25).

Au regard des connaissances acquises à ce jour sur les processus de resaturation des noyaux argileux et des modalités de conception des scellements envisagées, un noyau argileux qui n'atteindrait pas la performance voulue suite à une évolution hydromécanique non anticipée en lien avec le transitoire hydraulique-gaz est jugé comme très peu vraisemblable. Une telle situation est postulée sous la forme d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements (cf. Encadré ci-après).

Pour les scellements des liaisons surface-fond en contact direct avec les eaux des horizons poreux de l'Oxfordien par leur partie supérieure, les différentiels de pression sont pris en compte dans le dimensionnement du dispositif de confinement mécanique en contact avec l'Oxfordien mais n'impliquent pas de modification du fonctionnement nominal de ces scellements (41).

Pour les scellements des galeries, les termes sources de génération de gaz étant répartis dans l'ensemble des excavations, la montée en pression est relativement homogène dans tous les quartiers du stockage. Il n'y a donc pas de différentiel de pression important entre les deux faces d'un scellement, (41) hormis dans le cas d'un forage pendant le transitoire hydraulique-gaz (scénario d'intrusion humaine involontaire ; (cf. Chapitre 2.12 du présent volume). Toutefois, le choix des argiles gonflantes comme matériau de base des noyaux des scellements, matériau très tolérant vis à vis de sollicitations hydraulique, gaz ou mécanique, ainsi que les grandes dimensions des scellements, notamment sa longueur pluri-décamétrique, limitent les conséquences sur les performances hydromécanique et hydraulique après la sollicitation.

Sur la base de l'ensemble des données mentionnées ci-avant, un dysfonctionnement des différents scellements du fait d'une rupture ou d'une déformation très importante des noyaux liés aux gaz est considéré comme très peu vraisemblable. Un tel évènement est postulé sous la forme d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements (cf. Encadré ci-après).

LE TRANSITOIRE DE RESATURATION ET L'IMPACT DE LA PRODUCTION DE GAZ SUR LE NOYAU ARGILEUX DES SCELLEMENTS

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que les scellements remplissent leurs exigences, un contrôle qualité de la fabrication des matériaux et de la réalisation des scellements sera mis en place (41, 42).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Le niveau de connaissance actuel sur le comportement hydromécanique et aux gaz à l'état saturé et partiellement saturé en eau des matériaux poreux, notamment à base d'argilites remaniées et d'argile gonflante, conduit à ne pas identifier de risques ou incertitudes résiduelles de connaissance susceptibles de dégrader les caractéristiques exigées du noyau argileux des scellements (conductivité hydraulique, perméabilité aux gaz, pression d'entrée de gaz). Le transitoire hydraulique gaz n'a pas d'effet sur la représentation des scellements dans le scénario d'évolution normale.

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Un noyau argileux ne respectant pas ses exigences suite à une évolution hydromécanique-gaz non anticipée est jugé comme très peu vraisemblable. Ce risque est postulé dans un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et l'interface qui postule une absence de gonflement du noyau argileux.

Tableau 2-22 Synthèse de l'analyse des risques et incertitudes du transitoire hydraulique-gaz sur le noyau des scellements et son dispositif de confinement mécanique et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « S'opposer à la circulation de l'eau »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Le dispositif de confinement mécanique des scellements des LSF et des galeries	**Incertitude sur les effets de différentiels de pression en gaz sur la stabilité mécanique des scellements**	Stabilité mécanique des scellements et scellements passant aux gaz : les scellements respectent leurs exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux.
Le noyau argileux des scellements des LSF et des galeries	**Incertitude sur l'évaluation du transitoire de saturation compte tenu des grandes tailles des scellements et des structures porales pouvant être complexes (ex. cas des mélanges de pellets présentant une double porosité)**	/	• En SEN : stockage entièrement saturé ; • Scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux.

2.6 Les ouvrages remblayés (galeries et descenderies)

Au moment de la fermeture du centre de stockage Cigéo, toutes les galeries souterraines et les liaisons surface-fond (puits et descenderies) du centre de stockage Cigéo sont remblayées et scellées.

Les galeries et descenderies remblayées comprennent les composants suivants (41) :

- le remblai constitué d'argilites excavées, entreposées en verses en attente de leur réutilisation, puis reconditionnées par broyage et criblage ;
- les composants assurant le soutènement (voussoir, matériau de bourrage, matériau compressible périphérique aux voussoirs) ;
- le radier (les vides du radier sont comblés par un béton maigre) est assimilé au voussoir adjacent en béton.

L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des linéaires remblayés (zone fracturée connectée (ZFC) et zone à fracturation discrète (ZFD) est décrite dans le chapitre 2.2.2.1 du présent volume. Le remplissage en béton de la recette de fond des puits et qui fait office de massif d'appui inférieur est pris en compte dans le cadre de l'analyse des scellements de puits (cf. Chapitre 2.4 du présent volume).

En remplissant l'espace des galeries et descenderie et de par leurs caractéristiques mécaniques, les remblais contribuent à préserver les propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien en limitant la déformation du Callovo-Oxfordien après la rupture des revêtements/soutènements, limitant ainsi un sur-endommagement du Callovo-Oxfordien autour des galeries et des liaisons surface-fond.

Par ailleurs, une fois remblayées, de par leur longueur et leur surface d'échange avec la couche du Callovo-Oxfordien, les galeries favorisent un transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques vers la couche du Callovo-Oxfordien par effet de pompe (*i.e.* Rétrodiffusion) le long des galeries. Les ouvrages remblayés (galeries et liaisons surface-fond) sont néanmoins considérés comme une voie de transfert potentielle des radionucléides vers le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien et à ce titre sont intégrés dans l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2.1.2 du présent volume).

LES OUVRAGES REMBLAYÉS

Les remblais n'étant pas spécifiés à ce stade, la performance des remblais dans la réalisation de leur fonction, à savoir « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture », s'apprécie par l'analyse de la connaissance sur le comportement des matériaux à base d'argilites remaniées et l'analyse des risques et incertitudes sur les propriétés mécaniques du remblai (compressibilité, densité des argilites remaniées) et le remplissage (limitation des vides résiduels) tout en restant sur des critères qualitatifs.

2.6.1 Le remblai

2.6.1.1 Les caractéristiques intrinsèques

Les remblais contribuent à la fonction « *Préserver les caractéristiques favorables des argilites du* Callovo-Oxfordien *et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture* » en limitant les vides en partie haute des ouvrages, et ainsi le risque d'extension de l'endommagement *via* le foisonnement. Pour limiter les déformations mécaniques de la couche du Callovo-Oxfordien, on vise à obtenir une compressibilité aussi faible et une densité sèche aussi élevée que possibles et nécessaires. Le remblai sera mis en place de manière à remplir intégralement le volume, notamment en minimisant le vide en partie haute.

L'Andra dispose d'une base de connaissance importante sur les argilites remaniées et les mélanges prenant en compte notamment la durée et les conditions d'entreposage de l'argilite, la granulométrie d'argilites concassée, le mode de mise en place et l'influence des additifs (bentonite, sable, chaux). À plus grande échelle, le démonstrateur technologique de remblayage de Richwiller montre la possibilité de réaliser un remblai à base d'argilites excavées, relativement homogène et avec une densité relativement élevée et en minimisant l'ampleur du vide apical sous l'effet de la saturation (25, 41).

Des contrôles du bon remplissage des galeries et descenderies par ces remblais au fur et à mesure de l'avancement du remblayage seront mis en œuvre. À ce titre, la possibilité d'un vide apical n'est pas retenu dans le scénario d'évolution normale et le remblai est représenté comme un milieu poreux homogène sur toute la hauteur de la galerie (41).

Les mécanismes pilotant le comportement hydraulique-gaz et hydromécanique des matériaux à base de bentonite ou d'argilites de la couche du Callovo-Oxfordien remaniées, en conditions saturées et non saturées, sont bien appréhendés, ainsi que les domaines de variation des paramètres associés. Le remblai est relativement perméable au gaz et tend à connecter les zones de production de gaz entre elles ce qui favorise l'homogénéisation de la pression de gaz au sein du stockage (25, 43). Les incertitudes résiduelles sur ces comportements et leurs paramètres sont limités et concernent principalement la modélisation du transitoire de resaturation. Les modèles actuels reproduisent bien les tendances générales et cette incertitude n'est pas de nature à remettre en cause les propriétés mécaniques exigées ou le caractère passant des remblais aux gaz tel que considéré dans le scénario d'évolution normale (25).

2.6.1.2 La perturbation alcaline issue des composants en béton

L'Andra dispose d'un bon niveau de connaissance sur l'influence de la perturbation alcaline induite par un milieu cimentaire sur les matériaux à base d'argilites remaniées notamment à travers des études de caractérisation de la porosité, du comportement hydromécanique, du potentiel de gonflement et du couplage chimio-mécanique des argilites remaniées et compactées suite à une resaturation par de l'eau cimentaire puis le contact avec des matériaux cimentaires (25).

Les argilites remaniées utilisées pour le remblai sont mises en place à l'optimum Proctor normal ou modifié (41). L'hydratation par une eau cimentaire aura tendance à renforcer certaines caractéristiques mécaniques des remblais, les rendant moins déformables sous charge, avec la formation de nouveaux minéraux comme des carbonates. Les acquis de connaissance montrent que lors de la rupture des revêtements après quelques milliers d'années, les remblais sont mis en charge et de par leurs caractéristiques de déformabilité associées à des (très) faible vitesses de déformation différées du Callovo-Oxfordien sur le long terme, limitent les déformations de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche, bien que leur hydratation aura été faite par une eau cimentaire puis leur contact avec des matériaux cimentaires (25, 41).

LES REMBLAIS

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Compte tenu du retour d'expérience acquis, le remblai est représenté en SEN comme un milieu poreux équivalent avec des propriétés homogènes sans vide apical.

  La conductivité hydraulique du remblai est définie sur la base des connaissances acquises sur les matériaux à base d'argilites remaniées de manière conservative (situation enveloppe) ou au meilleur de la connaissance (situation de référence).

  Aucune propriété de transport et de rétention chimique n'est attribuée au remblai dans toutes les situations du SEN, ces caractéristiques n'étant pas sollicitées en regard de sa fonction de préservation des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien.

  La zone reminéralisée (par la perturbation alcaline) du remblai est assimilée dans toutes les situations du SEN au composant en béton dont est issue la perturbation (caractéristiques hydrauliques assimilées à celles d'un sable sans propriétés de transport ni de rétention chimique).

2.6.2 Le revêtement/soutènement et le radier laissé en place

Les revêtements/soutènements et le radier laissés en place dans les galeries et descenderies n'assurent pas de fonction de sûreté en après-fermeture mais ils peuvent constituer une voie potentielle de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques (par la voie ouvrage).

Les options de conception des galeries et descenderies considèrent plusieurs options techniques de revêtements/soutènements des ouvrages souterrains dont le revêtement en béton coulé ou des voussoirs compressibles (voussoirs préfabriqués en usine avec à l'extrados du béton un matériau compressible pour absorber la convergence court terme du Callovo-Oxfordien et injection d'un matériau de bourrage) et limiter la charge mécanique du Callovo-Oxfordien sur le béton (41).

Seule l'option technique considérant des voussoirs compressibles en béton avec matériau compressible périphérique est considérée pour l'établissement des scénarios de sûreté, car elle est susceptible d'être une voie de transfert plus importante du fait de la présence du matériau compressible à l'extrados qui par conception présente une porosité élevée et qui peut être rempli par le matériau de bourrage.

Lors de la fermeture du stockage, le radier en béton est laissé en place et les réservations dans le radier sont injectées par un coulis cimentaire de manière à limiter les vides.

L'évolution du béton en conditions de stockage a fait l'objet de nombreuses études. Sur le long terme, le béton constituant le « voussoir » se dégrade chimiquement au contact des eaux du Callovo-Oxfordien. Du point de vue de la dégradation chimique, aucune incertitude résiduelle majeure n'est identifiée, les seules incertitudes résiduelles portent sur les définitions détaillées des cortèges minéralogiques secondaires et de ce fait, elles ne remettent pas en cause les processus majeurs de la dégradation chimique des matériaux cimentaires par l'eau du Callovo-Oxfordien (25). Ces incertitudes sont couvertes par les choix conservatifs de représentation des matériaux cimentaires en scénario d'évolution normale (SEN).

LES PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES DES ÉLÉMENTS EN BÉTON (VOUSSOIRS ET RADIER)

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Du fait de l'évolution mécanique des bétons sur le long terme conduisant à leur fissuration et leur fracturation, il est fait le choix dans la situation de référence et la situation enveloppe du SEN de retenir pour représenter les revêtements/soutènements et le radier laissé en place :
  - ✓ une conductivité hydraulique à l'eau et des propriétés hydro-dispersives pénalisantes, prises équivalentes à celle d'un sable (le béton est représenté comme un milieu poreux continu équivalent) ;
  - ✓ il n'est pas valorisé de rétention chimique par sorption ou par précipitation dans ces composants.

Les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement en champ proche des ouvrages souterrains sont décrites au chapitre 2.2.2.1 du présent volume. L'analyse des risques et incertitudes liés à la perturbation alcaline dans la couche du Callovo-Oxfordien au droit des ouvrages remblayés est présentée au chapitre 2.2.2.4 du présent volume. Au droit des matériaux cimentaires laissés en place dans les ouvrages (hors scellements), elle est représentée en SEN selon les mêmes modalités définies au chapitre 2.2.2.4 du présent volume.

En cohérence avec les exigences au niveau des scellements, des dispositions favorisant l'auto-colmatage des fractures connectées sur de longues durées seront prises vis-à-vis de la mise en place d'un matériau de bourrage à l'extrados des voussoirs (cf. Chapitre 2.4 du présent volume ; faible pression d'injection, matériau compatible avec les argilites) (34).

Du fait de ses caractéristiques hydromécaniques sur le long terme, les incertitudes résiduelles concernent les propriétés de transfert dans le matériau compressible périphérique et en conséquence leur influence sur le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques le long des ouvrages de fermeture (41). Cette incertitude résiduelle est intégrée dans le choix des propriétés hydrauliques et de transport de ce composant dans le scénario d'évolution normale.

LE MATÉRIAU COMPRESSIBLE PÉRIPHÉRIQUE ET LE MATÉRIAU DE BOURRAGE A L'EXTRADOS DES VOUSSOIRS

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Dans le cadre de l'injection d'un matériau de bourrage à l'extrados des voussoirs, des dispositions favorisant l'auto-colmatage des fractures connectées sur de longues durées seront prises (faible pression d'injection, matériau compatible avec les argilites) (34) ;

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Afin de couvrir les incertitudes résiduelles relatives au transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques dans le matériau compressible périphérique aux voussoirs, les choix suivants sont effectués dans toutes les situations du SEN :

  - ✓ celui-ci est représenté de manière explicite selon son épaisseur correspondant à celle de sa mise en place avant compression ;
  - ✓ une conductivité hydraulique à l'eau et une porosité pénalisante définie par modélisation afin de maximiser leur influence sur les transferts de radionucléides et substances toxiques chimiques susceptibles de circuler par la voie ouvrage sont retenues ;
  - ✓ des propriétés de transport diffusif pénalisantes (valeur maximale du coefficient de diffusion dans la gamme des possibles) sont retenues ;
  - ✓ il n'est retenu aucune rétention chimique par sorption ou par précipitation.

  Au regard du faible taux d'injectabilité du matériau de bourrage et des dispositions prises lors de sa mise en place, l'influence du matériau de bourrage sur la zone endommagée est considérée comme couverte par les propriétés pénalisantes attribuées à la zone reminéralisée par la perturbation alcaline au droit des voussoirs et donc assimilée à celle-ci en SEN.

Tableau 2-23 Synthèse des risques et incertitudes des composants assurant le soutènement des ouvrages remblayés et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitude résiduelle**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Béton (voussoir, radier)	**Incertitude sur le processus de dégradation chimique**	/	En SEN : Propriétés hydro-dispersive pénalisantes. Pas de rétention chimique par sorption ou par précipitation
Revêtement/soutènement	**Influence de la présence du matériau compressible sur les transferts le long des ouvrages de fermeture (drain hydraulique)**	/	En SEN : Propriétés hydro-dispersive pénalisantes. Pas de rétention chimique par sorption ou par précipitation
Revêtement/Soutènement	**Influence de la présence du matériau de bourrage injecté à l'extrados des voussoirs sur les propriétés des argilites**	Nature et mise en place du matériau de bourrage : conforme aux exigences	En SEN : Assimilée à la zone reminéralisée des argilites par la perturbation alcaline

2.7 Les alvéoles de stockage HA

L'architecture illustrative de l'installation souterraine comprend (cf. Chapitre 5 du présent volume) :

- un quartier pilote HA où sont stockés des colis de déchets HA0 ;
- un quartier de stockage HA où sont stockés des déchets HA1/HA2 et certains colis HA0 et MA-VL6.

L'alvéole HA comprend une partie utile où sont stockés les colis de déchets HA qui intègre :

- les vides résiduels entre les colis à l'intrados du chemisage et considérés comme remplis d'eau pour les évaluations en après-fermeture ;
- le chemisage en acier ;
- le matériau de remplissage de l'espace annulaire injecté à l'extrados du chemisage ;
- le bouchon de fermeture de l'alvéole connecté à une galerie remblayée à la fermeture du stockage.

L'analyse des risques et incertitudes concerne :

- les colis HA stockés (sont intégrés l'ensemble de l'inventaire de référence des déchets HA, les modèles de relâchement après rupture du conteneur de stockage et la cinétique de corrosion du conteneur de stockage) ;
- les composants de la partie utile de l'alvéole HA (le matériau de remplissage de l'espace annulaire, les vides résiduels, le chemisage) où sont stockés les déchets qui contribuent aux fonctions de sûreté et/ou qui constituent une voie de transfert potentielle des radionucléides ;
- le dispositif de fermeture définitif de l'alvéole HA (tête d'alvéole).

Les colis HA stockés sont constitués d'un ou deux colis primaire(s) et d'un conteneur de stockage. Les colis HA stockés participent à la fonction de sûreté après-fermeture suivante : « *Limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage* ».

Cette fonction est déclinée de la manière suivante :

- *« Protéger les déchets de l'eau »,* cette fonction est assurée par le conteneur de stockage tant qu'il est étanche et la matrice vitreuse après rupture du conteneur ;
- *« Limiter la mise en solution des radionucléides et des substances toxiques chimiques »*, cette fonction est assurée par la matrice vitrifiée des déchets HA dont la performance repose sur le modèle de relâchement après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage.

Le conteneur primaire (composant entre la matrice vitreuse et le conteneur de stockage) ne participe à aucune fonction en après-fermeture.

L'alvéole HA dans son ensemble est conçue de manière à favoriser la durabilité du conteneur de stockage ce qui permet *in fine* de garantir un milieu physico-chimique favorable à limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et une température compatible avec la connaissance du comportement de ces éléments en température après arrivée de l'eau sur les déchets.

2.7.1 Les colis HA stockés

2.7.1.1 Les inventaires en radionucléides et substances toxiques chimiques des déchets HA

Comme indiqué au volume 3 du présent rapport, la connaissance des inventaires en radionucléides et substances toxiques chimiques des déchets HA comprend des incertitudes qui peuvent être plus ou moins importantes selon les familles de colis concernées.

La gestion de ces incertitudes repose sur la mise en œuvre d'une méthodologie qui permet de construire un inventaire radiologique qualifié de « margé » pour les évaluations de sûreté après fermeture. Cette méthodologie décrite au volume 3 du présent rapport), repose sur la connaissance des activités massiques des colis à l'échelle de la famille. La prise en compte des incertitudes résiduelles s'apprécie par l'analyse des niveaux de connaissances des colis et qui conduit à appliquer un facteur de marge selon ce niveau.

L'inventaire radiologique retenu pour les évaluations de sûreté après fermeture est sur cette base un inventaire margé qui prend en compte les incertitudes résiduelles associées à la connaissance des colis.

L'inventaire en substances toxiques chimiques pour la phase après-fermeture est construit sur la base d'une liste de 13 toxiques chimiques (cf. Volume 3 du présent rapport) : uranium, plomb, mercure, antimoine, cadmium, sélénium, arsenic, nickel, chrome, bore, béryllium, CN^- et amiante.

L'établissement de l'inventaire en substances toxiques chimiques de l'ensemble des colis de déchets du centre de stockage Cigéo suit une méthodologie comparable à celle utilisée pour l'inventaire radiologique. Cependant, contrairement à l'inventaire radiologique l'inventaire en substances toxiques chimiques n'est pas margé (cf. Volume 3 du présent rapport).

L'INVENTAIRES EN RADIONUCLÉIDES ET SUBSTANCES TOXIQUES CHIMIQUES DES DÉCHETS HA

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Pour tenir compte des incertitudes résiduelles de connaissance des inventaires des colis de déchets HA, l'inventaire radiologique retenu pour les évaluations de sûreté après fermeture est un inventaire qualifié de « margé » établi selon la méthodologie décrite au volume 3 du présent rapport.

2.7.1.2 Les modèles de relâchement des déchets HA et MA-VL vitrifiés

La matrice vitreuse de par ses caractéristiques contribue, après la rupture du conteneur, aux fonctions « *Protéger les déchets de l'eau* » et « *Limiter le relâchement des éléments radioactifs, et les immobiliser dans les alvéoles de stockage* », en limitant la mise en solution des radionucléides et substances toxiques chimiques.

Le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques des déchets HA est initié après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage. C'est par un « modèle de relâchement » qu'est évaluée la quantité de radionucléides et de substances toxiques chimiques relâchée par unité de temps. La fraction de verre altérée dépend à la fois du modèle retenu et des paramètres de ce modèle (25, 44). La performance de la matrice vitreuse vis-à-vis des fonctions de sûreté est ainsi traduite par un ou plusieurs modèles de relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques de cette matrice et des paramètres associés.

Pour les déchets HA vitrifiés, deux modèles de relâchement sont définis en conditions saturées : (i) un régime d'altération fondé sur la vitesse initiale (modèle V_0.S, S désignant la surface réactive associée au régime de vitesse initiale[41]e) et (ii) un régime d'altération fondé sur l'atteinte d'une vitesse résiduelle V_R (25, 44).

En cohérence avec la démarche exposée au chapitre 1 du présent volume, l'analyse est fondée :

i. D'une part sur le niveau de connaissance des modèles de relâchement c'est à dire leur applicabilité aux différentes familles de déchet ;
ii. D'autre part sur les paramètres du modèle qui peuvent être soit dépendants des caractéristiques intrinsèques du verre, soit sensibles aux conditions d'environnement dans les alvéoles lors de l'arrivée d'eau liquide sur le verre nucléaire après perte d'étanchéité des conteneurs de stockage.

Les régimes d'altération fondés sur la vitesse initiale et sur l'atteinte d'une vitesse résiduelle V_R ont fait l'objet de nombreuses études, basées à la fois sur des expérimentations en laboratoire de surface et au Laboratoire souterrain (25). Ces études intègrent notamment l'influence du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage et l'influence de la composition chimique des eaux du Callovo-Oxfordien. Le cortège de connaissances acquis a permis de préciser l'applicabilité de ces modèles aux différentes familles de déchets HA et MA-VL vitrifiés et de fournir des gammes de valeur des différents paramètres représentatifs des caractéristiques intrinsèques du verre et des conditions d'environnement (25, 44).

En préambule, il est à noter que les vitesses d'altération de la matrice sont sensibles à la température. L'influence du transitoire thermique sur le relâchement de la matrice vitrifiée est gérée par une disposition de conception qui conduit à l'adoption d'un conteneur de stockage étanche pendant ce transitoire thermique à cœur du verre. À ce titre, le conteneur de stockage doit être étanche tant que la température à cœur du verre est supérieure à 50 °C pour les déchets vitrifiés stockés dans le quartier pilote HA et 70 °C pour les déchets vitrifiés stockés dans le quartier de stockage HA. La valeur plus élevée retenue pour les déchets vitrifiés stockés dans le quartier de stockage HA s'explique par les progrès des connaissances sur le comportement du verre nucléaire et celui des radionucléides en solution.

Les principales incertitudes résiduelles et leur gestion par le choix des modèles de relâchement sont (25, 44) :

- la contribution des fissures en conditions insaturées sur l'altération du verre ainsi que l'effet de l'auto-irradiation sur les vitesses d'hydratation qui restent à préciser.

  La vitesse d'altération initiale en condition saturée est considérée comme majorante par rapport à un régime d'altération en conditions insaturées (45, 46). Il est donc considéré que la vitesse initiale en conditions saturées couvre ces incertitudes ;
- les valeurs de vitesse initiale et de vitesse résiduelle en lien avec la dépendance de la réactivité du verre avec les matériaux d'environnement et au couplage chimie-transport dans l'alvéole :
  - ✓ concernant la vitesse initiale, pour couvrir ces incertitudes, le choix des paramètres a porté sur les valeurs conservatives des gammes de valeurs disponibles conformément à la démarche ;

[41] S = Surface externe du verre x t0 (taux de fracturation associé au régime de vitesse initiale V_0)

- ✓ concernant la vitesse résiduelle, les incertitudes résiduelles portent sur quelques valeurs de paramètres notamment sur les valeurs de k_R, en lien avec les conditions expérimentales par rapport aux conditions en stockage ;

Pour couvrir l'ensemble des incertitudes résiduelles inhérentes au modèle fondé sur l'atteinte d'une vitesse résiduelle V_R, il est fait de choix en situation enveloppe de ne considérer que le modèle fondé sur la vitesse initiale qui s'affranchit de certains paramètres et conduit à des relâchements de radionucléides et substances toxiques chimiques plus importants ;

- l'effet de l'auto-irradiation sur la vitesse résiduelle du verre en stockage qui n'est pas clairement établi. Les connaissances disponibles indiquent que :
  - ✓ les essais de lixiviation d'un verre industriel « jeune » (possédant un débit de dose $\beta\gamma$ représentatif d'un verre R7/T7 à la production) montrent une vitesse résiduelle augmentée d'un facteur 10 par rapport à celle d'un verre inactif. Les mécanismes mis en jeu sont en cours d'identification, mais l'hypothèse actuellement envisagée est une synergie entre d'une part un fort débit de dose $\beta\gamma$ et d'autre part, la lixiviation sous eau du verre. Si tel est le cas, ce phénomène ne se produirait pas en stockage pour un verre de plusieurs dizaines d'années d'âge, du fait de la forte diminution de l'activité ;
  - ✓ les résultats acquis sur les verres dopés n'ont révélé qu'un impact du cumul de dose alpha sur le temps d'atteinte de la vitesse résiduelle d'altération, mais pas la valeur de cette dernière ;

  Du fait de ces incertitudes résiduelles, il est fait le choix de le considérer en retenant pour la situation de référence un modèle alternatif « avec effet de l'auto-irradiation » ;

- l'influence d'un milieu cimentaire sur la dissolution des verres après perte d'étanchéité du conteneur de stockage.

  Les études conduites sur l'évolution géochimique de l'alvéole HA sur le long terme prennent en compte l'ensemble des processus qui s'y produisent y compris l'influence d'un milieu cimentaire. Les acquis montrent que les incertitudes résiduelles sur l'influence du MREA, en milieu saturé, n'est pas de nature à remettre en cause le choix des modèles de relâchement du scénario d'évolution normale (25, 44) ;

- les effets induits par une perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA.

  Pour couvrir les incertitudes résiduelles sur les effets qui peuvent être induits par une perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA sur la dissolution du verre, il est retenu en scénarios d'évolution altérée et *What-if* de dysfonctionnement des conteneurs de stockage, un modèle conduisant à un relâchement labile (cf. Chapitre 2.7.2.1 du présent volume).

Il persiste également des incertitudes sur :

- l'influence de matières organiques ou de substances complexantes sur les modèles de relâchement des déchets. Une éventuelle influence, bien que très peu vraisemblable du fait de la limitation des quantités de matières organiques dans les alvéoles HA, est couverte par le choix d'un modèle de relâchement labile dans les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des conteneurs de stockage (cf. Chapitre 2.7 du présent volume) ;
- le risque de dépassement ponctuel du critère thermique de 500 °C dans le verre R7T7 lors du détensionnement thermique de la soudure du couvercle des conteneurs de stockage HA. Des calculs ont été réalisés pour évaluer les conséquences de ce risque sur le verre. Ils ont montré que, dans le cas le plus pénalisant, le point le plus chaud du verre atteint (face supérieure périphérique du verre), à son pic thermique, une température de l'ordre de 600°C pendant une durée inférieure à 4 heures (25). Plusieurs pistes sont envisagées pour traiter ce problème résiduel, le risque associé sur le modèle de relâchement des verres est donc jugé comme très limité. Ce risque est couvert par le choix du modèle V_0.S en situation enveloppe du SEN.

LE MODÈLE DE RELACHEMENT DES DÉCHETS HA ET MA-VL VITRIFIÉS

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de couvrir les incertitudes sur l'influence d'un milieu cimentaire ou de la présence de matières organiques sur les modèles de relâchement des déchets vitrifiés, il est fait le choix de limiter l'utilisation de matériaux cimentaires et de matières organiques au niveau des alvéoles HA. Le choix des matériaux et leurs quantités sont justifiés au regard de cette exigence (47, 48).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Les connaissances acquises notamment sur l'applicabilité des modèles de relâchement pour les différentes familles de déchets HA et les incertitudes associées, incluant celles relatives aux paramètres des modèles, ont conduit aux choix suivants :

  - ✓ en situation de référence :
    - application du modèle fondé sur l'atteinte d'une vitesse résiduelle V_R pour les familles pour lesquelles il est applicable en considérant des paramètres phénoménologiques ou le cas échéant conservatifs si la connaissance est moins étayée (49) ;
    - application du modèle fondé uniquement sur la vitesse initiale (modèle V_0.S) pour les familles de déchets pour lesquelles le modèle V_R n'est pas applicable ;
    - choix d'un modèle alternatif pour considérer les incertitudes sur l'influence de l'auto-irradiation ;
  - ✓ en situation enveloppe :
    - application du modèle fondé uniquement sur la vitesse initiale (modèle V_0.S) pour toutes les familles de déchets ce qui permet de prendre en compte l'ensemble des incertitudes résiduelles relatives au modèle fondé sur la vitesse résiduelle V_R. Les paramètres du modèle fondé sur la vitesse initiale sont pris conservatifs pour couvrir les incertitudes résiduelles ;
  - ✓ pour les deux situations du SEN : Application d'un modèle de type labile (i.e. Relâchement instantané) aux familles présentant une faible résistance à la lixiviation ou pour lesquelles les données disponibles (composition du verre, surface accessible à l'eau) ne permettent pas d'appliquer et de paramétrer un modèle.

- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  En scénarios d'évolution altérée et *What-if*, il est considéré un modèle de relâchement labile à l'ensemble de l'inventaire des conteneurs dysfonctionnants pour couvrir l'ensemble des incertitudes résiduelles sur l'environnement physico-chimique des alvéoles HA lors de la rupture prématurée des conteneurs.

Tableau 2-24 *Synthèse des incertitudes résiduelles de connaissance sur les modèles de relâchement des déchets HA et MA-VL vitrifiés et de leurs modalités de gestion*

Fonctions de sûreté « Protéger les déchets de l'eau » et « Limiter le relâchement des éléments radioactifs, et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Déchets HA et MA-VL vitrifiés	**Influence du transitoire thermique sur le modèle de relâchement des déchets HA (température à cœur du verre supérieure à 50 °C pour les déchets vitrifiés du quartier pilote ou 70° C pour les déchets vitrifiés du quartier de stockage HA)**	Conteneur de stockage étanche sur une durée permettant de respecter les critères de température à cœur du verre	En SEN : Température à la date de perte d'étanchéité intégrée dans le paramétrage du modèle de relâchement
	Contribution des fissures en conditions insaturées sur l'altération du verre ainsi que l'effet de l'auto-irradiation sur les vitesses d'hydratation	/	En SEN : Choix du modèle fondé sur la vitesse initiale conservative
	Incertitude sur les valeurs de vitesse initiale	/	En SEN : Choix de paramètres du modèle fondé sur la vitesse initiale conservatifs
	Incertitudes sur les valeurs de vitesses résiduelles	/	En situation de référence du SEN : choix de paramètres sur la vitesse résiduelle conservatifs En situation enveloppe du SEN : prise en compte d'un modèle $V_0.S$
	Effet de l'auto-irradiation sur la vitesse résiduelle	/	En situation de référence du SEN : Choix d'un modèle alternatif considérant l'effet de l'auto-irradiation
	Influence d'un milieu cimentaire sous température sur le modèle de relâchement des déchets HA	Exigence de limiter l'utilisation de matériaux cimentaires au niveau des alvéoles HA	En SEN : prise en compte d'un modèle $V_0.S$ en situation enveloppe et pH intégré dans le paramétrage du modèle de relâchement En SEA et *What-if* : choix d'un modèle labile
	Influence des composés organiques sur le modèle de relâchement des déchets HA	Exigence de limiter l'utilisation de matières organiques ou de substances complexantes dans les alvéoles HA	Couvert par le choix d'un modèle labile en *What-if* de dysfonctionnement des conteneurs de stockage

Fonctions de sûreté « Protéger les déchets de l'eau » et « Limiter le relâchement des éléments radioactifs, et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
	Incertitudes résiduelles sur l'environnement physico-chimique des alvéoles HA lors de la rupture prématurée des conteneurs	/	Choix d'un modèle labile en SEA et *What-if* de dysfonctionnement des conteneurs de stockage
Déchets HA vitrifiés	**Risque de dépassement ponctuel du critère de 500 °C dans le verre R7T7 lors du détensionnement thermique de la soudure du conteneur de stockage**	Contrôle qualité du procédé de soudure	En SEN : prise en compte d'un modèle $V_0.S$ en situation enveloppe du SEN

2.7.1.3 Les modèles de relâchement des déchets HA non vitrifiés

Pour tous les déchets HA non vitrifiés, il est retenu un modèle de type labile dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage du fait des incertitudes qui persistent à ce stade sur l'applicabilité de modèles autres que le modèle qualifié de labile (cf. Tableau 2-25).

Tableau 2-25 Synthèse des incertitudes résiduelles de connaissance sur les modèles de relâchement des déchets HA non vitrifiés et de leurs modalités de gestion

Fonctions de sûreté « Protéger les déchets de l'eau » et « Limiter le relâchement des éléments radioactifs, et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Déchets HA non vitrifiés	**Incertitude sur les données permettant d'appliquer et de paramétrer un modèle pour les déchets HA non vitrifiés**	/	En SEN : Choix d'un modèle labile

Tableau 2-26 Synthèse des choix des modèles de relâchement retenus pour les déchets HA et MA-VL vitrifiés et les déchets HA non vitrifiés

<table>
<tr><th>Famille de colis de déchets</th><th>Applicabilité des modèles aux familles de déchets HA et de déchets MA-VL vitrifiés</th><th>Situation de référence du SEN</th><th>Situation enveloppe du SEN</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Déchets HA vitrifiés</td><td>Familles pour lesquelles le modèle fondé sur la vitesse résiduelle est applicable</td><td>Modèle de relâchement fondé sur la vitesse résiduelle V_R (i.e. De type $V_0.V_R$)
Paramètres phénoménologiques</td><td>Modèle de relâchement fondé sur la vitesse initiale (i.e. De type $V_0.S^*$)
Paramètres conservatifs</td></tr>
<tr><td>Familles pour lesquelles seul le modèle fondé sur la vitesse initiale est applicable</td><td colspan="2">Modèle de relâchement fondé sur la vitesse initiale (i.e. De type $V_0.S^*$)
Paramètres conservatifs</td></tr>
<tr><td>Familles pour lesquelles les incertitudes de connaissance sont importantes</td><td>Modèle de relâchement fondé sur la vitesse initiale (i.e. De type $V_0.S^*$)
Paramètres conservatifs</td><td>Modèle « labile** »</td></tr>
<tr><td>Familles pour lesquelles les connaissances ne permettent pas d'appliquer un modèle</td><td colspan="2">Modèle « labile** »</td></tr>
<tr><td>Déchets HA non vitrifiés</td><td>Famille pour lesquelles les connaissances ne permettent pas d'appliquer un modèle</td><td colspan="2">Modèle « labile** »</td></tr>
<tr><td>Déchets MA-VL vitrifiés</td><td>Familles pour lesquelles le modèle fondé sur la vitesse résiduelle est applicable</td><td>Modèle de relâchement fondé sur la vitesse résiduelle V_R (i.e. De type $V_0.V_R$)</td><td rowspan="2">Modèle de relâchement fondé sur la vitesse initiale (i.e. De type $V_0.S^*$)</td></tr>
<tr><td>Déchets MA-VL vitrifiés</td><td>Familles pour lesquelles seul le modèle fondé sur la vitesse initiale est applicable</td><td>Modèle de relâchement fondé sur la vitesse initiale (i.e. De type $V_0.S^*$)</td></tr>
<tr><td>Déchets MA-VL vitrifiés</td><td>Familles pour lesquelles les connaissances ne permettent pas d'appliquer un modèle</td><td colspan="2">Modèle « labile** »</td></tr>
</table>

* S désignant la surface spécifique du verre

** un modèle labile conduit à un relâchement instantané des radionucléides et substances toxiques chimiques à l'arrivée de l'eau sur les déchets

2.7.1.4 La spéciation du sélénium dans les colis de déchets HA

Comme indiqué au chapitre 2.2.1 du présent volume, la migration du sélénium dans la couche du Callovo-Oxfordien est fortement liée à la proportion de Se(+VI) initial contenu dans les déchets. L'analyse menée depuis le « Dossier d'options de sûreté- Partie après-fermeture » (2) sur l'état chimique du sélénium au sein des déchets vitrifiés HA montre que le sélénium serait plutôt sous la forme Se(+IV) ou Se(0) dans les verres. La part de Se(+VI) dans les verres a été estimée (44) :

- à 20 % du sélénium initialement introduit dans le verre, selon une approche majorante à partir des données disponibles dans la littérature sur la distribution Se(+VI)/Se(IV), pour un verre ne contenant pas de Pd susceptible de modifier la répartition Se(+VI)/Se(IV)/Se(0) ;
- à 3 % du sélénium initialement introduit lors de la vitrification sur la base d'essais expérimentaux menés sur des verres borosilicatés inactifs contenant du Pd et révélant que près de 76 % du Se est présent dans les billes Pd-Se (c'est-à-dire sous la forme Se(0)).

LA SPECIATION DU SELENIUM 79 DANS LES COLIS DE DECHETS HA

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Au regard des connaissances acquises sur la spéciation du sélénium dans les déchets HA vitrifiés et des incertitudes associées, le SEN intègre la part de Se(+VI) estimée pour les évaluations après fermeture, à savoir :
  - ✓ à 3 % du Se(+VI) en situation de référence sur la base des essais expérimentaux ;
  - ✓ à 20 % du Se(+VI) initialement introduit dans le verre en situation enveloppe.

Tableau 2-27 Synthèse des incertitudes résiduelles de connaissance sur la spéciation du sélénium dans les déchets HA vitrifiés et de leurs modalités de gestion

Fonction de sûreté « Protéger les déchets de l'eau » et « Limiter le relâchement des éléments radioactifs, et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Déchets HA vitrifiés	**Incertitude sur la spéciation du sélénium dans les déchets HA vitrifiés**	/	En situation enveloppe du SEN : part maximale de Se(+VI) estimée

2.7.1.5 Le conteneur de stockage HA

Le conteneur de stockage assure la fonction *« Protéger les déchets de l'eau »* en garantissant une étanchéité à l'eau durant une période suffisante permettant de couvrir les incertitudes suivantes :

- incertitudes sur l'altération aqueuse de la matrice vitrifiée en température (augmentation des cinétiques de dissolution et des vitesses de diffusion ; incertitudes sur le comportement des radionucléides en solution et à la surface des phases solides ; relâchement plus complexe à modéliser) :
  - ✓ le conteneur de stockage doit être étanche tant que la température à cœur du verre est supérieure à 50 °C pour les déchets vitrifiés stockés dans le quartier pilote HA et 70 °C pour les déchets vitrifiés stockés dans le quartier de stockage HA ;
- incertitudes sur la maitrise du comportement des radionucléides en température (solubilité et sorption à l'interface solide/liquide au-delà de 80 °C) :
  - ✓ le conteneur doit être étanche tant que la température dans l'environnement est supérieure à 70 °C au moment de l'arrivée d'eau sur les déchets (correspondant à la température maximale admissible de 80 °C avec une marge de dimensionnement de 10 °C permettant de couvrir les incertitudes résiduelles sur l'évaluation du transitoire thermique).

Par ailleurs, le conteneur mis en place doit être étanche tant que la radiotoxicité des radionucléides à vie courte n'a pas suffisamment décru en cohérence avec les recommandations du guide de sûreté n°1 de l'ASN de 2008 (1) en lien avec l'occurrence *« d'événement incertain, mais plausible, d'un événement entrainant un court-circuit du milieu géologique »* comme dans l'hypothèse d'une intrusion humaine involontaire.

Le conteneur de stockage HA est conçu de manière à lui conférer la plus grande durabilité possible d'étanchéité, en tenant compte des incertitudes scientifiques, des limites technologiques et des facteurs économiques. Le conteneur de stockage HA est un acier non allié à bas carbone, en particulier pour le caractère prédictible de sa cinétique de corrosion généralisée en présence d'eau en réponse notamment aux exigences de sûreté long terme après fermeture.

Afin de résister aux sollicitations chimiques, il est en acier peu sensible à la corrosion localisée et à la corrosion sous contrainte[42] (cf. Volume 3 du présent rapport). Après fermeture du stockage, en conditions saturées, la dégradation du conteneur suit un processus de corrosion généralisée.

L'analyse des risques et incertitudes du conteneur de stockage intègre la corrosion qui a pu se produire pendant la phase de fonctionnement. La date de début de la prise en compte de la corrosion du conteneur de stockage HA correspond ainsi à la date de mise en place du premier colis du quartier de manière conservative.

CRITÈRE DE DYSFONCTIONNEMENT DES CONTENEURS DE STOCKAGE HA

Le dysfonctionnement du conteneur de stockage correspond à une perte d'étanchéité antérieure à la durée d'étanchéité qui permet de respecter l'ensemble des exigences applicables au centre de stockage Cigéo, présentées ci-dessus. En cohérence avec le « Dossier de justification de la conception des conteneurs de stockage des colis HA » (48), celui-ci est considéré comme dysfonctionnant si la durée d'étanchéité du conteneur est antérieure à :

- 400 ans pour les conteneurs de stockage HA stockés dans le quartier pilote HA ;
- 350 ans pour les conteneurs de stockage des déchets HA0 et MA-VL vitrifiés stockés dans le quartier de stockage HA ;
- 500 ans pour les conteneurs de stockage des déchets HA1/HA2 stockés dans le quartier de stockage HA.

L'analyse des risques et incertitudes du conteneur de stockage porte ainsi sur l'ensemble des risques et incertitudes susceptibles d'exercer une influence sur la cinétique de corrosion du conteneur, y compris lors de sa mise en place et pendant la phase de fonctionnement.

2.7.1.5.1 La fabrication, le contrôle qualité du conteneur de stockage HA et le risque d'endommagement par suite des opérations de mise en stockage

Le conteneur de stockage est constitué de trois parties (couvercle, virole, fond) soudées selon un procédé qualifié et faisant l'objet d'un contrôle à fabrication. Par ailleurs le choix d'aciers faiblement alliés est retenu pour leur tolérance vis-à-vis des processus de corrosion (corrosion sous contrainte par exemple, cf. Chapitre 2.7.1.5.2 du présent volume).

Le programme d'études sur les conteneurs de stockage HA vise à définir les procédés de fabrication et de contrôle disponibles et éprouvés les plus appropriés pour lui assurer une durée d'étanchéité la plus longue possible. Un niveau de contrôle qualité maximal est envisagé : tous les conteneurs de stockage HA sont contrôlés.

Différentes dispositions de conception sont mises en œuvre pour prévenir le risque d'endommagement lors de la phase de fonctionnement comme la présence de patins et la fiabilisation des moyens de manutention. De plus, le conteneur de stockage fait l'objet d'une qualification à la chute (48). Un endommagement du conteneur conduisant à sa perte d'étanchéité prématurée serait détecté pendant la phase de fonctionnement par les moyens de surveillance mis en place.

Dans le cadre des études de robustesse, le dysfonctionnement ponctuel sur quelques colis est jugé comme peu vraisemblable. Ce risque est couvert par un scénario d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement de conteneurs de stockage. Un défaut généralisé à tous les colis de stockage HA est jugé comme très peu vraisemblable et est postulé dans un scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage (cf. Encadré ci-après et le tableau 2-28).

[42] Sur la période de fonctionnement du centre de stockage Cigéo, il est considéré que les phénomènes de corrosion n'entraînent pas de corrosion sur une épaisseur supérieure à quelques millimètres.

FABRICATION ET CONTROLE QUALITÉ DU CONTENEUR DE STOCKAGE HA

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que les conteneurs de stockage remplissent leur exigences, un contrôle qualité de leur fabrication et de leur mise en place dans les alvéoles sera effectué (47, 48).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  L'ensemble des dispositions de conception et de contrôle qualité mentionnés ci-dessus justifient le fait de ne pas retenir de conteneur de stockage HA dysfonctionnant dans le scénario d'évolution normale.

- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Le risque d'un défaut ponctuel (matériau, contrôle qualité) sur quelques colis de stockage est couvert dans le cadre d'un SEA : « *Dysfonctionnement de quelques conteneurs de stockage HA* ».

  Dans le cadre des études de robustesse du système de stockage, le dysfonctionnement de l'ensemble des conteneurs de stockage est postulé dans le cadre d'un scénario de type What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage dès la fermeture du stockage.

Tableau 2-28 Synthèse des risques et incertitudes du conteneur de stockage incertitudes et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Protéger les déchets de l'eau »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Conteneur de stockage	**Risque d'un défaut ponctuel du conteneur de stockage HA**	Choix du matériau du conteneur de stockage Contrôle qualité Conteneur de stockage HA conforme aux exigences	Défaut ponctuel : SEA de dysfonctionnement de quelques conteneurs de stockage
	Risque d'un défaut généralisé du conteneur de stockage HA	Choix du matériau du conteneur de stockage Contrôle qualité Conteneur de stockage HA conforme aux exigences	Défaut généralisé : scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage

2.7.1.5.2 Les caractéristiques intrinsèques du conteneur de stockage HA relatives à sa cinétique de corrosion

Le comportement à long terme des éléments métalliques (chemisages et conteneurs de stockage HA) est dominé par leur corrosion. L'acier non allié à bas carbone a été retenu pour le chemisage de l'alvéole et les conteneurs de stockage. En effet, la corrosion de cette famille de matériaux dans les conditions d'environnement des alvéoles HA, est essentiellement de type corrosion généralisé. À ce titre, son évolution est plus prédictible que d'autres formes de corrosion rencontrées sur d'autres familles de matériaux métalliques plus nobles. Par ailleurs le choix d'aciers faiblement alliés est retenu pour leur tolérance vis-à-vis des processus de corrosion sous contrainte par exemple (47).

L'épaisseur du corps de conteneur de stockage HA est dimensionnée en tous points afin que le débit de dose au pseudo-contact du conteneur soit inférieur ou égal à 10 $Gy.h^{-1}$ (48).

Une incertitude résiduelle concerne l'épaisseur minimale à partir de laquelle il peut être considéré que le conteneur de stockage HA perd sont étanchéité. À ce stade des connaissances, il est considéré une épaisseur critique de flambement conservative de 15 mm (dans le cas d'un chargement mécanique externe) au-delà de laquelle le conteneur est considéré comme ayant perdu son étanchéité (50). Cette incertitude est couverte par les choix de durée de représentation des conteneurs en situation de référence du scénario d'évolution normale (SEN).

Les modalités de corrosion (généralisée, localisée…) et les cinétiques associées ont été étudiées pour différentes conditions physico-chimiques (expérimentations en laboratoires de surface et expérimentations *in situ* au Laboratoire souterrain) : l'ensemble des processus de corrosion est bien connu. Il ressort des acquis de connaissances que de manière générale, les mécanismes et vitesses de corrosion présentent peu d'incertitudes (cf. Tableau 2-29) (25, 50, 51).

L'Andra a fixé un certain nombre d'exigences de conception pour les déchets nécessitant un conteneur étanche (critère thermique, milieu réducteur et anoxique, résistance à la fragilisation par l'hydrogène, matériau du chemisage…). Ces dispositions visent à le protéger de certains processus de corrosion (corrosion sous contrainte, corrosion radiolytique) ou d'en limiter les effets (47, 48).

Par ailleurs, différentes dispositions de conception sont mises en œuvre pour limiter l'entrée d'oxygène à l'intérieur de l'alvéole HA pendant la phase de fonctionnement afin de garantir que l'acier non allié restera dans un domaine de protection ou de passivité, conduisant à des vitesses de corrosion généralisée inférieures à 10 $\mu m.an^{-1}$ (la tête d'alvéole est conçue pour limiter l'entrée d'oxygène quand la galerie d'accès est ventilée). Des dispositifs de contrôle sont mis en place pour s'assurer du bon fonctionnement de ces dispositions techniques (mise en place du MREA en tête d'alvéole).

L'espace annulaire initial entre l'extrados du chemisage et le milieu géologique est comblé par un matériau de remplissage de l'espace annulaire (MREA) qui vise à réaliser un tampon chimique vis-à-vis de la perturbation acide transitoire induite par l'oxydation des argilites en paroi pendant la phase de fonctionnement et contribue à limiter la pénétration de l'oxygène par la tête d'alvéole HA. Cela permet de s'affranchir de l'effet de la perturbation oxydante des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des alvéoles, dans le scénario d'évolution normale (SEN). De plus, l'alcalinité du matériau de remplissage permet de placer durablement le métal dans le domaine de passivité, et donc d'avoir une vitesse de corrosion faible, y compris en présence d'oxygène résiduel (25, 52).

Au regard de l'ensemble des points ci-dessus, le risque associé à une évolution non anticipée de la cinétique de corrosion des conteneurs de stockage est jugé comme très peu vraisemblable. Ce risque est postulé dans le cadre d'un scénario *What-if* (cf. Encadré ci-après et tableau 2-29).

L'influence de l'activité bactérienne dans l'alvéole HA sur la cinétique de corrosion des aciers est bien connue, celle-ci est abordée au chapitre 2.7.2.2.3 du présent volume et couverte par le choix de vitesse de corrosion prise en compte en situation de référence du SEN.

LES CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES DU CONTENEUR DE STOCKAGE RELATIVES À SA CINÉTIQUE DE CORROSION

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que les conteneurs de stockage remplissent leur exigences, un contrôle qualité de leur fabrication et de leur mise en place dans les alvéoles sera effectué (47, 48).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Sur la base des connaissances acquises et des exigences spécifiées, il est fait le choix de retenir :

  ✓ en situation de référence du SEN : la durée d'étanchéité définie au meilleur de la connaissance sur la base de : (i) l'épaisseur minimale du conteneur de stockage HA, (ii) la valeur conservative de la vitesse de corrosion généralisée en milieu anoxique intégrant le rôle des micro-organismes (cf. Chapitre 2.7.2.2.3 du présent volume ; 10 µm/an) et (iii) la valeur conservative de l'épaisseur critique de flambement des conteneurs de stockage (15 mm) ;

  ✓ en situation enveloppe du SEN : conformément à la démarche, les durées d'étanchéités minimales du conteneur sont égales à celles définies au chapitre 2.7.1.5 du présent volume, valeurs minimales permettant de respecter l'ensemble des exigences applicables au conteneur de stockage HA à sa mise en place dans l'alvéole.

- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les SEA et les scénarios *What-if***

  Le risque d'un défaut ponctuel sur quelques colis de stockage ou de tous les conteneurs de stockage dès la fermeture du stockage est traité au chapitre 2.7.1.5.1 du présent volume.

  Les risques associés à une évolution non anticipée de la cinétique de corrosion des conteneurs de stockage en lien avec le milieu physico-chimique de l'alvéole sont traités au chapitre 2.7.2 du présent volume.

Tableau 2-29 Synthèse des risques et incertitudes du conteneur de stockage et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Protéger les déchets de l'eau »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Conteneur de stockage	**Valeur de l'épaisseur critique de flambement du conteneur de stockage HA**	Choix du matériau du conteneur de stockage Contrôle qualité Conteneur de stockage HA conforme aux exigences	En situation enveloppe du SEN : durée basée sur le respect des exigences spécifiées En situation de référence du SEN : Prise en compte de la valeur conservative de l'épaisseur critique de flambement
Conteneur de stockage	**Influence de l'activité bactérienne sur la cinétique de corrosion**	/	En situation de référence du SEN : Couverte par le choix conservatif de la vitesse de corrosion

2.7.1.5.3 Les perturbations chimiques

Conformément à la démarche, l'analyse conduite intègre l'ensemble des interactions susceptibles de se produire au sein de l'alvéole et susceptibles de dégrader les performances du conteneur de stockage HA vis-à-vis de la réalisation de ses fonctions de sûreté.

L'influence du milieu physico-chimique de l'alvéole et de l'influence des composants environnants (matériau de remplissage de l'espace annulaire, transitoire thermique, activité bactérienne) sur le conteneur de stockage HA sont traités dans les chapitres suivants (cf. Chapitre 2.7.2 du présent volume).

2.7.2 La partie utile de l'alvéole HA

2.7.2.1 Le matériau de remplissage de l'espace annulaire

Pour rappel, le matériau de remplissage de l'espace annulaire (MREA) a pour rôle de contribuer à conférer une durée d'étanchéité minimale au conteneur de stockage HA *via* notamment :

- la réduction de l'accessibilité de l'alvéole à l'oxygène provenant de la ventilation de la galerie d'accès ;
- un effet de neutralisation vis-à-vis de la perturbation acide transitoire induite par l'oxydation des pyrites en paroi d'argilites.

Le matériau de remplissage de l'espace annulaire (MREA) est ainsi conçu pour neutraliser le transitoire acide et constituer un environnement favorable à la passivité des aciers du chemisage et des conteneurs de stockage HA. La nature du matériau qui sera mis en place à l'extrados du chemisage est fait pour tamponner le transitoire acide venant des argilites oxydées en champ proche.

2.7.2.1.1 La mise en place du MREA et ses caractéristiques intrinsèques

Un essai au Laboratoire souterrain a montré la faisabilité de mise en place par injection d'un matériau cimentaire sur une longueur de 40 mètres. L'homogénéité globale du matériau de remplissage a été contrôlée dans certaines zones à l'extrados du chemisage : aucune hétérogénéité significative du matériau n'a été relevée (25).

Depuis le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2), des essais de mise en place par injection ont été réalisés sur de plus grandes longueurs (80 mètres et 112 mètres). Elles ont montré la faisabilité de l'injection d'un matériau de remplissage depuis le fond de l'alvéole mais des zones de contact direct chemisage/roche ont été localement mises en évidence. Des pistes d'optimisation pour améliorer l'homogénéité géométrique ont été testées et ont permis d'améliorer sensiblement l'homogénéité circonférentielle du remplissage. Une incertitude résiduelle persiste toutefois à ce stade sur la présence potentielle d'une hétérogénéité localisée à l'extrados du chemisage.

Ce type d'hétérogénéité locale conduirait localement à ne pas tamponner le transitoire oxydant/acide induit par l'oxydation des argilites en champ proche ce qui se traduirait, notamment en présence d'oxygène, par une vitesse de corrosion plus élevée des composants métalliques au contact des eaux impactées par le transitoire acide/oxydant (essentiellement le chemisage de l'alvéole HA au contact des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien. Une influence sur les conteneurs de stockage est jugé comme peu vraisemblable) (50).

La mise en place d'un matériau de remplissage homogène pour un alvéole HA est considérée comme faisable au plan technologique. Par ailleurs, des contrôles qualité seront mis en œuvre afin de vérifier l'absence d'hétérogénéités importantes lors de la mise en place, il est ainsi considéré en scénario d'évolution normale que le MREA est conforme aux exigences.

À ce stade, un défaut de mise en place du matériau de remplissage (de type hétérogénéité importante) ne peut être exclu bien que cela semble peu vraisemblable. Une telle situation est couverte sous la forme d'un scénario d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement de quelques conteneurs de stockage (cf. Encadré ci-après). Une mise en place non conforme du MREA ayant un impact généralisé dans l'alvéole HA est considérée comme très peu vraisemblable. Une telle situation est postulée sous la forme d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement des conteneurs de stockage (cf. Encadré ci-après).

Différentes dispositions de conception sont mises en œuvre pour limiter l'entrée d'oxygène à l'intérieur de l'alvéole HA pendant la phase de fonctionnement afin de garantir que l'acier non allié restera dans un domaine de protection ou de passivité, conduisant à des vitesses de corrosion généralisée inférieures à 10 $\mu m.an^{-1}$ (la tête d'alvéole est conçue pour limiter l'entrée d'oxygène quand la galerie d'accès est ventilée). Des dispositifs de contrôle seront mis en place pour s'assurer du bon fonctionnement de ces dispositions techniques.

Bien que peu vraisemblable, la pénétration d'oxygène à l'intérieur de l'alvéole est postulée et conduirait à des vitesses de corrosion plus importantes à l'intérieur de la partie utile de l'alvéole HA et ainsi entraîner une perte d'étanchéité prématurée du conteneur de stockage. Le retour d'expérience de la phase de fonctionnement sur les premiers alvéoles du quartier pilote, l'optimisation des procédés de construction et les futures évolutions technologiques permettront d'exclure un dysfonctionnement des conteneurs de stockage du quartier de stockage HA. Une telle situation est couverte sous la forme d'un SEA de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage du quartier pilote HA (cf. Encadré ci-après) et d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA.

LE MATÉRIAU DE REMPLISSAGE DE L'ESPACE ANNULAIRE (MREA)

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que le MREA remplisse ses exigences, un contrôle qualité de sa fabrication et de sa mise en place à l'extrados des alvéoles HA sera effectué (47).

  Par conception, la concentration en oxygène dans l'alvéole HA est maîtrisée pendant la phase de fonctionnement et des dispositions de conception sont mis en œuvre pour limiter la pénétration d'oxygène dans les alvéoles depuis la galerie (47).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Sur la base des essais déjà réalisés et des connaissances technologiques, le matériau de remplissage en extrados du chemisage HA est représenté en SEN comme efficace vis-à-vis de :
  - ✓ sa capacité à tamponner le transitoire oxydant/acide ;
  - ✓ sa capacité à limiter la pénétration de l'oxygène par la tête d'alvéole.

- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Afin de couvrir les risques internes sur la mise en place et l'homogénéité du MREA et à une pénétration d'oxygène dans les alvéoles HA, l'Andra considère les trois scénarios suivants :
  - ✓ un scénario d'évolution altéré (SEA) qui postule la perte d'étanchéité dès la fermeture du stockage d'un conteneur de stockage par alvéole HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) ;
  - ✓ un scénario d'évolution altéré (SEA) qui postule la perte d'étanchéité de l'ensemble des conteneurs de stockage du quartier pilote HA ;
  - ✓ un scénario *What-if* qui postule la perte d'étanchéité dès la fermeture du stockage de l'ensemble des conteneurs de stockage HA.

Tableau 2-30 Synthèse des risques et incertitudes du MREA et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
MREA	**Risque d'une mise en place non conforme du MREA (hétérogénéité avec influence localisée sur les conteneurs de stockage HA)**	Tampon du transitoire acide par le matériau de remplissage à l'extrados du chemisage Contrôle qualité de la mise en place	SEA de dysfonctionnement d'un conteneur par alvéole HA

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitudes résiduelles** et/ou risques internes	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
MREA	**Risque d'une mise en place non conforme du MREA (hétérogénéité avec influence généralisée sur les conteneurs de stockage HA)**	Tampon du transitoire acide par le matériau de remplissage à l'extrados du chemisage Contrôle qualité de la mise en place	Scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs HA.
MREA	**Risque postulé d'une pénétration d'oxygène par le MREA à l'extrados du chemisage**	Dispositif en tête d'alvéole limitant l'entrée d'oxygène pendant la phase de fonctionnement	SEA de dysfonctionnement de tous les conteneurs du quartier pilote HA. Scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage

2.7.2.1.2 Évolution du pH dans l'alvéole HA en après-fermeture

Le matériau de remplissage de l'espace annulaire doit avoir une charge alcaline suffisante pour neutraliser la perturbation oxydante issue de la couche du Callovo-Oxfordien suite à la pénétration d'oxygène dans les argilites pendant la phase de fonctionnement. Elle doit cependant rester limitée autant que possible afin qu'après neutralisation du transitoire acide/oxydant, il ne subsiste pas une charge alcaline significative autour des alvéoles HA. L'objectif est, à long terme, de préserver les argilites et le verre d'une altération chimique particulière, liée à ce matériau (2, 44).

Des simulations de l'évolution du pH dans les alvéoles HA ont été conduites depuis le Dossier d'options de sûreté en considérant plusieurs compositions du MREA. Elles montrent qu'une altération progressive du matériau de remplissage est compatible avec l'atteinte de conditions chimiques compatibles avec une altération du verre en régime de cinétique résiduelle (25, 52).

Les incertitudes résiduelles concernent (i) l'organisation détaillée des mécanismes chimiques au sein de l'alvéole, en lien avec (ii) la quantité d'argilites oxydées initialement et la représentation du transitoire hydraulique-gaz. Ces incertitudes résiduelles ne sont pas de nature à modifier de manière significative l'évolution chimique globale d'un alvéole HA (25). Ces incertitudes résiduelles sont couvertes par le modèle de relâchement pris en compte dans les scénarios d'évolution altérée (SEA) et *What-if* de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA (cf. Encadré ci-après).

LE pH DANS L'ALVÉOLE HA EN APRÈS-FERMETURE

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de limiter l'expansion du panache alcalin lié aux bétons de la galerie d'accès dans l'alvéole, il est fait le choix de mettre en place un bouchon de fermeture en tête d'alvéole. Le choix du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage (MREA) est effectué entre autres afin qu'il n'induise pas une perturbation alcaline susceptible de modifier les choix des modèles de relâchements retenus.

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  En SEN, il est considéré sur la base des connaissances que les incertitudes résiduelles ne sont pas de nature à modifier le choix des modèles de relâchement retenus/

- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  L'éventuelle occurrence d'un pH élevé dans l'alvéole de stockage après perte d'étanchéité du conteneur de stockage est prise en compte dans les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement des conteneurs de stockage *via* le choix d'un modèle de relâchement en milieu alcalin qui est assimilé de manière conservative à un relâchement labile (cf. Chapitre 2.7.1 du présent volume).

  L'influence favorable d'un milieu cimentaire sur la solubilité des radionucléides et substances toxiques chimiques dans la partie utile de l'alvéole n'est pas valorisée dans ces scénarios.

Tableau 2-31 Synthèse des risques et incertitudes en lien avec les conditions physico-chimiques dans les alvéoles HA et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La partie utile de l'alvéole HA	**Incertitude sur l'organisation détaillée des mécanismes chimiques au sein de l'alvéole**	/	L'influence de ces processus sur le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques est couvert par la prise en compte d'un modèle de relâchement labile en SEA/*What-if* de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA
	Incertitude sur la quantité d'argilites oxydées initialement	Nature et mise en place d'un MREA : conforme aux exigences	• En SEN : Retour à un pH compatible avec les modèles de relâchement retenus • Modèle de relâchement labile en SEA/*What-if* de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA

2.7.2.2 Les vides résiduels dans l'alvéole

2.7.2.2.1 Le transfert et la rétention dans l'alvéole

L'alvéole HA comporte à la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo des vides résiduels qui peuvent être en lien avec le dimensionnement thermo-hydro-mécanique (THM) des alvéoles (cf. Chapitre 2.3.2.1 du présent volume). Le stockage étant considéré comme totalement saturé dès la fermeture du stockage dans le scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 2.5 du présent volume), les caractéristiques physico-chimiques des vides une fois remplis d'eau permettent de contribuer à la fonction « Immobiliser les radionucléides et toxiques chimiques dans le stockage » en favorisant une faible solubilité.

La précipitation des radionucléides est favorisée dans un contexte de milieu en général proche de l'équilibre imposé par les eaux de la couche du Callovo-Oxfordien (pH proche de la neutralité et conditions réductrices).

Des essais tendent à montrer que la présence de fer en solution peut diminuer la solubilité de certains radionucléides et substances toxiques chimiques (sélénium, uranium…) (32). Des incertitudes résiduelles importantes subsistent cependant sur la maitrise des phases porteuses du fer et les conditions oxydo-réductrices s'y rapportant. Ce processus favorable sur la solubilité de certains éléments n'est pas retenu dans le scénario d'évolution normale.

L'utilisation de matières organiques ou de substances complexantes pour les colis de stockage et les alvéoles HA étant limitée, il n'est pas pris en compte d'influence des complexants en scénario d'évolution normale.

LES VIDES DANS L'ALVÉOLE HA (JEUX INTER-COLIS, VIDES APICAUX…)

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Les vides dans l'alvéole (jeux inter-colis, vides apicaux…) ne sont pas représentés de manière explicite en SEN. La partie utile est représentée comme un milieu poreux homogène.

  Afin de couvrir les incertitudes sur les conditions physico-chimiques de l'alvéole HA sur le long terme à ce stade des connaissances, il n'est pas considéré de limite de rétention dans la partie utile de l'alvéole HA.

Tableau 2-32 Synthèse des risques et incertitudes liés au transfert et à la rétention dans l'alvéole HA et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Immobiliser les radionucléides et toxiques chimiques dans le stockage »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La partie utile de l'alvéole HA	**Maitrise des phases porteuses du fer et des conditions oxydo-réductrices s'y rapportant**	/	Il n'est pas valorisé de sorption ou de précipitation dans la partie utile de l'alvéole HA en SEN

2.7.2.2.2 Le transitoire thermique dans l'alvéole HA

Les effets de l'élévation de la température sont bien appréhendés et permettent de les prendre en compte explicitement au sein de la partie utile de l'alvéole HA (25) :

- la décroissance dans le temps de la température au cœur de la matrice verre dans les modèles de relâchement des colis de déchets HA après la perte d'étanchéité des conteneurs de stockage ;
- le comportement en température des radionucléides et substances toxiques chimiques en solution dans l'alvéole après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage (coefficient de diffusion effectif, Kd et limites de solubilité de certains radionucléides). La sorption et la précipitation n'étant pas représentée dans l'alvéole, l'influence de la température est sans objet.

LE TRANSITOIRE THERMIQUE DANS L'ALVÉOLE HA

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans les scénarios**

  Les connaissances acquises permettent pour tous les scénarios (SEN, SEA de dysfonctionnement d'un conteneur de stockage par alvéole, *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage) de prendre en compte les effets de la température dans la partie utile des alvéoles HA (décroissance temporelle de l'élévation de température dans les modèles de relâchement des déchets vitrifiés, application de facteurs correctifs sur le coefficient de diffusion effectif).

  L'influence du transitoire thermique sur la sorption et la solubilité est sans objet car il n'est pas considéré de rétention chimique dans la partie utile de l'alvéole HA.

2.7.2.2.3 L'activité bactérienne dans l'alvéole HA

Depuis le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2) des études ont été conduites sur l'influence de l'activité bactérienne sur la corrosion des aciers.

Les essais de corrosion au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne ont montré que les micro-organismes étaient présents en quantité non négligeable dans un milieu aqueux sans contact avec les argilites mais que la présence d'un matériau alcalin, tel que le matériau de remplissage à base cimentaire peut contribuer à limiter, notamment par son pH, les possibilités de développement d'une activité bactérienne. L'hydrogène issu de la corrosion anoxique pourrait être consommé par l'activité des bactéries sulfato-réductrices. En contrepartie, des sulfures, exprimés sous forme de gaz (H_2S), d'ions (HS...) et de solides peuvent être produits. Ces produits peuvent potentiellement introduire des zone d'hétérogénéités ou de discontinuités des films protecteurs et amorcer une corrosion de type localisée (25, 38, 51).

Les acquis de connaissances ont permis d'identifier que l'influence des micro-organismes n'est pas déterminante dans les processus de corrosion des conteneurs de stockage HA car :

- les produits de corrosion provenant de cette interaction avec les micro-organismes ne sont pas au contact du métal ;
- des expérimentations sur des échantillons métalliques introduits après un transitoire acide ont été menées et la cinétique de corrosion est restée faible (<10 $\mu m.an^{-1}$) malgré la présence de bactéries sulfato-réductrices. Ils ont de ce fait une faible influence sur le processus de corrosion ;
- les expérimentations (notamment au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne) étant réalisées sans stérilisation, la gamme de valeur de la vitesse de la corrosion des conteneurs de stockage HA intègre de fait le rôle des micro-organismes.

Les essais réalisés à 50 °C et 80 °C n'ont pas mis en évidence d'influence des micro-organismes sur les cinétiques de corrosion, quelles que soient les conditions d'essais (51).

En contexte de l'alvéole HA, la réduction biotique des sulfates ne devrait pas modifier drastiquement la chimie des eaux ; les conditions oxydo-réductrices négatives seront maintenues. De ce point de vue aucun effet sur la mobilité des radionucléides et des substances toxiques chimiques n'est attendu (38).

Les incertitudes résiduelles sont couvertes par la vitesse de corrosion retenue en situation de référence du scénario d'évolution normale (SEN).

L'ACTIVITÉ BACTÉRIENNE DANS L'ALVÉOLE HA

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Au regard des connaissances acquises, la borne haute de la vitesse de corrosion prise en compte en situation de référence du SEN (10 µm.an^{-1}) couvre l'influence de l'activité bactérienne dans l'alvéole HA.

2.7.2.3 Le chemisage

Le chemisage n'a pas de fonction de sûreté après-fermeture mais il constitue une voie de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques. Il contribue toutefois à conférer une durée d'étanchéité minimale au conteneur de stockage HA en :

- limitant les déformations mécaniques de l'alvéole, de façon à réduire durablement le chargement mécanique du colis de stockage à une pression hydrostatique (pression de l'eau à la profondeur du stockage augmentée de la surpression due à la chaleur dégagée par les déchets) ;
- permettant, de par sa conception (choix du matériau utilisé) d'éviter le risque de couplage galvanique et son influence sur la corrosion du conteneur de stockage HA lors du contact entre le conteneur et le chemisage après foisonnement de ce dernier.

Ces dispositions permettent de protéger le conteneur de certains processus de corrosion (corrosion sous contrainte, couplage galvanique) ou d'en limiter les effets (cf. Chapitre 2.7.1.2 du présent volume).

Les principales incertitudes résiduelles sur la tenue au flambement du chemisage et sa cinétique d'ovalisation concernent l'effet (i) d'une sollicitation thermique en présence de matériau de remplissage (ii) de défauts de fabrication, (iii) d'une corrosion généralisée hétérogène (en cas de cinétiques de corrosion différentes en partie basse et en partie haute du fait d'environnements différents) et (iv) de la présence éventuelle de macro-fissures. Au regard des connaissances techniques et scientifiques (25), les incertitudes résiduelles ne sont pas de nature à modifier le comportement du chemisage et les temps caractéristiques du flambement identifiés. Une mise en place d'un chemisage non conforme aux attendus est très peu vraisemblable du fait des contrôles qui seront réalisés. Un contact prématuré chemisage/conteneur qui ne respecterait pas les exigences est postulé dans un scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage et les modalités de représentation du foisonnement des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien au droit de la partie utile des alvéoles en scénario d'évolution normale (SEN) (cf. Chapitre 2.2.2.1 du présent volume).

SYNTHÈSE DE L'ANALYSE DES RISQUES ET INCERTITUDES DU CHEMISAGE

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Afin de garantir que le chemisage soit conforme aux attendus du concepteur, un contrôle qualité de sa fabrication et de sa mise en place dans l'alvéole HA sera effectué (47).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Il est fait le choix de ne pas représenter ce composant de manière explicite dans toutes les situations du SEN. Il est intégré à la représentation de la partie utile de l'alvéole HA.

  L'influence du flambement du chemisage sur l'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien est couvert par la représentation d'une surextension de la zone de fracturation connectée au droit de l'alvéole HA (ZFC-f, cf. Chapitre 2.2.2.1 du présent volume).

- **la gestion des risques internes et des incertitudes résiduelles par les scénarios d'évolution altérée (SEA) et les scénarios *What-if***

  Le risque associé à la mise en place d'un chemisage qui ne serait pas conforme aux exigences, en lien avec la limitation des déformations mécaniques de l'alvéole ou la limitation du risque de couplage galvanique, est postulé dans le cadre d'un scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage.

Tableau 2-33 Synthèse des incertitudes et des modalités de gestion associées vis-à-vis de l'analyse des risques et incertitudes du chemisage

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Chemisage	**Risque de contact prématuré entre le conteneur et un chemisage qui ne respecterait pas ses exigences visant à ne pas augmenter la cinétique de corrosion du conteneur**	Choix du matériau du conteneur de stockage et du chemisage Contrôle qualité du chemisage : Chemisage conforme aux exigences	Scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage

2.7.2.4 La couche du Callovo-Oxfordien endommagé mécaniquement au droit des alvéoles

2.7.2.4.1 L'influence des vides résiduels

Les modèles d'endommagement mécanique pris en compte dans les évaluations de sûreté décrits au chapitre 2.2.2.1 du présent volume (25, 50) couvrent les différentes techniques de creusement envisagées pour les alvéoles HA.

Le foisonnement des argilites au droit des alvéoles est pris en compte sur la base des éléments fournis au chapitre 2.2.2.1 du présent volume.

2.7.2.4.2 La perturbation par l'injection du MREA de la zone endommagée de la couche du Callovo-Oxfordien

Au droit des alvéoles HA, les argilites sont en contact avec le matériau de remplissage de l'espace annulaire (MREA) mis en place à l'extrados du chemisage métallique. Les caractéristiques rhéologiques

à l'injection du MREA permettent le remplissage de l'espace annulaire et de tout ou partie de la zone fracturée connectée (ZFC-0).

Les acquis de connaissances sur l'influence de la perturbation alcaline par un matériau cimentaire (cf. Chapitre 2.2.2.4 du présent volume) montrent que la perturbation alcaline de la couche du Callovo-Oxfordien par le MREA reste limitée à la peau des fractures infiltrées de la ZFC-0. De plus, la formulation du MREA a été ajustée au juste besoin afin que l'extension de la perturbation alcaline due à sa dégradation reste limitée dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien permettant ainsi de préserver leurs caractéristiques favorables (25).

Les incertitudes résiduelles concernent donc uniquement l'extension de l'influence de l'injection du matériau de remplissage sur les propriétés hydro-dispersives et de rétention de la ZFC-0 (telle que décrite au chapitre 2.2.2.1 du présent volume). Ces incertitudes sont prises en compte dans le choix des propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique de la ZFC-0 au droit de l'alvéole HA en scénario d'évolution normale (SEN).

LA PERTURBATION ISSUE DU MATÉRIAU DE REMPLISSAGE DE L'ESPACE ANNULAIRE (MREA)

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Sur la base des connaissances acquises à ce jour et des incertitudes relatives à l'influence du MREA sur les caractéristiques hydrauliques de la zone fracturée connectée initiale (ZFC-0), l'Andra retient dans la ZFC-0 :
  - ✓ des propriétés hydro-dispersives pénalisantes équivalentes à celles d'un sable sans rétention chimique sur toute l'épaisseur de la ZFC-0 en situation enveloppe du SEN ;
  - ✓ en situation de référence du SEN, l'influence du MREA sur les propriétés hydro-dispersives de l'endommagement mécanique est assimilée à la perturbation alcaline de la ZFC-0 (cf. Chapitre 2.2.2.4 du présent volume). L'extension de cette perturbation est définie par modélisation.

Tableau 2-34 Synthèse des risques internes et incertitudes liés à l'influence du MREA sur les propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien et modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
La couche du Callovo-Oxfordien endommagé au droit de la partie utile de l'alvéole HA	**Incertitude sur l'influence de l'injection du MREA sur les propriétés hydro-dispersives et de rétention chimique de la zone fracturée connectée (ZFC-0)**	/	En situation de référence du SEN : la ZFC-0 est représentée avec des propriétés hydrauliques et de transport, conservatives sur une partie de son épaisseur En situation enveloppe du SEN : la ZFC-0 est représentée avec des propriétés hydrauliques et de transport, pénalisantes sur toute son épaisseur

2.7.2.4.3 La perturbation fer/argilites

Les interactions fer/argile au droit des alvéoles HA sont bien maîtrisées expérimentalement (32). Elles correspondent à la formation de différents composés secondaires : des oxydes de fer, des

carbonates de fer, des silicates et aluminosilicates de fer, des sulfures et des argiles néoformées enrichies en fer.

L'absence d'une interface directe acier-argilites de la couche du Callovo-Oxfordien (lié à la présence du MREA à l'extrados du chemisage) préjuge d'une très faible transformation et le contrôle de la concentration en fer par les produits de corrosion du chemisage ne favorisent pas les transformations minéralogiques. Les interactions fer-argilites restent donc très limitées voire quasi-nulles en quantité et en extension.

Ces acquis de connaissances permettent de négliger l'influence de la perturbation fer/argilites sur les propriétés hydro-dispersives et de rétention de la couche du Callovo-Oxfordien au droit de l'alvéole HA.

2.7.2.4.4 L'influence de l'hydrogène de corrosion ou de radiolyse

En après-fermeture, la production d'hydrogène est un phénomène résultant :

- de processus radiolytiques, c'est-à-dire de processus de décomposition de matières hydrogénées (radiolyse des déchets, radiolyse de l'eau) par les rayonnements ionisants ;
- de processus de dégradation chimique des composants du stockage (notamment ceux comportant de l'acier), qui en conditions anoxiques, produisent de l'hydrogène.

Le mécanisme de réduction de la pyrite par l'hydrogène a été étudié sur de la pyrite pure à partir de méthodes électrochimiques pour des conditions de température et de pression applicables au centre de stockage Cigéo (25). Ces travaux ont montré un effet négligeable de la présence d'hydrogène (l'eau interstitielle des argilites conserve un caractère réducteur) et des vitesses de réaction faibles.

L'INFLUENCE DE L'HYDROGÈNE DE CORROSION OU DE RADIOLYSE

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**
  Ces acquis de connaissances permettent de négliger l'influence de l'hydrogène issu de la corrosion anoxique des composants métalliques de l'alvéole HA et de la radiolyse sur les propriétés hydro-dispersives et de rétention de la couche du Callovo-Oxfordien au droit de l'alvéole HA.

2.7.2.4.5 L'activité bactérienne au niveau des interfaces

Dans la roche autour des alvéoles, l'activité microbienne ne peut exister que dans des fractures et l'extension de la zone concernée devrait être la zone fracturée initialement lors de la réalisation des ouvrages (32, 38).

Il ressort des études conduites qu'il existe suffisamment d'espace et d'eau autour des alvéoles HA pour permettre une activité microbienne. Des études ont porté sur les interfaces avec la zone fracturée connectée de la couche du Callovo-Oxfordien où des augmentations locales de la taille des pores au niveau des fractures/fissures pourraient permettre un développement microbien bien qu'il soit attendu que les phénomènes d'auto-colmatage réduisent cet espace.

Les principales réactions redox susceptibles d'être catalysées par une activité microbienne en milieu naturel ont été étudiées (la réduction du Fe(III), la réduction des sulfates et la réduction des carbonates et formation de méthane). Il ressort de ces études (32, 38) :

- qu'il ne soit pas attendu que la présence de bactéries puisse altérer la capacité de cicatrisation hydraulique des argilites par réduction de Fe(III). En effet, il n'a été observé ni réduction du Fe(III), ni les bactéries caractéristiques pour la réduction du Fe(III) lors des expériences effectuées au Laboratoire souterrain du CMHM ou du mont Terri ;
- la réaction des sulfates surtout avec l'H_2 va perdurer tant qu'il y a un apport de sulfates, celui-ci provient de la formation hôte qui constitue un vaste réservoir et tant que des aciers, source d'H_2, restent présents ;

- il n'est pas attendu de réduction des carbonates et formation de méthane dans les conditions des alvéoles HA.

De manière générale, l'activité microbienne au niveau des argilites en contact avec l'alvéole HA favorise des états redox bas associés à une plus faible mobilité des radionucléides sensibles au redox.

L'ACTIVITÉ BACTÉRIENNE AU NIVEAU DES INTERFACES DE L'ALVÉOLE HA

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**
  Au regard des acquis de connaissances, du fait que les effets potentiels de l'activité microbienne sur le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des alvéoles HA sont plutôt favorables, ils ne sont pas représentés en scénario d'évolution normale de manière conservative.

2.7.2.5 Le dispositif de fermeture définitif de la tête d'alvéole

Le dispositif de fermeture définitif de la tête d'alvéole contribue à la fonction « Préserver les propriétés favorables des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien » en limitant les vides compressibles susceptibles d'être repris lors de la rupture du chemisage. Il n'est donc pas attendu de foisonnement du type attendu au niveau de la partie utile des alvéoles de stockage HA.

Ce dispositif de fermeture définitif d'alvéole HA a également pour fonction de « limiter l'extension du panache alcalin depuis la galerie d'accès vers l'alvéole HA », afin de garantir des conditions physico-chimiques favorables à la durabilité de la matrice vitreuse pour les colis les plus proches de la galerie d'accès.

La fermeture de l'alvéole de stockage HA prévoit, la mise en place d'un bouchon placé en tête d'alvéole entre la bride et les colis de stockage. À ce stade, le bouchon d'alvéole est constitué de 4 éléments préfabriqués sous forme de conteneurs métalliques « à ouverture différée », remplis d'anneaux d'argile gonflante (47).

Le bouchon de fermeture de l'alvéole n'a pas de fonction au regard de ses propriétés hydro-dispersives ou de rétention chimique mais reste une voie de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques par la voie ouvrages.

Le bouchon de fermeture de l'alvéole subit deux perturbations simultanées : la perturbation alcaline du fait de la resaturation par un fluide ayant traversé les bétons de structure, et les interactions fer/argiles du fait de l'utilisation d'acier pour le conteneur et le chemisage.

Les résultats des simulations de l'évolution chimique du pH en tête d'alvéole HA depuis les bétons de la galerie montrent que l'extension maximale du panache alcalin reste d'ordre métrique sur une période de 20 000 ans (47, 52).

Du fait du rôle du dispositif de fermeture de la tête d'alvéole HA, la perturbation fer/argile et la perturbation alcaline ne sont pas représentées de manière explicite dans ce composant, elles sont couvertes *de facto* par le choix des propriétés hydro-dispersives et l'absence de rétention dans ce composant en scénario d'évolution normale (SEN). Néanmoins, leurs influences limitées permettent au dispositif de fermeture de l'alvéole de jouer son rôle vis-à-vis de la perturbation alcaline issue des bétons de structure et de limiter les vides compressibles susceptibles d'être repris lors de la rupture du chemisage. La représentation de l'alvéole HA n'est pas modifiée en SEN.

LE DISPOSITIF DE FERMETURE DE LA TÊTE D'ALVÉOLE HA

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Ce composant n'ayant pas de fonction vis-à-vis de ses performances hydrauliques ou de rétention chimique, le dispositif de fermeture de l'alvéole HA est représenté de manière pénalisante dans toutes les situations du SEN sous la forme d'un milieu poreux homogène dont les propriétés hydro-dispersives sont assimilées à un sable sans sorption ni limite de solubilité.

2.8 Les alvéoles de stockage MA-VL

Le quartier de stockage MA-VL correspond à celui décrit dans l'architecture illustrative (cf. Chapitre 5 du présent volume). Il est conçu de manière à préserver une couche minimum du Callovo-Oxfordien saine de 50 mètres conformément aux exigences applicables au centre de stockage Cigéo (35).

Un alvéole MA-VL comprend une partie utile où sont stockés les colis de déchets MA-VL, la cellule de manutention des colis de stockage MA-VL et la jonction de retour d'air qui auront été préalablement déséquipées accueillent un remblai semblable à celui mis en place dans les réseaux de galeries courantes (cf. Chapitre 2.6 du présent volume).

L'analyse des risques et incertitudes relative à l'alvéole MA-VL concerne :

- les colis MA-VL stockés intégrant les inventaires en radionucléides et substances toxiques chimiques ainsi que les modèles de relâchement des déchets MA-VL ;
- la partie utile de l'alvéole MA-VL où sont stockés les déchets, et comprenant les structures en béton qui contribuent aux fonctions de sûreté par les conditions physico-chimiques qu'elles imposent (voussoirs, radier, paroi interne, voûte) vis-à-vis des propriétés de sorption et de solubilité ;
- les dispositifs d'obturation de l'entrée et du fond des alvéoles MA-VL.

2.8.1 Les colis MA-VL stockés

2.8.1.1 Les déchets MA-VL

2.8.1.1.1 Les inventaires en radionucléides et substances toxiques chimiques des déchets MA-VL

Comme indiqué au volume 3 du présent rapport, la connaissance des inventaires en radionucléides et substances toxiques chimiques des déchets MA-VL comprend des incertitudes qui peuvent être plus ou moins importantes selon les familles de colis concernées. La gestion de ces incertitudes repose sur la mise en œuvre d'une méthodologie qui permet de construire un inventaire radiologique qualifié de « margé » pour les évaluations de sûreté après fermeture.

Cette méthodologie décrite (cf. Volume 3 du présent rapport), repose sur la connaissance des activités massiques des colis à l'échelle de la famille. La prise en compte des incertitudes résiduelles s'effectue par l'analyse des niveaux de connaissances des colis MA-VL et par l'application d'un facteur de marge selon ce niveau.

L'inventaire en radionucléides qui résulte de l'application de cette méthodologie de prise en compte des incertitudes de connaissance constitue l'inventaire retenu pour les évaluations de sûreté après fermeture.

L'inventaire en toxiques chimiques pour la phase après-fermeture est construit sur la base d'une liste de 13 substances toxiques chimiques : uranium, plomb, mercure, antimoine, cadmium, sélénium, arsenic, nickel, chrome, bore, béryllium, CN^- et amiante. L'établissement de l'inventaire en toxiques chimiques des colis de déchets MA-VL suit une méthodologie comparable à celle utilisée pour l'inventaire radiologique. Cependant, contrairement à l'inventaire radiologique l'inventaire en substances toxiques chimiques n'est pas margé (cf. Volume 3 du présent rapport).

L'INVENTAIRE EN RADIONUCLÉIDES ET TOXIQUES CHIMIQUES DES DÉCHETS MA-VL

Pour tenir compte des incertitudes résiduelles de connaissance des colis de déchets MA-VL, l'inventaire en radionucléides retenu pour les évaluations de sûreté après fermeture est un inventaire qualifié de « margé » établi selon la méthodologie décrite au Volume 3 du présent rapport qui intègre la gestion des incertitudes résiduelles.

L'inventaire en substances toxiques chimiques suit les mêmes principes mais n'est pas margé.

2.8.1.1.2 Les modèles de relâchements des déchets MA-VL

L'analyse des incertitudes résiduelles associées aux connaissances décrites dans le corpus de connaissance (25, 53) prend en compte la nature des déchets MA-VL. En effet, les colis de déchets MA-VL recouvrent différentes natures de déchets (sels, matériaux métalliques, matériaux organiques, graphite…) et de matrices (cimentaire, vitreuse…). Le relâchement des radionucléides par les différents colis de déchets est fonction de la nature des déchets et de la localisation des radionucléides du point de vue de leur comportement physico-chimiques dans les alvéoles de stockage (cf. Volume 7 du présent rapport).

Les connaissances sur les processus et les modèles de représentation des relâchements des radionucléides (et des substances toxiques chimiques) sont consolidées pour l'essentiel des familles de colis MA-VL retenues dans l'inventaire, il persiste des incertitudes résiduelles quant à l'applicabilité de certains modèles en condition de stockage et à certains paramètres du modèle (45, 46).

a) Le modèle de relâchement des déchets salins avec matrice bitume

L'aptitude de la matrice bitume à limiter le relâchement des radionucléides est traduit par le modèle de relâchement COLONBO. Ce modèle a été développé pour prendre en compte la capacité du bitume à limiter la reprise en eau et ainsi à limiter la mise en solution des radionucléides. L'application du modèle COLONBO repose sur un certain nombre d'hypothèse dont le maintien de la géométrie de l'enrobé (25, 53).

Pour prendre en compte les incertitudes sur le domaine d'applicabilité du modèle COLONBO, en particulier sur le maintien de la géométrie du conteneur de stockage en béton, un modèle basé sur la solubilité des sels est retenu en situation enveloppe du scénario d'évolution normale pour ces familles de colis de déchets. Pour les familles pour lesquelles le modèle COLONBO n'est pas applicable, seul le modèle de relâchement basé sur la solubilité des sels est retenu.

Pour les paramètres associés au modèle de relâchement basé sur la solubilité des sels, toute l'activité radiologique (et toutes les substances toxiques chimiques) des colis de ces déchets est associée au sel présentant la plus grande valeur de solubilité : le $NaNO_3$ (nitrate de sodium).

b) Le modèle de relâchement des déchets salins sans matrice

Pour ces déchets pour lesquels les radionucléides sont insolubilisés dans des sels hors enrobés bitumés, le modèle de relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques applicable repose uniquement sur la solubilité des sels (25, 53).

Pour les paramètres associés au modèle de relâchement basé sur la solubilité des sels, il a été considéré que toute l'activité radiologique (et toutes les substances toxiques chimiques) des colis de déchets salins soit associée au sel présentant la plus grande valeur de solubilité : le $NaNO_3$ (nitrate de sodium).

c) Le modèle de relâchement des déchets métalliques compactés (sans matrice cimentaire)

Le modèle de relâchement des déchets métalliques compactés proposé est supposé congruent à la corrosion de ces déchets, à l'exception de ceux localisés dans la couche d'oxyde (25, 53).

Vis-à-vis des fines et des éclats de cisaillage, aucun modèle n'est proposé compte tenu de la faible taille des pièces et de leur surface spécifique. Pour ces fines et éclats de cisaillages, seul un relâchement instantané (labile) est retenu.

Les incertitudes résiduelles concernent à la fois l'applicabilité du modèle basé sur la corrosion et son paramétrage (cf. Tableau 2-35). La gestion de ces incertitudes résiduelles est la suivante :

- pour prendre en compte les incertitudes sur la teneur en fines, un facteur de marge de 2 sur la valeur fournie dans les dossiers de connaissance est retenu en situation enveloppe ;
- pour couvrir les incertitudes sur les vitesses de corrosion pour les familles de colis de déchets MA-VL contenant des produits potentiellement agressifs, tels que les acides produits par la dégradation des matières organiques, ou pour les familles contenant des mélanges de métaux susceptibles d'entraîner un couplage galvanique, un modèle de relâchement labile est retenu ;
- pour tenir compte des incertitudes sur la répartition de l'activité dans les pièces métalliques, il est retenu que toute l'activité est concentrée dans les pièces les moins épaisses ;
- pour gérer les incertitudes résiduelles associées à la faible épaisseur de la couche d'oxyde (zircone) concernant l'état de la zircone en sortie de réacteur et le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques au sein de la zircone, un modèle de relâchement instantané (labile) est retenu ;
- pour tenir compte des incertitudes sur la répartition de l'activité dans les pièces métalliques, il est retenu que toute l'activité est concentrée dans les pièces les moins épaisses. En effet, la vitesse de relâchement est inversement proportionnelle à l'épaisseur des pièces métalliques.

d) Le modèle de relâchement des déchets métalliques avec matrice ciment

La connaissance acquise pour le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques des déchets métalliques avec une matrice ciment est du même niveau que pour les déchets métalliques sans matrice ciment (25, 53). Les incertitudes associées aux modèles de relâchement par corrosion sont donc identiques à celles présentées pour les colis sans matrice cimentaires hormis pour la vitesse de corrosion. Cela tient au fait que la corrosion s'effectue dans un milieu cimentaire ce qui conduit à des valeurs de vitesse de corrosion sensiblement différentes (cf. Tableau 2-35).

Pour tenir compte des incertitudes sur les valeurs de vitesse de corrosion en milieu cimentaire imposé par le revêtement-soutènement en béton de l'alvéole de stockage, la vitesse de corrosion maximale sous eau cimentaire est retenue pour chacun des alliages métalliques considérés (alliages de zirconium, aciers inoxydables et alliages de nickel).

e) Le modèle de relâchement des autres colis de déchets MA-VL

La connaissance pour le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques des autres familles de colis de déchets MA-VL, notamment de certains déchets vitrifiés MA-VL, ne permet pas de leur appliquer des modèles de relâchement. Pour ces familles, un modèle de relâchement labile est retenu.

Tableau 2-35 Synthèse des incertitudes résiduelles associées aux modèles de relâchement des déchets MA-VL et de leur paramétrage et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »			
Famille de déchets MA-VL	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Déchets Salins avec matrice bitume	**Incertitudes sur l'applicabilité du modèle COLONBO et de son paramétrage**	/	En situation enveloppe du SEN : modèle « de solubilité des sels ($NaNO_3$) » qui est conservatif
	Incertitude sur la durée d'intégrité mécanique du conteneur de stockage en conditions de stockage/	/	En situation de référence du SEN : Application du modèle COLONBO pendant la période d'intégrité du conteneur de stockage
Déchets Salins avec ou sans matrice bitume	**Incertitudes sur l'applicabilité du modèle de solubilité des sels et de son paramétrage**	/	En SEN : Application du modèle de solubilité des sels en retenant le sel avec la plus haute valeur de solubilité (*i.e.* $NaNO_3$)
Déchets Métalliques sans ou avec matrice cimentaire	**La présence et la quantité de fines ou d'éclats pour certaines familles**	/	Application du modèle qualifié de labile pour les fines. Paramétrage : • Taux de fines en situation de référence du SEN : phénoménologique • Taux de fines en situation enveloppe du SEN : doublé
	Le caractère uniforme de la répartition de l'activité dans les matériaux métalliques	/	En SEN : Toute l'activité est considérée localisée dans les pièces les moins épaisses
	L'épaisseur de la couche d'oxyde	/	En SEN : Prise en compte de l'épaisseur minimale proposée dans la gamme de valeur disponibles
	Valeur de vitesse de corrosion liée à la présence de matériaux susceptibles d'entraîner un couplage galvanique entre les différents matériaux présents dans les déchets	/	En SEN : Application d'un modèle de relâchement instantané (labile)
	Valeur de vitesse de corrosion liée à l'influence de produits agressifs (tels que les acides produits par la dégradation des matières organiques)	/	En SEN : Application d'un modèle de relâchement instantané (labile)
	Les valeurs de vitesses de corrosion en milieu cimentaire	/	En situation de référence du SEN : Modèle de corrosion généralisé en milieu cimentaire pour les alliages de Zr, Ni et aciers inoxydables

Fonction de sûreté : « Limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »			
Famille de déchets MA-VL	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
			En situation enveloppe du SEN : La vitesse de corrosion maximale en milieu cimentaire est retenue

2.8.1.1.3 La spéciation du sélénium dans les colis de déchets MA-VL

Depuis le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2), des études ont été conduites sur la spéciation du sélénium dans les colis de stockage.

Au regard des connaissances acquises sur la spéciation du sélénium dans les déchets MA-VL et des incertitudes résiduelles associées, il est fait l'hypothèse dans les deux situations du SEN que 100 % de l'inventaire en sélénium des déchets MA-VL est sous la forme Se(+VI).

2.8.1.2 Le conteneur de stockage MA-VL

Le conteneur de stockage des déchets MA-VL, lorsqu'il est présent, n'est pas sollicité pour contribuer aux fonctions de sûreté après fermeture. Il est ainsi fait le choix de ne pas le représenter en scénario d'évolution normale.

Pour le modèle de relâchement des déchets salins avec matrice bitume, il est considéré une durée de 1 000 ans de tenue mécanique du conteneur de stockage pour l'application du modèle COLONBO en situation de référence, le terme source est alors défini en considérant l'ensemble du colis stocké.

2.8.2 La partie utile de l'alvéole MA-VL

Les structures en béton de l'alvéole MA-VL contribuent à la fonction de sûreté « *limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, et à les immobiliser dans les alvéoles de stockage* » en imposant un environnement chimique cimentaire favorable à une faible solubilité de l'essentiel des radionucléides et à leur rétention par sorption. Par exemple, les actinides et les lanthanides présentent de faible solubilité et une forte sorption dans cet environnement.

L'analyse qui suit concerne uniquement les caractéristiques intrinsèques de l'alvéole MA-VL contribuant à la réalisation des fonctions de sûreté, c'est-à-dire la solubilité et la sorption des radionucléides et substances toxiques chimiques. L'analyse concerne ainsi (i) les propriétés de solubilité et de sorption des bétons de structure des alvéoles (soutènement, revêtement, radier) et (ii) les conditions physico-chimiques dans la partie utile de l'alvéole.

2.8.2.1 Les bétons de structure des alvéoles MA-VL

2.8.2.1.1 La sollicitation mécanique des bétons de structure

Au cours du temps, le béton constituant le revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL va se dégrader mécaniquement et être soumis à des sollicitations mécaniques (gonflement des déchets bitumées, reprise des vides, corrosion des aciers) entrainant des phénomènes de fracturation.

Aucune propriété hydraulique ou de transport diffusif n'est attendue de ces matériaux. En effet, en après-fermeture, l'évolution des alvéoles MA-VL sur le long terme conduit à une fissuration et fracturation des structures en béton (25, 36).

PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES ET DE TRANSPORT DES BÉTONS DE STRUCTURE MA-VL

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Il est fait le choix en SEN de retenir une conductivité hydraulique à l'eau et des propriétés de transport diffusif prises équivalentes à celle d'un sable (le béton est représenté comme un milieu poreux continu équivalent).

2.8.2.1.2 Les sollicitations chimiques des bétons de structure

Outre des sollicitations mécaniques conduisant à terme à des phénomènes de fracturation, les matériaux cimentaires vont subir des sollicitations chimiques par l'eau provenant de la couche du Callovo-Oxfordien et par des composés issus de la dégradation des déchets. Les diverses perturbations chimiques générées sont analysées en regard des caractéristiques sollicitées des bétons.

Les structures en béton de l'alvéole MA-VL imposent un environnement chimique cimentaire favorable à une faible solubilité de l'essentiel des radionucléides et à leur rétention par sorption. Les travaux de recherche menés depuis de nombreuses années permettent d'appréhender les processus de dégradation des bétons au cours du temps et le comportement des radionucléides et substances toxiques chimiques dans différents états de dégradation de ces matériaux (25).

a) La dégradation chimique des bétons

Le comportement à long terme du béton, notamment sa dégradation chimique au cours du temps, est bien appréhendée. Les travaux de recherche menés permettent de proposer un modèle d'altération du béton suivant trois types de dégradation chimiques au contact des eaux de la couche du Callovo-Oxfordien : (i) la carbonatation, (ii) l'hydrolyse, et (iii) l'attaque sulfatique.

La carbonatation atmosphérique peut se produire dans les composants en béton, pendant la phase de fonctionnement. Son extension est estimée limitée, au plus décimétrique, à la fermeture définitive du stockage et la quantité de béton carbonaté est faible au regard des épaisseurs des structures en béton. Une incertitude résiduelle concerne le développement des effets d'écran sur la réactivité de la portlandite, à la suite de la précipitation de calcite à la surface des cristaux de portlandite qui conduirait augmenter l'extension de la perturbation, mais également à diminuer son intensité sur l'épaisseur carbonatée. Cette augmentation reste toutefois limitée et ne modifie pas significativement l'ordre de grandeur de la perturbation. Compte tenu de ces acquis, la carbonatation atmosphérique n'est pas représentée explicitement dans les scénarios (25).

Concernant l'attaque sulfatique, des dispositions de conception sont prises en retenant une formulation adaptée du béton. Ces dispositions comprennent également la limitation de la chaleur d'hydratation et du contenu en alcalin. Ce choix intègre également une limitation des matières organiques (37).

De fait, beaucoup d'études ont porté sur les processus d'hydrolyse par l'eau des bétons. Les processus de dégradation chimique des matériaux cimentaires par l'eau porale des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien sont bien connus et décrits (25, 54) Il ressort de ces études que les incertitudes résiduelles portent essentiellement sur les extensions spatio-temporelles des différents états de dégradation du béton. Pour gérer cette incertitude, les structures en béton sont représentées par une zone unique à laquelle sont attribuées les performances acquises les moins favorables (cf. Encadré ci-après).

Les propriétés de sorption et de solubilité des radionucléides dans les matériaux cimentaires ont fait l'objet de programmes de recherche depuis plus de 20 ans, incluant des collaborations au plan international, en particulier dans le cadre de projets européens (25) :

- les valeurs de coefficients de distribution solide-solution (Kd) ont été acquises pour un large spectre des radionucléides et substances toxiques chimiques sur des ciments frais à altérés (par hydrolyse) ;
- les valeurs des limites de solubilité sont établies pour un état sain et un état altéré du béton, incluant notamment des calculs thermodynamiques à l'équilibre, en considérant différentes compositions d'eau et de phases solides cimentaires.

Il persiste encore des incertitudes résiduelles sur le comportement de certains radionucléides dans les matériaux cimentaires dégradés du fait d'un panel d'expérimentations moins large par rapport à l'état sain (25). Néanmoins, les connaissances acquises et les analogies possibles permettent de proposer des valeurs de sorption et de solubilité pour la plupart des radionucléides. Pour gérer ces incertitudes, il est fait le choix de retenir les valeurs de paramètres de sorption et de solubilité les moins favorables parmi celles obtenues par mesures ou par analogie entre l'état sain et l'état altéré (cf. Encadré ci-après).

Concernant la dégradation des superplastifiants et adjuvants contenus dans les bétons au cours du temps, au travers des molécules complexantes résultantes. Elle pourrait également accroître la mobilité de certains radionucléides (essentiellement les actinides +IV/+III et lanthanides) dans les matériaux cimentaires dégradés. Toutefois, même si leurs propriétés de rétention étaient diminuées, elles resteraient encore élevées car il faudrait des concentrations en molécules complexantes élevées, et de ce fait jugées peu probables en situation de stockage au regard des dispositions de conception prises en compte sur l'utilisation de matières organiques pour les alvéoles (25).

Des incertitudes résiduelles sur la caractérisation du milieu oxydo-réducteur au sens large dans les matériaux cimentaires persistent également, auquel est associé le rôle de l'activité bactérienne (25). Néanmoins, les gammes de valeurs de sorption et de solubilité s'appuient sur un domaine d'état redox étendu pour l'ensemble des formulations de bétons et les états de dégradation chimiques, ce qui permet de couvrir les grandes tendances et de proposer des valeurs. L'influence de l'activité bactérienne sur le milieu oxydo-réducteur est traité au chapitre 2.8.2.1.4 du présent volume.

CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES DES STRUCTURES EN BÉTON DES ALVÉOLES MA-VL

- **la gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception**

  Le choix du béton utilisé au niveau des alvéoles MA-VL est fait pour constituer un environnement chimique cimentaire favorable à une faible solubilité de l'essentiel des radionucléides et substances toxiques chimiques et à leur rétention par sorption. Ce choix tient compte de la résistance aux attaques sulfatiques, et de la limitation des matières organiques (ciment à base de portlandite) (37).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Les incertitudes résiduelles sur l'extension spatio-temporelle de la dégradation par hydrolyse des bétons et le comportement de certains radionucléides dans les bétons dégradés, sont gérées par le choix :

  - ✓ de représenter toute l'épaisseur de béton par une seule zone sur toute la durée des évaluations ;
  - ✓ de retenir les valeurs de sorption et de solubilité correspondant à la valeur la moins favorable entre le béton « sain » et le béton « altéré ».

  Les incertitudes résiduelles sur la caractérisation du milieu oxydo-réducteur dans les bétons, sont gérées :

  - ✓ en situation enveloppe du SEN en considérant la sorption et la solubilité d'un milieu oxydant ce qui est conservatif ;
  - ✓ en situation de référence, en considérant la sorption et la solubilité d'un milieu réducteur sauf pour les alvéoles présentant une perturbation oxydante liée aux sels (cf. Chapitre 2.8.2.1.2d) du présent volume).

Tableau 2-36 Synthèse des risques internes et incertitudes résiduelles des bétons de structure des alvéoles MA-VL et modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**Le développement des effets d'écran sur la réactivité de la portlandite**	/	En SEN : La carbonatation n'est pas représentée explicitement
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**Risque d'attaque sulfatique**	Résistance aux attaques sulfatiques par une formulation adaptée	/
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**Extension spatio-temporelle de la dégradation par hydrolyse des bétons**	/	En SEN : Toute l'épaisseur de béton est représentée par une zone unique sur toute la durée de l'évaluation
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**Comportement des radionucléides dans les matériaux cimentaires dégradés**	/	En SEN : Pris en compte dans le choix des valeurs de sorption et de solubilité des éléments dans les bétons
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**La caractérisation des conditions d'oxydo-réduction (au sens large) dans les matériaux cimentaires**	/	En SEN : Pris en compte dans le choix des valeurs de sorption et de solubilité dans les bétons : • Situation enveloppe du SEN : en conditions oxydantes • Situation de référence du SEN : en conditions réductrices
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**La dégradation des super-plastifiants au cours du temps, au travers des molécules complexantes résultantes**	Béton usuel (ciment à base de portlandite) avec exigence de limitation de l'utilisation de matières organiques ou de substances complexantes pour les colis de stockage et les alvéoles	/

b) La perturbation saline issue de certains déchets MA-VL

Que ce soit lors de leur resaturation progressive par l'eau de la formation hôte ou après fermeture à long terme (milieu saturé), la quantité importante de sels solubles (nitrate, sulfate, potassium, sodium) contenue dans les alvéoles de déchets MA-VL salins est susceptible de provoquer de fortes concentrations en sels (molaires à plurimolaires) dans les eaux au sein des alvéoles (32).

Le relâchement des sels se traduit par un gradient de concentration dans le matériau cimentaire depuis le terme source que constitue le colis de déchets. Ce gradient influence les conditions de diffusion des radionucléides et des substances toxiques chimiques au sein des matrices (porosité accessible et diffusion), sur les mêmes bases phénoménologiques que celles observées dans l'argilite (réduction des effets d'exclusion anionique pour les anions, pas d'effet pour les espèces neutres, et diminution du flux diffusif qui reste supérieur à celui des espèces neutres pour les cations).

La solubilité des radionucléides et substances toxiques chimiques est susceptible d'évoluer en présence de fortes concentrations en sels solubles. Une incertitude résiduelle concerne le calcul du coefficient d'activité dans les bétons en présence d'une perturbation saline. En effet, la contribution de l'évolution de l'activité quant à l'augmentation de la solubilité des radionucléides et substances toxiques chimiques reste à être quantifiée (32).

La présence de sels solubles peut également modifier notablement la sorption des éléments chimiques au sein des matériaux cimentaires en lien avec l'évolution de la pâte de ciment et de sa solution à l'équilibre en présence d'une perturbation saline. À ce stade, les mécanismes impliqués restent à identifier (32).

À ce stade des connaissances, une valeur seuil de l'influence de la perturbation saline sur les propriétés de sorption et de solubilité des radionucléides et toxiques chimiques dans les bétons est définie à 0,1 M.

Les modèles réactionnels n'intègrent pas le développement d'une activité bactérienne avec ses conséquences favorables sur la dégradation des sels ce qui conduirait à limiter le panache salin (38).

L'INFLUENCE DE LA PERTURBATION SALINE SUR LES PROPRIÉTÉS DE RÉTENTION DES BÉTONS DE STRUCTURE MA-VL

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Au regard des connaissances acquises et des incertitudes résiduelles sur l'influence de la perturbation saline sur les propriétés de sorption et solubilité dans les bétons, il est fait les choix suivants en SEN :

  - ✓ de considérer que la perturbation saline affecte la solubilité et la sorption de tous les radionucléides et substances toxiques chimiques ;
  - ✓ Sur la base des connaissances disponibles, un facteur correctif est appliqué aux paramètres de sorption et de solubilité dans les bétons au-delà de la valeur seuil de force ionique de 0,1 M au niveau des alvéoles de catégorie physico-chimique MA-VL 1 et MA-VL 2.

Tableau 2-37 Synthèse des incertitudes et des modalités de gestion associées vis-à-vis de l'analyse des risques et incertitudes de la perturbation saline dans l'alvéole MA-VL

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**Le calcul du coefficient d'activité dans les bétons en présence d'une perturbation saline**	/	En SEN : Facteur correctif appliqué que les propriétés de sorption et de solubilité dans les bétons des alvéoles MA-VL 1 et MA-VL 2 à partir d'une force ionique de 0,1 M
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**Les mécanismes impliqués dans l'évolution de la pâte de ciment en présence d'une perturbation saline**	/	

c) La perturbation organique issue de certains déchets MA-VL

La dégradation des composés organiques présents dans les déchets MA-VL peut produire des molécules organiques à pouvoir complexant et ainsi augmenter la solubilité des radionucléides et substances toxiques chimiques et réduire leur capacité à être retenus par les phases minérales. Les effets des composés organiques sur la migration des radionucléides dans les bétons ont été étudiés (25, 32).

Que ce soit pour les matériaux cimentaires ou les argilites, les essais de rétention mettent en évidence une diminution de la sorption (Kd) et une augmentation de la limite de solubilité (C_{sat}) à partir d'une valeur seuil (25). Au-delà de cette valeur, ces variations sont d'environ un ordre de grandeur par ordre de grandeur de la concentration en ligands organiques. Les autres effets sont des effets favorables à une diminution de la vitesse de transfert des éléments chimiques (coefficient de diffusion et porosité accessible).

Les incertitudes résiduelles concernent :

- la stabilité à long terme de certains acides carboxyliques et qui pourrait conduire vers des espèces moins complexantes (25, 32). Un éventuel effet moins complexant des composés organiques n'est pas pris en compte, la perturbation organique est représentée dans les bétons de structure des alvéoles MA-VL de manière pérenne sur toute la durée des évaluations selon les mêmes modalités que celles retenues pour le Callovo-Oxfordien et exposées au chapitre 2.2.2.5.2 du présent volume ;
- la phénoménologie des interactions entre les matériaux et les molécules organiques est moins bien connue pour les matériaux cimentaires que pour les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien. Toutefois de récents travaux montrent un certain niveau d'analogie et la connaissance acquise permet de représenter l'influence des composés organiques dans les bétons selon les mêmes modalités que dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les effets de compétition entre les molécules organiques et certaines espèces chimiques (dont le fer) qui peut limiter la formation de complexes organiques-radionucléide. Cet effet plutôt favorable n'est pas valorisé dans les simulations caractérisant l'extension et l'intensité de la perturbation organique.

Les modèles réactionnels n'intègrent pas le développement d'une activité bactérienne avec ses conséquences favorables sur la dégradation des matières organiques ce qui conduirait à limiter le panache de substances organiques (38).

L'INFLUENCE DE LA PERTURBATION ORGANIQUE SUR LES PROPRIÉTÉS DE RÉTENTION DES BÉTONS DE STRUCTURE MA-VL

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Au regard des connaissances acquises et des incertitudes résiduelles associées sur l'influence de la perturbation organique dans les bétons MA-VL, l'Andra retient dans le scénario d'évolution normale les mêmes principes de représentation que ceux définis pour la perturbation organique dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien décrite au chapitre 2.2.2.5.2 du présent volume.

Tableau 2-38 Synthèse des risques et incertitudes de la perturbation organique dans les bétons de structure MA-VL et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : « Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture »			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**La stabilité à long terme de certains acides carboxyliques**	/	En SEN : représentation de la perturbation organique selon son extension maximale dès l'instant initial et sur toute la durée des évaluations
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**Phénoménologie des interactions entre les matériaux cimentaires et les molécules organiques**	/	En SEN : sur la base d'analogies, représentation de la perturbation organique selon les mêmes modalités que pour la couche du Callovo-Oxfordien
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**Influence de la compétition entre les molécules organiques et d'autres espèces en solution**	/	En SEN : ce phénomène favorable n'est pas pris en compte dans les modélisations de l'extension et de l'intensité de la perturbation organique

d) La perturbation oxydante liée aux sels issus de certains déchets MA-VL

La bioréduction des nitrates devrait modifier de manière importante les conditions géochimiques (dans l'alvéole MA-VL) en imposant des conditions oxydantes qui impactent le comportement des radionucléides au sein de l'alvéole. La présence conjointe de nitrates en solution et d'une activité microbienne est détaillée au chapitre 2.2.2.5.3 du présent volume. Globalement, la perturbation oxydante concerne les éléments chimiques suivants sensibles au milieu oxydo-réducteur (32) : Np, Cr, Se et Pu.

e) Le cumul des perturbations chimiques

Suivant la nature des déchets MA-VL, plusieurs perturbations peuvent se superposer avec des effets qui peuvent soit être considérés de manière indépendante, soit se cumuler ou être en compétition.

En particulier, il n'existe pas à ce jour d'étude sur le couplage des perturbations organiques et salines (32). En conséquence l'Andra a fait le choix de reconduire l'hypothèse simplificatrice retenue pour la représentation des perturbations chimiques couplées dans la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2.2.2.6 du présent volume).

LE CUMUL DES PERTURBATIONS DANS LES BÉTONS DE STRUCTURE MA-VL

- **La gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**
  Comme pour la couche du Callovo-Oxfordien, en cas de cumul des perturbations dans les bétons, il est fait les choix suivants :
  - ✓ en cas de cumul de plusieurs perturbations chimiques affectant les mêmes éléments, le facteur correctif le plus pénalisant sur les paramètres hydrauliques, de transport et de rétention chimique est retenu ;
  - ✓ en cas de cumul de plusieurs perturbations chimiques qui n'affectent pas les mêmes éléments, ces perturbations sont traitées de manière indépendantes selon les mêmes modalités que dans les argilites du Callovo-Oxfordien.

Tableau 2-39 Synthèse des risques internes et incertitudes résiduelles liés au cumul des perturbations dans les bétons de structure MA-VL et des modalités de gestion associées

Fonction de sûreté : Préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après fermeture			
Perturbation	**Incertitudes résiduelles et/ou risques internes**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Béton de structure des alvéoles MA-VL	**Incertitude sur l'influence du couplage des perturbations organiques et salines dans les bétons**	/	En SEN : En cas de cumul de perturbation impactant les mêmes éléments, le facteur correctif le plus pénalisant est pris en compte En cas de cumul de perturbation impactant des éléments différents, les facteurs correctifs sont appliqués de manière indépendantes

2.8.2.1.3 La perturbation thermique

Le transitoire thermique associé à certaines alvéoles de déchets MA-VL exothermiques a été étudié. Dans les alvéoles de colis exothermiques, les températures des colis et de l'air augmentent au démarrage de la phase d'après-fermeture jusqu'à atteindre un pic avant de diminuer lorsque la chaleur dégagée par les colis devient plus faible que celle diffusée à travers le milieu géologique. Ce transitoire thermique reste limité au voisinage des alvéoles de colis exothermiques.

Il n'y a pas de données expérimentales spécifiques sur la solubilité des radionucléides et substances toxiques chimiques en fonction de la température en milieu cimentaire. Des études ont été menées par simulations sur la base de données thermodynamiques (32). De même, il existe peu de données sur un effet direct de la température sur la rétention des radionucléides dans les matériaux cimentaires.

Une température maximale de 65 °C (critère de dimensionnement) dans les bétons des alvéoles MA-VL est retenue en situation normale, en incluant néanmoins une marge de 5 °C en plus autorisant une incursion dans une plage de température entre 65 °C et 70° C de manière transitoire et sur une durée limitée (après évaluation de l'absence d'effet sur la fonction du composant en béton). Sur cette base, les niveaux atteints ne sont pas de nature à modifier le comportement mécanique et chimique des bétons des alvéoles MA-VL. L'influence de la température n'est donc pas retenue dans le scénario d'évolution normale (SEN).

2.8.2.1.4 L'activité bactérienne dans les alvéoles MA-VL

L'activité bactérienne a fait l'objet d'importants développements ces dernières années (32, 38). Des études ont été menées sur les effets potentiels de l'activité microbienne sur le comportement des nitrates et de la matière organique dans les matériaux cimentaires et les conséquences pour le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques.

Au niveau des alvéoles MA-VL, le développement microbien dépend de la chimie de l'environnement, de la présence d'eau, des sources énergiques et d'éléments nutritifs. Les études menées à ce stade (32, 38) ont permis de discerner les effets suivants en fonction de la catégorie physico-chimique des alvéoles MA-VL :

- en contexte des alvéoles de déchets MA-VL 1, MA-VL 2 et MA-VL 3, l'activité bactérienne tend à limiter le panache organique en transformant les molécules organiques en molécules de plus petites dimensions moins complexantes. Cet effet favorable n'est pas valorisé en scénario d'évolution normale (SEN) ;

- en contexte des alvéoles de déchets MA-VL 1 et MA-VL 2 :
  - ✓ l'activité microbienne tend à limiter le panache salin par consommation des nitrates et des sulfates. Cet effet favorable n'est pas valorisé en SEN ;
  - ✓ la bioréduction des nitrates devrait modifier de manière importante les conditions géochimiques en imposant des conditions oxydantes qui impactent le comportement des radionucléides au sein de l'alvéole. Un retour aux conditions réductrices est attendu dans la couche du Callovo-Oxfordien, hormis pour le sélénium qui reste sous forme oxydée (cf. Chapitre 2.8.2.1.2d) du présent volume).

De manière générale les phénomènes d'oxydo-réduction des radionucléides et des substances toxiques chimiques sont connus et ont été étudiés sur le plan international (32). Ces études ont notamment concerné le sélénium, le technétium (rhénium), l'uranium, le molybdène, le plutonium et le neptunium et le carbone 14 (vis-à-vis de la méthanogenèse).

L'ACTIVITÉ BACTÉRIENNE AU NIVEAU DES ALVÉOLES MA-VL

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  L'influence de l'activité microbienne dans les alvéoles MA-VL est gérée selon les modalités suivantes en SEN :
  - ✓ en situation enveloppe du SEN, il est considéré de manière conservative la sorption et la solubilité caractéristique d'un milieu oxydant dans les bétons MA-VL ;
  - ✓ en situation de référence du SEN, il est considéré la sorption et la solubilité caractéristique d'un milieu réducteur sauf pour les alvéoles MA-VL 1 et MA-VL 2 où il est considéré un milieu oxydant dans les bétons MA-VL.

  Par ailleurs, l'influence favorable de l'activité microbienne sur la limitation du panache salin et organique n'est pas valorisée.

2.8.2.2 La solubilité des radionucléides et substances toxiques chimiques dans les vides résiduels de l'alvéole

En conditions saturées, l'approche considère que les vides dans l'alvéole sont occupés par de l'eau issue de la couche du Callovo-Oxfordien. Les caractéristiques physico-chimiques des vides remplis d'eau permettent de contribuer à la fonction « immobiliser les radionucléides et substances toxiques chimiques dans le stockage » en favorisant une faible solubilité.

La précipitation des radionucléides est favorisée par le milieu alcalin imposé par les structures en béton de l'alvéole (25, 54).

2.8.3 La couche du Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement au droit des alvéoles

2.8.3.1 L'influence des vides résiduels

Les modèles d'endommagement mécanique pris en compte dans les évaluations de sûreté décrits au chapitre 2.2.2.1 du présent volume (25, 36, 37) couvrent les différentes techniques de creusement envisagées pour les alvéoles MA-VL.

Le taux de vides moyen dans les alvéoles MA-VL varie de 15 % à 23 % suivant l'alvéole, le foisonnement des argilites au droit des alvéoles est pris en compte sur la base des éléments fournis au chapitre 2.2.2.1 du présent volume.

2.8.3.2 Le gonflement des déchets bitumés

Le gonflement sous eau des déchets bitumés dans les alvéoles de stockage en après fermeture est pris en compte par l'Andra dans les évaluations de sûreté après fermeture au travers de ses conséquences éventuelles du développement d'une pression de gonflement sur le Callovo-Oxfordien en terme de sur-endommagement par déformation volumique (55).

La reprise d'eau par les déchets bitumés se développe, conjointement à la resaturation des ouvrages. Elle conduit à un gonflement des déchets bitumés. Le gonflement se développe d'abord dans les vides disponibles. Des essais et simulations de ce gonflement ont été réalisés (36). En considérant une pression de gonflement des déchets bitumées par reprise d'eau majorante (pression théorique maximale à la paroi), de ces évaluations, et des études de sensibilités conduites dans ce cadre, il en est déduit que la pression de gonflement osmotique n'induira pas d'endommagement supplémentaire significatif autour de l'alvéole par rapport à l'endommagement créé au creusement. L'évolution générale du champ proche restera assez similaire à celle des alvéoles sans déchets bitumés (25, 36).

À long terme, l'évolution mécanique des alvéoles de déchets bitumées rejoint la tendance générale d'évolution mécanique des alvéoles de déchets MA-VL, il est donc fait le choix de ne pas représenter explicitement l'effet du gonflement des bitumes dans la ZFC, les propriétés retenues en termes d'extension de la ZFC (prise en compte du foisonnement, cf. Chapitre 2.2.2.1 du présent volume) permettant de couvrir cet effet.

LE GONFLEMENT DES DECHETS BITUMÉS

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**
  L'influence du gonflement des déchets bitumés est couverte par la représentation conservative de l'endommagement mécanique (ZFC-0 et ZFC-f) au droit des alvéoles MA-VL (cf. Chapitre 2.2.2.1 du présent volume).

2.8.4 Le dispositif d'obturation des alvéoles MA-VL

À la fermeture du stockage, la cellule de manutention de l'alvéole MA-VL est comblée à l'aide d'un remblai semblable à celui mis en place dans les réseaux de galeries.

L'entrée et le fond de l'alvéole sont destinés à accueillir un ouvrage de fermeture. Il est considéré que les galeries de retour d'air et le reste de la tête d'alvéole MA-VL sont fermées à l'aide de remblais.

L'analyse des risques et incertitudes associée est donc la même que celle effectuée pour les galeries remblayées dans l'unité argileuse (UA) (cf. Chapitre 2.5 du présent volume).

2.9 Les formations encaissantes

Les formations encaissantes n'ont pas de fonction de sûreté. Elles sont néanmoins une voie de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques sortant du toit et du mur de la couche du Callovo-Oxfordien vers les exutoires et, à ce titre, elles sont représentées dans le cadre des évaluations quantitatives des scénarios de sûreté après fermeture.

Du fait de leur rôle sur le gradient de charge hydraulique dans la couche du Callovo-Oxfordien, l'analyse intègre également cette caractéristique. En effet, dans la couche du Callovo-Oxfordien, l'eau peut s'y déplacer verticalement par drainance selon le sens du gradient imposé par la différence de charge hydraulique entre les formations encaissantes sus et sous-jacentes (25, 33).

L'analyse des risques et incertitudes résiduelles présentée dans ce chapitre s'appuie sur le socle de connaissances scientifiques et technologiques présenté respectivement aux chapitres 1.5 et 1.7 du volume 4 du présent rapport.

2.9.1 La représentation des formations encaissantes

Les acquis de caractérisation menés depuis de nombreuses années permettent de représenter les différents niveaux des formations encaissantes à la couche du Callovo-Oxfordien avec des caractéristiques qui se fondent sur les meilleures connaissances disponibles. Cette représentation distingue les niveaux calcaires (où se trouvent des horizons poreux) et les niveaux marneux pour lesquels des propriétés de diffusion et de rétention des radionucléides et des substances toxiques chimiques peuvent être considérés.

Les incertitudes sur la variabilité latérale des niveaux C3a, C3b au toit de la couche du Callovo-Oxfordien sur la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) conduisent à ne pas prendre en compte le transfert dans ces formations en SEN. Elles sont néanmoins intégrées dans les modélisations hydrogéologiques.

Une incertitude résiduelle concerne la position des limites des intervalles marneux de la série grise en lien avec sa représentation et son influence sur le modèle hydrogéologique à l'actuel et sur le million d'années considéré dans les évaluations de sûreté après-fermeture (25). Cette incertitude sur l'épaisseur de la formation de la Série grise n'est pas de nature à influencer les indicateurs de sûreté en après-fermeture au regard de :

- la faible épaisseur des séries (quelques mètres) par rapport aux autres formations encaissantes (de l'ordre de plusieurs centaines de mètres) ce qui conduit à une très faible contribution de la formation des séries grises au transfert par diffusion des solutés vers l'exutoire par pompage du Barrois ;
- l'exutoire de l'Oxfordien calcaire « Rivière de l'Ornain », situé à environ 10 km au nord-nord-ouest de la ZIOS, constitue, dans le cas d'une évolution géodynamique conjuguant érosion et surrection enveloppes (en situation enveloppe du SEN ; cf. Chapitre 2.10 du présent volume) un drain hydraulique en captant une partie des trajectoires hydrauliques et n'est donc pas influencée par les séries grises, y compris en tenant compte de l'incertitude sur le positionnement et l'épaisseur de cette formation. En situation de référence, il n'est pas identifié d'exutoire dans l'Oxfordien et donc susceptible d'être influencé par les séries grises.

L'incertitude sur l'épaisseur de la formation de la série grise n'a donc pas d'influence sur la migration des solutés jusqu'aux exutoires considérés (cf. Chapitre 2.10 du présent volume), et ce, quelle que soit la situation considérée (référence et enveloppe).

REPRÉSENTATION DES FORMATIONS ENCAISSANTES

Les formations encaissantes n'ayant pas de fonctions de sûreté, les risques et incertitudes résiduelles sont gérées par des hypothèses dans le scénario d'évolution normale (SEN).

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Compte tenu :

  - ✓ des incertitudes résiduelles sur la variabilité latérale des niveaux marneux et de leurs propriétés hydro-dispersives, les propriétés intrinsèques des formations encaissantes sont définies sur la base des gammes de valeurs disponibles et du modèle hydrogéologique afin de maximiser les flux vers les exutoires considérés ;
  - ✓ des incertitudes résiduelles sur la variabilité latérale des formations C3a et C3b, le transfert dans ces formations n'est pas pris en compte en SEN. Elles sont néanmoins intégrées dans les modélisations hydrogéologiques.

  Pour valoriser les acquis de connaissance sur les niveaux marneux, les propriétés intrinsèques de diffusion et de sorption sont prises en compte en situation de référence du SEN.

2.9.2 La modélisation hydrogéologique du site

Le modèle hydrogéologique à l'actuel du site de Meuse/Haute-Marne et son évolution au cours du prochain million d'années intègre l'ensemble des connaissances et des données acquises, au cours des 25 dernières années, dans le cadre des campagnes de reconnaissance du milieu géologique, des études d'analyse des données disponibles et de caractérisations du système géologique multicouches, ainsi que des travaux de conceptualisation physique et numérique en lien avec l'évolution des codes de calcul.

Les formations encaissantes supérieures peuvent être soumises à l'érosion liée à l'évolution géodynamique interne du site et aux évolutions climatiques. Depuis 2005, des travaux de terrain ont permis de consolider et de préciser les processus d'érosion, en particulier entre les plateaux et les vallées. L'influence de ces évolutions (même limitées) sur les écoulements sur un million d'années a été évaluée au moyen de simulations intégrant les cycles d'évolutions climatiques potentielles (y compris en lien avec les effets anthropiques) et l'érosion de surface (incluant l'évolution géodynamique interne).

Deux modèles d'évolution géodynamique, combinant géodynamique interne et externe et selon une évolution climatique naturelle sont pris en compte dans la prédiction des comportements hydrogéologiques au cours du prochain million d'années (cf. Volume 7 du présent rapport et la note conceptuelle sur le modèle hydrogéologique à l'actuel et son évolution sur le prochain million d'années (33)) :

- un modèle géodynamique considéré comme le plus réaliste dit « phénoménologique », considérant des taux d'érosion et de surrection « *best-estimate* » ;
- un modèle géodynamique conservatif dit « maximaliste », considérant des taux maxima d'érosion par incision des vallées et de surrection, et en équilibre.

L'évolution perturbée du climat retardant au-delà des 500 000 ans l'occurrence du prochain maximum glaciaire et la capture de l'Ornain par la Meuse réduiront considérablement les profondeurs de l'érosion par incision des vallées. Par conséquent, la mise à l'affleurement de l'Oxfordien surviendrait au-delà du million d'années et l'évolution hydrogéologique future serait plus proche de celle induite par l'évolution géodynamique phénoménologique, donc du modèle d'écoulement à l'actuel.

Le modèle hydrogéologique du secteur à l'actuel et sur le prochain million d'années couplé aux modèles d'évolution géodynamique (phénoménologique ou maximaliste) a permis :

- de préciser l'évolution des champs de charge dans le Dogger et dans l'Oxfordien et celle du champ de gradient de charge hydraulique vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien (déterminé par les charges hydrauliques du Dogger et de l'Oxfordien Carbonaté) à l'actuel et sur le prochain million d'années, en particulier à l'échelle de la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) ;
- d'estimer, vis-à-vis de la position du centre de stockage Cigéo, les trajectoires hydrauliques induites par l'évolution des champs d'écoulement (direction et temps de transfert) ainsi que les exutoires hydrogéologiques « naturels ».

L'incertitude résiduelle sur l'évolution des champs de charge (25, 33) tient au positionnement de la ligne d'iso-gradient nul sur une largeur d'ordre kilométrique du fait des données sur l'évolution géodynamique. Selon la connaissance acquise, les deux modèles de surrection retenus encadrent le domaine des possibles justifiés par les études conduites ces dernières années. Ces éléments ont conduit à retenir ces deux modèles dans le scénario d'évolution normale, à savoir (i) le modèle hydrogéologique basé sur modèle géodynamique considéré comme le plus réaliste dit « phénoménologique » en situation de référence et (ii) le modèle hydrogéologique basé sur le modèle géodynamique conservatif dit « maximaliste » en situation enveloppe (cf. Tableau 2-40).

Vis-à-vis des trajectoires hydrauliques, quel que soit le scénario d'évolution géodynamique étudié les trajectoires sont globalement orientées vers le nord-ouest à la fois dans les formations aquifères de l'Oxfordien et de celles du Dogger.

Il persiste toutefois des incertitudes résiduelles sur les trajectoires des particules, en particulier dans l'Oxfordien Carbonaté. Ces incertitudes résiduelles sont gérées par le choix des exutoires de l'Oxfordien carbonaté et de leur localisation (cf. Chapitre 2.10 du présent volume). Concernant le Dogger, les

résultats montrent que l'hydrogéologie du secteur ne présente pas d'évolution significative sur le prochain million d'années par rapport à l'actuel, que ce soit en termes de directions ou de vitesses d'écoulement. Les incertitudes résiduelles sont moindres. Ces éléments sont intégrés dans le choix des exutoires du Dogger et de leur localisation.

Les voies de transfert dans l'aquifère de l'Oxfordien ont également été analysées en considérant leur sensibilité à la porosité cinématique prise en compte dans le transport convectif. Les études montrent que l'application d'un champ de porosité cinématique réduite d'un facteur de 2,5 par rapport à la porosité totale, induit une augmentation des vitesses moyennes d'écoulement associées aux panaches de particules émises dans l'Oxfordien à l'aplomb de la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS). Les incertitudes résiduelles sur la porosité cinématique et les vitesses des écoulements sont prises en compte en considérant le choix des exutoires et de leur localisation en situation enveloppe basée sur le modèle hydrogéologique maximaliste.

LES CHARGES HYDRAULIQUES

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  L'incertitude résiduelle sur l'évolution des champs de charge est prise en compte de manière à encadrer les évolutions possibles :

  ✓ en situation enveloppe : Modèle hydrogéologique à un million d'années basé sur le modèle géodynamique dit « maximaliste » :
  - la différence de charge hydraulique est prise maximale entre le mur et le toit de la couche du Callovo-Oxfordien selon le positionnement du stockage dans la couche (50 mètres de garde saine par rapport au toit ou au mur du Callovo-Oxfordien correspondant à des flux hydrauliques ascendants ou descendants estimés sur la base du modèle hydrogéologique avec évolution géodynamique maximaliste ;
  - les charges hydrauliques dans la couche du Callovo-Oxfordien sont représentées de manière uniforme et constante dans le temps, la ligne d'iso-gradient nul n'est pas représentée ;

  ✓ en situation de référence : Modèle hydrogéologique à un million d'années basé sur le modèle géodynamique dit phénoménologique :
  - la différence de charge hydraulique retenue prend en compte la géométrie réelle de la couche du Callovo-Oxfordien et le positionnement des différents ouvrages de stockage dans la ZIOS en regard de la ligne d'iso-gradient nul ;
  - les charges hydrauliques ainsi retenues sont représentées de manière constante dans le temps.

  Les incertitudes résiduelles relatives aux directions des trajectoires des particules et des vitesses d'écoulement/porosité cinématiques de l'Oxfordien Carbonaté sont prises en compte dans le choix des exutoires et de leur localisation de cette formation.

  De même les incertitudes résiduelles associées aux trajectoires des particules pour le Dogger sont prises en compte dans le choix des exutoires de cette formation.

2.9.3 Les ressources naturelles du sous-sol sur la ZIOS

Les études et analyses réalisées depuis plus de 25 ans et les connaissances disponibles dans l'est du Bassin parisien concluent qu'il n'existe pas de ressources naturelles exceptionnelles et particulières à l'aplomb ou sous la ZIOS et plus largement sur la zone de transposition (ZT) (25).

Concernant les ressources potentielles examinées à l'aplomb de la ZT :

- matériaux de carrières : leur exploitation sur la ZT reste limitée (deux carrières recensées) et se fait sur les premières dizaines de mètres de profondeur. Par ailleurs, il n'existe pas de ressource avérée ou ayant été exploitée dans le passé en matériaux alluvionnaires (sables, graviers, etc.) sur la ZT ;
- substances minérales : l'unique substance minérale avérée est le fer en surface (10-20 mètres de profondeur). Cependant, il n'existe plus de mines exploitées sur la ZT car cette ressource a été épuisée et n'est plus rentable.

Concernant les ressources potentielles examinées sous la ZT :

- il n'y a pas de ressources potentielles avérées en charbon, et la probabilité de ressources en hydrocarbure exploitables est nulle à quasi nulle ;
- l'analyse quantitative du potentiel géothermique du Trias sur la ZIOS (cf. Volume 4 du présent rapport et le « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (25)) montre qu'il ne présente pas de caractère exceptionnel et qu'il est similaire à ceux qui existent à l'échelle régionale et plus largement à l'échelle du Bassin parisien.

  Bien que très peu vraisemblable le risque d'exploitation géothermique du Trias est pris en compte en postulant un forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage (cf. Chapitre 2.11 du présent volume).

LES RESSOURCES NATURELLES DU SOUS-SOL SUR LA ZIOS

- **la gestion des risques externes par des scénarios d'intrusion humaine involontaire**

  Bien que très peu vraisemblable du fait de l'absence de caractère exceptionnel du potentiel géothermique du Trias sous la ZIOS, le risque d'exploitation géothermique du Trias est couvert par le scénario conventuel postulant un forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage (cf. Chapitre 2.12 du présent volume).

Tableau 2-40 Synthèse des risques et incertitudes liés aux formations encaissantes et modalités de gestion associées

Composant	Incertitudes résiduelles	Modalité de gestion par conception	Modalités de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité
Formations encaissantes supérieures	**Variabilité latérale des niveaux C3a, C3b**	/	En SEN : Le transfert dans les formations C3a et C3b n'est pas pris en compte. Aucune propriété de transport et de rétention. Prises en compte uniquement dans le modèle hydrogéologique
	Propriétés hydro-dispersives des niveaux marneux	/	En situation enveloppe du SEN : Pas de propriétés de transport et de rétention par sorption
Formations encaissantes supérieures et inférieures	**L'incertitude résiduelle sur l'évolution des champs de charge**	/	Par l'utilisation des deux modèles qui encadrent les évolutions possibles : • Situation de référence du SEN : modèle hydrogéologique basé sur modèle géodynamique « phénoménologique » ; • Situation enveloppe du SEN : modèle hydrogéologique basé sur le modèle géodynamique « maximaliste »
Oxfordien Carbonaté	**Porosité cinématique/vitesse d'écoulement**	/	En situation enveloppe du SEN : Choix des exutoires et de leur localisation basée sur le modèle hydrogéologique basé sur le modèle géodynamique « maximaliste »
	Direction des trajectoires des particules	/	Choix du(des) exutoire(s) de l'Oxfordien carbonaté et de leur localisation
Dogger	**Direction des trajectoires des particules**	/	Choix du(des) exutoire(s) du Dogger et de leur localisation
	Plateau piézométrique	/	Choix du(des) exutoire(s) du Dogger et de leur localisation
	Conceptualisation des formations transmissives	/	Choix du(des) exutoire(s) du Dogger et de leur localisation
Trias	**Risque lié au potentiel géothermique**	/	Forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage

2.10 Les exutoires

L'identification des exutoires naturels repose sur des modélisations hydrogéologiques intégrant les évolutions géodynamiques du site sur le million d'années. Ces modélisations consistent à déterminer et caractériser l'ensemble des exutoires naturels ou artificiels, c'est-à-dire le lieu où une eau potentiellement impactée par des radionucléides et des substances toxiques chimiques en solution pourrait venir au contact de la biosphère et être utilisée par l'homme. Le choix des exutoires présenté ci-après prend en compte les analyses conduites sur les formations encaissantes et présentées dans le chapitre 2.9 du présent volume.

2.10.1 Le choix des exutoires des transferts des radionucléides et substances toxiques chimiques vers les formations encaissantes inférieures

Il ressort des acquis de connaissance sur la base des deux modèles hydrogéologiques retenus et sur l'étude des trajectoires des panaches de solutés et sur la caractérisation approfondie du milieu géologique (cf. Volume 7 du présent rapport et note conceptuelle sur « Le modèle hydrogéologique à l'actuel et son évolution sur le prochain million d'années » (33)) que :

- les exutoires naturels du Dogger sont éloignés des ouvrages souterrains du système de stockage (une trentaine de kilomètres) ;
- au droit de la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS), l'aquifère du Dogger est peu productif et ses eaux présentent une salinité qui les rend non potables pour l'alimentation en eau des humains et des animaux (56) ce qui conduit à exclure le cas d'un pompage dans le Dogger au droit du stockage ;
- en lien avec les différentes incertitudes des modèles hydrogéologiques du Dogger (conceptualisation des formations transmissives, plateau piézométriques) et les acquis de connaissances, il est supposé qu'une partie des trajectoires hydrauliques puisse intercepter la zone de fracturation diffuse (ZFD) plus productive et de moindre salinité, plus propice pour localiser un exutoire artificiel par pompage permettant d'alimenter un groupe de référence hypothétique.

Ces différents éléments conduisent à retenir pour les deux situations du scénario d'évolution normale (référence et enveloppe), de manière identique au « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (2), un exutoire Dogger par forage et pompage dans la zone de fracturation diffuse.

De manière conservative, et comme pour le « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (2), la zone de prélèvement est localisée en amont immédiat de cette zone, en supposant qu'elle intercepte la totalité du panache, en considérant une dilution apportée par la capacité de dilution de cette zone.

2.10.2 Le choix des exutoires des transferts des radionucléides et substances toxiques chimiques vers les formations encaissantes supérieures

Il ressort des acquis de connaissances (33) :

- sur la base du modèle géodynamique phénoménologique associé à des paramètres de transfert « *best-estimate* » et des temps d'arrivée des radionucléides et substances toxiques chimiques *a minima* de plusieurs centaines de milliers d'années dans l'Oxfordien carbonaté :
  - ✓ une absence d'exutoire naturel de l'Oxfordien carbonaté à proximité de la zone d'implantation des ouvrages souterrains à l'actuel comme sur le long terme ;
  - ✓ des trajectoires convectives de solutés qui ne traversent pas la zone de fracturation diffuse et/ou les failles de la Marne sur le prochain million d'années ;
- sur la base du modèle géodynamique conservatif dit maximaliste, associé à des paramètres de transfert conservatifs dans la gamme de valeurs disponibles et des temps d'arrivée des solutés de l'ordre de la centaine de milliers d'années dans l'Oxfordien :
  - ✓ la potentialité d'un exutoire naturel de l'Oxfordien calcaire au niveau de la rivière Ornain pour une partie des trajectoires convectives des solutés qui atteindrait les zones d'affleurement de

l'Oxfordien. Il persiste néanmoins des incertitudes sur ce que pourront être les caractéristiques de cet exutoire dans le futur (débit de la rivière par exemple).

Sur la base de ces éléments, il est fait le choix de retenir un exutoire Oxfordien artificiel par pompage depuis un forage atteignant l'Oxfordien calcaire. Le choix de cet exutoire couvre les incertitudes suivantes :

- l'extension de la zone de fracturation diffuse de la Marne au nord ;
- la direction des trajectoires de l'Oxfordien ;
- l'atteinte sur le prochain million d'années des failles et de la vallée de la Marne ces dernières pouvant constituer une ressource en eau ;
- les caractéristiques de la rivière Ornain dans le futur, en particulier le débit de dilution.

Cet exutoire est positionné au niveau des failles de la Marne et de la zone de fracturation diffuse (et en amont hydraulique de la Marne) là où une ressource en eau pourrait être suffisante pour alimenter un groupe de référence hypothétique et en considérant de manière enveloppe que la totalité des trajectoires arriverait à cet exutoire.

Ces différents éléments conduisent aux choix d'exutoires suivants :

- pour la situation de référence du scénario d'évolution normale, l'exutoire Oxfordien sur le prochain million d'années n'est pas retenu, en lien avec la réalité hydrogéologique dite « phénoménologique » (pas d'apparition d'exutoire naturel du fait d'un Oxfordien qui reste sous couverture et des ressources en eau insuffisantes en local) et les dates d'arrivée tardives des solutés dans l'Oxfordien ;
- pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale :
  - ✓ un exutoire naturel de l'Oxfordien au niveau de la rivière Ornain est retenu, en considérant de manière conservative que la totalité des trajectoires arriverait à cet exutoire ;
  - ✓ un exutoire artificiel par pompage dans l'Oxfordien depuis un forage atteignant l'Oxfordien calcaire, est également retenu ce qui permet de couvrir les incertitudes résiduelles (cf. Tableau 2-40). Cet exutoire permet également d'explorer le cas d'un pompage dans l'Oxfordien avec une dilution nettement inférieure par rapport à l'exutoire naturel rivière ;
- comme dans le « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (2) et pour les deux situations (référence et enveloppe), un exutoire artificiel Barrois par pompage, positionné au droit du stockage dans la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) après un transfert diffusif ascendant des solutés qui atteindraient les formations encaissantes supérieures, est retenu ;

Ces choix s'appliquent à tous les scénarios d'évolution altérée, *What-if* et intrusion humaine involontaire impliquant un transfert par l'eau, évalués en se basant respectivement sur la situation de référence ou la situation enveloppe du scénario d'évolution normale.

2.10.3 La synthèse des exutoires retenus pour les évaluations

La figure 2-3 ci-dessous présente sur une coupe des différentes formations encaissantes les exutoires retenus pour chacune des deux situations étudiées (référence à gauche et enveloppe à droite).

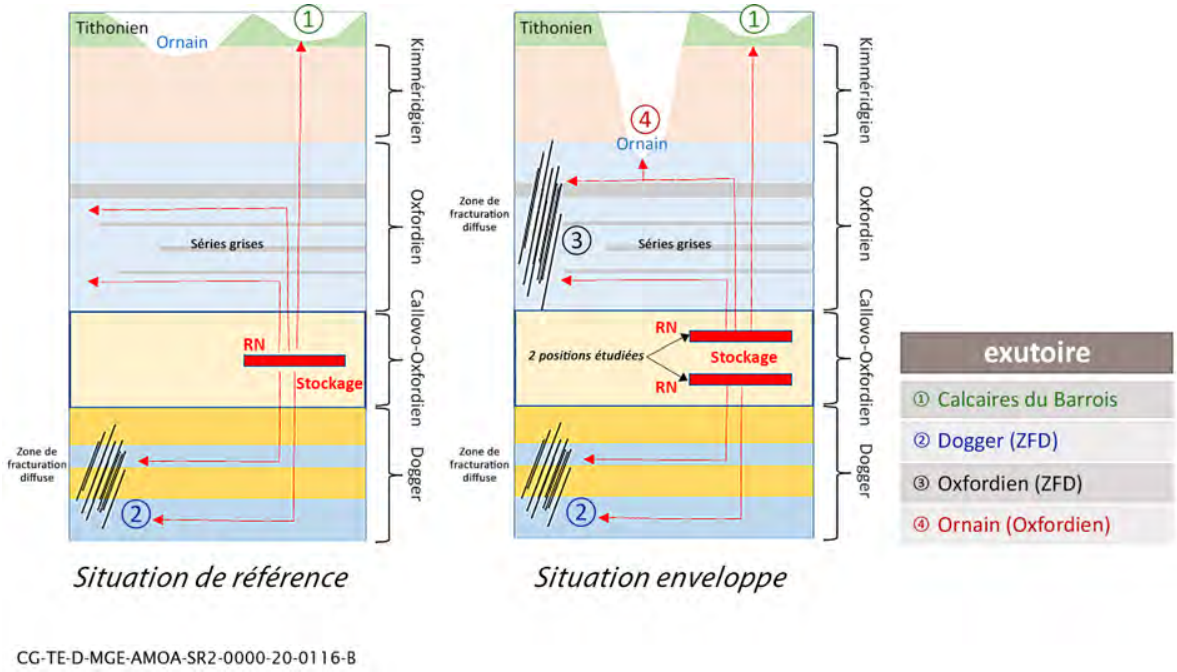


Figure 2-3 *Localisation des exutoires retenus pour la situation de référence et pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale*

Le tableau 2-41 suivant synthétise les exutoires retenus en vue des évaluations d'impact radiologique et toxicologique.

Tableau 2-41 *Choix des exutoires pour les évaluations d'impact radiologique et toxicologique*

Exutoire	Type d'exutoire	Positionnement	Application
Dogger[43]	Artificiel (pompage)	ZFD	Situation de référence Situation enveloppe
Barrois[44]	Artificiel (pompage)	Au droit du stockage dans la ZIOS	Situation de référence Situation enveloppe
Oxfordien	Artificiel (pompage)	ZFD	Situation enveloppe
Ornain	Naturel (rivière)	Rivière Ornain	Situation enveloppe

2.11 Les biosphères

Selon la démarche biosphère, l'approche conduit à retenir les biosphères correspondant à la gamme des situations climatiques plausibles sur le prochain million d'années sur le site du centre de stockage Cigéo en Meuse/Haute-Marne et de considérer ensuite ces différentes biosphères types de manière équiprobable et non séquentielle. Cette approche permet de gérer les incertitudes résiduelles sur les évolutions climatiques futures.

[43] Pour rappel, il s'agit de l'exutoire pompage dans le Dogger présenté dans le « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (2).
[44] Pour rappel, il s'agit de l'exutoire pompage dans le Barrois présenté dans le « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (2).

Ce chapitre n'intègre pas l'identification et le choix des groupes de référence hypothétiques en lien avec les activités humaines, ces éléments étant présentés dans le chapitre 4 du présent volume et détaillés dans la note « Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage » (57).

Pour mémoire, les évaluations d'impact radiologique et substance toxique chimique en après fermeture sont menées à partir de la fermeture définitive du centre de stockage et sur une durée de 1 million d'années.

Compte tenu des échelles de temps à considérer, les grands événements climatiques globaux et régionaux prévisibles sont à prendre en compte. La démarche retenue consiste à identifier les biosphères types représentatives des différents états que pourra prendre la biosphère compte tenu de ces événements (cf. Chapitre 1.5.2.2 du présent volume).

L'évolution du climat sur le prochain million d'années est abordée et traitée dans le volume 7 du présent rapport par la prise en compte de deux scénarios phénoménologiquement plausibles, obtenus dans le cadre du projet BIOCLIM (58), et visant à encadrer le domaine des évolutions climatiques possibles. Ces deux scénarios enveloppes sont :

- un scénario d'évolution naturelle du climat, qui a été établi en prenant en compte le taux actuel de CO_2 dans l'atmosphère. Il prévoit la poursuite dans le futur des cycles climatiques d'une durée de 100 000 ans de type glaciaire-interglaciaire. Selon ce scénario, il est prévu que le climat actuel en Meuse/Haute-Marne de type tempéré à tendance océanique perdure sur les prochains 50 000 ans avant de passer à un climat plus froid. En moyenne, comme ce fut le cas au cours du dernier million d'années, ce sont les situations de climats tempérés et de climats froids qui seront les plus fréquentes sur la durée du prochain million d'années ;
- un scénario d'évolution climatique fortement perturbée par les activités anthropiques qui a été établi en fonction d'une hypothèse maximaliste sur les rejets de CO_2 au cours des trois prochains siècles et sur le cycle du CO_2 atmosphérique. Ce scénario marque une rupture significative dans l'évolution du climat par rapport à ce qui s'est passé sur le dernier million d'année. Il prévoit en effet à court-moyen terme l'apparition de climats beaucoup plus chauds sur les prochains 500 000 ans avec l'installation en Meuse/Haute-Marne d'un climat subtropical dès les prochains siècles.

Sur la base de ces connaissances, et en cohérence avec la démarche, cela conduit à considérer :

- dans le cas d'une biosphère type toundra, la présence pour cet état climatique d'un pergélisol limite l'accessibilité à l'eau en profondeur. Par ailleurs, cet état climatique ne permet qu'une exploitation très limitée des ressources en surface (culture, élevage). Par conséquent, la prise en compte d'une biosphère froide sera traitée en considérant le cas d'une biosphère type boréale qui permet une plus grande utilisation de la ressource en eau par rapport à la biosphère toundra. Il n'est donc pas retenu de biosphère type toundra pour les évaluations de sûreté ; le cas d'une biosphère boréale étant majorant tout en permettant de traiter le cas d'une biosphère froide ;
- dans le cas de la biosphère chaude subtropicale humide à pluie d'hiver de type Cs, celle-ci n'existe que pendant les premiers 50 000 ans. Les évaluations du « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (2) pour le scénario d'évolution normale (SEN) montrent que sur cette période les radionucléides et substances toxiques chimiques n'auront pas encore atteint les formations encaissantes. La biosphère chaude de type Cr apparait quant à elle à plusieurs périodes et sur des temps assez longs entre 50 000 ans et 1 Ma. Elle apparait adaptée pour être représentative d'une biosphère chaude pour les évaluations après fermeture. Ainsi, le cas de la biosphère chaude sera traité en considérant une biosphère chaude de type subtropicale humide Cr.

Afin de tenir compte des incertitudes sur les évolutions climatiques sur le million d'années et par conséquent sur les biosphères à considérer, trois biosphères types sont retenues pour les évaluations radiologiques et toxicologiques en s'appuyant sur les simulations réalisées :

- une biosphère type tempérée ;
- une biosphère chaude type subtropicale humide de type Cr ;
- une biosphère froide type boréale.

Ces différentes biosphères sont traitées de manière équiprobable et non séquentielle pour tous les scénarios évalués.

Le choix des paramètres de transfert radio-écologiques repose sur la connaissance disponible ou des valeurs recommandées pour les conditions environnementales qui prévalent sur le site d'implantation du centre de stockage Cigéo. Elles sont présentées dans le document « Le comportement des radionucléides et des toxiques chimiques » (32).

Tableau 2-42 Synthèse des risques et incertitudes liés à la biosphère et modalités de gestion

Fonction de sûreté : sans objet			
Composant	**Incertitudes résiduelles et/ou risques externe**	**Modalité de gestion par conception**	**Modalité de gestion par un scénario ou une étude de sensibilité**
Biosphère	**Évolutions climatiques**	/	Choix des biosphères types
	Activités humaines	/	Choix des groupes de référence hypothétiques en lien avec le choix des exutoires (cf. Chapitre 4 du présent volume)
	Paramètres de transfert radio-écologiques dans la biosphère	/	Choix des paramètres de transferts radio écologiques

2.12 L'analyse spécifique des risques liés aux activités humaines après fermeture du stockage

En s'appuyant sur les recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) et les pratiques internationales, une analyse a été conduite afin de préciser les cas d'évaluation à mener en termes de scénarios d'intrusion humaine involontaire. Sans attribuer de vraisemblance à ce type de scénario, conformément à la démarche mise en œuvre par l'Andra (cf. Chapitre 1.3.2.4 du présent volume), l'analyse conduite a permis de préciser le nombre et la localisation des forages dans le centre de stockage Cigéo, les types d'impact potentiellement générés et les paramètres associés.

En effet, pour le centre de stockage Cigéo ne sont considérées que des situations d'intrusions humaines involontaires liées à des activités de forages profonds comme cela est préconisé dans le guide de sûreté de l'ASN.

Conformément à la démarche, la définition des situations d'intrusion humaine involontaire est fondée sur le fait que l'existence du stockage et son emplacement sont oubliés et que le niveau de technologie est le même qu'aujourd'hui.

En cohérence avec les recommandations du guide de sureté n° 1 de l'ASN (1) et la liste de scénarios proposée dans le cadre du « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2), les scénarios d'intrusion humaine involontaire par forage retenus sont :

- *un forage avec extraction de carottes* visant à évaluer une exposition externe du fait d'examen visuel des carottes (cf. Guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1)) :
  - ✓ il comporte plusieurs variantes, suivant que le forage intercepte le quartier pilote HA, le quartier de stockage HA ou le quartier de stockage MA-VL. Les impacts considérés correspondent aux expositions externes immédiates conformément au guide de sûreté de l'ASN (cf. Chapitre 10.1.1.2 du présent volume) ;
- *un forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle dans le Dogger* :
  - ✓ le scénario considère qu'un forage exploratoire du Dogger traverse le stockage puis est supposé abandonné à sa profondeur cible au Dogger. En combinaison avec un gradient hydraulique favorable aux écoulements descendants, les impacts éventuels sont évalués à l'exutoire « Dogger », situé dans la zone de fracturation diffuse (cf. Chapitre 10.3 du présent volume) ;
- *un forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage*[45]. Le scénario postule l'abandon à la cote du stockage d'un forage destiné à l'exploitation géothermique du Trias :
  - ✓ ce scénario se caractérise par un diamètre de foration plus important que pour un forage de reconnaissance ce qui génère une perturbation hydraulique du stockage plus forte et donc potentiellement un impact plus important. Cette configuration est représentée en considérant un abandon du forage avant l'atteinte de la profondeur cible afin de tenir compte des processus de transport advectif qui en résultent. En combinaison avec un gradient hydraulique favorable aux écoulements ascendants, les impacts éventuels sont également évalués à l'exutoire « Barrois » positionné au droit du stockage (cf. Chapitre 10.2 du présent volume). Comme précédemment, il est considéré que ce forage d'exploitation géothermique est en situation de relais hydraulique avec un forage d'exploitation du Barrois (Tithonien) ;
  - ✓ ce forage est retenu en cohérence avec les recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) ;
- *un forage interceptant un alvéole MA-VL pendant le transitoires hydraulique-gaz* :
  - ✓ ce scénario considère un forage exploratoire qui intercepte un alvéole de stockage MA-VL pendant le transitoire hydraulique gaz et impacte potentiellement le foreur du fait d'un rejet de gouttelettes d'eau potentiellement contaminées.

2.13 L'analyse spécifique de l'aléa sismique sur le système de stockage

En cohérence avec la démarche présentée au chapitre 1 du présent volume, le présent chapitre vise à présenter l'analyse du risque lié à l'occurrence d'un aléa sismique. Cette analyse s'appuie sur le « Dossier d'options de sûreté » (2, 21) et le retour de son instruction.

L'influence de l'aléa sismique a été examinée sur :

- les propriétés intrinsèques de la couche du Callovo-Oxfordien (en grand ou à proximité du stockage) en regard des fonctions auxquelles elle contribue ;

[45] Ce scénario est retenu en cohérence avec les recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1). Toutefois, il est à noter que les ressources avérées ou potentielles en géothermie sur la ZT n'ont aucun caractère exceptionnel (25). Elles sont banales et sont similaires à celles qui existent à l'échelle régionale et plus largement à l'échelle du Bassin parisien.

- l'hydrogéologie des formations encaissantes ;
- les ouvrages de fermeture et principalement les scellements pour lesquels la fonction d'opposition à la circulation de l'eau n'est pas limitée dans le temps.

Cette analyse s'appuie sur le socle de connaissance retranscrit principalement aux volumes 4 et 7 du présent rapport, le « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (25) et le « Tome III du référentiel de site – L'évolution naturelle sur le prochain million d'années » (59).

L'analyse de l'aléa sismique sur la couche du Callovo-Oxfordien distingue : (i) la partie de la couche qui fait l'objet d'une exigence spécifiée (50 mètres) et donc exempte de toute discontinuité et (ii) le Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages, incluant par exemple le volume de roche endommagé mécaniquement.

2.13.1 L'analyse de l'influence d'un aléa sismique sur la couche du Callovo-Oxfordien

Comme développé au volume 4 du présent rapport, dans le socle de connaissances du « Tome I du référentiel de site – L'histoire géologique et état actuel » (31) et dans le « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (25), le site de Meuse/Haute-Marne se situe dans une zone de très faible sismicité.

Pour mémoire, à ce stade des connaissances disponibles (31), la robustesse et le croisement de l'ensemble des études et techniques employées ou développées montrent qu'aucune structure d'importance, pouvant affecter la continuité et la géométrie des couches de la pile sédimentaire, et plus particulièrement du Callovo-Oxfordien, n'a été observée sur la zone de transposition (ZT). En effet :

- aucune structure profonde majeure à secondaire, susceptible de se propager vers la surface, n'a été identifiée au droit de la ZT, et plus particulièrement sous la ZIOS, jusqu'à des profondeurs de 5-6 km au vu de l'interprétation en 2008 et 2018 d'anciens profils pétroliers de sismique réflexion ;
- aucune structure (de rejet supérieur à 2-4 mètres) n'a été identifiée sur la ZIOS, aussi bien dans le Callovo Oxfordien que ses encaissants (Dogger, Oxfordien carbonaté et Kimméridgien) ainsi que plus largement sur l'ensemble de la pile sédimentaire mésozoïque, au vu des résultats de la sismique 3D haute résolution de 2009-2010 ;
- aucun des forages verticaux ou déviés réalisés sur la ZT, atteignant le Dogger, n'ont recoupé de structure (majeure à sub-sismique). De même, la reconnaissance géologique réalisée systématiquement sur les quelque 2 km de galeries du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne réalisés à ce jour, soit une surface d'environ 10 ha, n'a pas montré de structure, en corrélation avec les données de la sismique 3D réalisée au niveau du Laboratoire de recherche souterrain.

Sur la base de ces acquis, l'analyse de la couche du Callovo-Oxfordien présentée au chapitre 2.2 du présent volume a conduit à représenter en scénario d'évolution normale, la couche du Callovo-Oxfordien (hors zones endommagées par le creusement) comme un milieu homogène verticalement et horizontalement exempt de toute discontinuité.

2.13.1.1 L'effet d'un SMPP sur la couche du Callovo-Oxfordien en grand

L'aléa sismique retenu pour l'analyse des risques et des incertitudes est le spectre SMPP[46] de Poissons (59).

Selon le « Recueil des fiches bilans scientifiques et techniques » (25), au vu du contexte géologique et structural de toutes les autres couches sédimentaires constituant le sous-sol de la ZIOS (continuité, homogénéité et compacité des formations géologiques, absence de faille majeure à secondaire sur la ZT et la ZIOS jusqu'à des profondeurs de 5-6 km), il est acquis au vu des connaissances que le passage des

[46] Le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) ne recommande pas de considérer le SMPP en situation de référence (*i.e.* Évolution normale). En retenant le SMPP, l'analyse est considérée comme « enveloppe ».

ondes sismiques générées lors d'un séisme sur l'une des failles principales avoisinantes (Poissons, Gondrecourt, Vittel, Marne…) n'aura aucun impact, que ce soit sur la porosité ou en matière de fracturation.

Ces acquis s'appliquent notamment au Callovo-Oxfordien, comme le démontre l'absence de fracturation observée à l'échelle du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et dans l'ensemble des forages, malgré les séismes de fortes magnitudes qui ont traversé le Callovo-Oxfordien depuis sa mise en place au Jurassique, et notamment ceux qui ont pu se produire sur les failles proches, lors des phases compressives alpine et distensive oligocène par exemple.

Un séisme de type SMPP basé sur l'une des failles principales avoisinantes (Poissons, Gondrecourt, Vittel, Marnes…) n'a donc aucun impact sur les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien et sa représentation dans les scénarios de sûreté.

INFLUENCE DU SÉISME SUR LES PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES DU CALLOVO-OXFORDIEN

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  En s'appuyant sur le socle de connaissance (25, 59), il est acquis qu'un séisme de type SMPP basé sur l'une des failles principales avoisinantes (Poissons, Gondrecourt, Vittel, Marnes…) n'a aucun impact sur les propriétés du Callovo-Oxfordien.

  Cela conduit à ne pas modifier la représentation et les propriétés intrinsèques du Callovo-Oxfordien en grand (homogénéité, propriétés hydro-dispersives et de rétention) en cas de séisme (dont le séisme SMPP) en scénario d'évolution normale.

2.13.1.2 L'analyse de l'influence de la présence du stockage en cas d'aléa sismique sur la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche

Ce chapitre vise à identifier l'influence sur le Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains notamment au regard de la fonction « préserver les propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien », de la présence du stockage en cas d'aléa sismique.

Cette analyse s'effectue principalement au regard de l'aspect « vibratoire » du séisme de Poissons (Ms = 6,5 ; niveau SMPP) calculé sur le site de la descenderie, dont le caractère enveloppe pour la phase après fermeture par rapport aux spectres des séismes physiquement plausibles à l'aplomb de la ZIRA et dont le foyer se situerait à moins de 10 km de profondeur est démontré dans le recueil des fiches bilan (cf. Fiche bilan « Le milieu géologique et le stockage face au séisme en après fermeture » (25)).

Afin d'évaluer l'impact de la présence du stockage sur le Callovo-Oxfordien en champ proche en cas de séisme, la réponse au mouvement sismique du stockage a été étudiée par simulations (35) au regard de ses singularités considérées comme non remblayés/scellés de manière conservative. De manière générale, après-fermeture, les ouvrages souterrains sont solidaires de la roche et sont remblayés (et scellés) limitant ainsi le taux de vide résiduel. Ils ne peuvent donc pas osciller librement. Les ouvrages étudiés concernent :

- le puits d'accès MMT (zone puits) qui constitue un ouvrage de grande dimension (cf. Volume 5 du présent rapport). Les pics d'énergie générés par les séismes se situent dans les basses fréquences, ce qui conduit à étudier l'ouvrage ayant les dimensions caractéristiques les plus grandes ;
- une intersection entre le puits MMT et deux galeries (orientées selon σH et σh). Il s'agit de l'ouvrage présentant une plus grande complexité géométrique ;
- une rangée d'alvéoles MA-VL. Ces ouvrages (quasiment horizontaux) très élancés se prêtent bien à une analyse en déformations planes puisque ces alvéoles sont parallèles au mouvement du séisme (ondes planes à incidence verticale) et présentent des taux de vide supérieurs aux galeries remblayées.

L'analyse de la réponse sismique des ouvrages souterrains à une sollicitation conventionnelle, hautement improbable et extrêmement pénalisante (type séisme de Poissons) met en évidence sur toute la gamme

de fréquences considérées une réponse en contraintes dynamique des ouvrages et du Callovo-Oxfordien qui n'est pas de nature à remettre en cause le comportement en grand du système de stockage préservant ainsi les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages (35).

À ce titre, l'influence de la présence du stockage en cas de SMPP sur la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche (zone endommagée mécaniquement) est considérée comme négligeable et ne conduit pas à une modification des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien en champ proche. Le SMPP étant considéré comme le séisme maximum possible dans la ZIOS, il n'est pas envisagé de dégradation des performances du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages en cas de séisme (31).

INFLUENCE DE LA PRÉSENCE DU STOCKAGE SUR LES PROPRIÉTÉS FAVORABLES DE LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**
  À ce stade des connaissances disponibles et des études menées, l'influence de la présence du stockage en cas de séisme SMPP sur la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche est considéré comme négligeable et ne conduit pas à remettre en cause les propriétés favorables (homogénéité, propriétés hydro-dispersives et de rétention) du Callovo-Oxfordien en champ proche retenues en SEN.

2.13.1.3 L'effet d'un séisme sur une discontinuité non-détectée postulée dans la ZIOS sur le prochain million d'années

Pour évaluer de manière plus poussée la robustesse du système de stockage, les études ont conduit à s'interroger sur l'influence de l'occurrence d'un séisme sur une faille qui n'aurait pas été détectée dans la pile sédimentaire et susceptible d'engendrer une rupture de surface (faille capable) (25).

Ces études sont conduites sur la base d'une évaluation probabiliste (méthode PFDHA). Il ressort de ces études probabilistes que, pour une période de retour de 200 Ma, une rupture d'une faille primaire dans la ZIOS dont le foyer serait à une profondeur entre 2 et 4 km, conduit à un rejet vertical d'environ 15 cm en surface et de 20 cm en profondeur associée à une ouverture de la faille d'environ 1 cm.

Ces études PDFHA montrent que les dimensions d'une telle faille (ouverture, déplacement…) en cas d'aléa sismique sont minimes et dans tous les cas inférieurs à celles considérées dans le cadre du scénario *What-if* « Discontinuité non détectée traversant la couche du Callovo-Oxfordien » (cf. Chapitre 9.3 du présent volume).

L'EFFET D'UN SÉISME SUR UNE FAILLE NON DÉTECTÉE POSTULÉE DANS LA ZIOS SUR LE PROCHAIN MILLION D'ANNÉES

Au titre de l'analyse de la robustesse du système de stockage, l'influence de l'occurrence d'un séisme sur une faille qui n'aurait pas été détectée dans la ZIOS a été étudiée. L'étude montre que l'effet d'un séisme sur une faille non détectée postulée conduit à un rejet vertical d'environ 15 cm en surface et 20 cm en profondeur associée à une ouverture de la faille d'environ 1 cm.

Les caractéristiques de cette faille sont inférieures aux caractéristiques d'une discontinuité non détectée postulée et représentée de manière conventionnelle dans le scénario *What-if* « Discontinuité non détectée » (cf. Chapitre 2.2.1 et chapitre 9.3 du présent volume).

2.13.2 L'analyse de l'influence de l'aléa sismique sur l'hydrogéologie des formations encaissantes

2.13.2.1 L'influence d'un SMPP sur les formations encaissantes

Ce chapitre vise à étudier l'influence d'un SMPP sur les formations encaissantes vis-à-vis de leurs caractéristiques naturelles en termes de retard et de dispersion des radionucléides et substances toxiques chimiques.

Les connaissances acquises à l'échelle de la pile sédimentaire (25), montrent qu'au vu du contexte géologique et structural de toutes les autres couches sédimentaires constituant le sous-sol de la ZIRA (continuité, homogénéité et compacité des formations géologiques, absence de faille majeure à secondaire sur la ZT et la ZIRA jusqu'à des profondeurs de 5-6 km), il est de fait considéré que le passage des ondes sismiques générées lors d'un séisme sur l'une des failles principales avoisinantes (Poissons, Gondrecourt, Vittel, Marne…) n'aura aucun impact, que ce soit sur la porosité ou en matière de fracturation de la couche du Callovo-Oxfordien en grand.

INFLUENCE D'UN SMPP SUR LES FORMATIONS ENCAISSANTES

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Il est acquis qu'un séisme de type SMPP basé sur l'une des failles principales avoisinantes (Poissons, Gondrecourt, Vittel, Marnes…) n'a aucun impact sur les propriétés naturelles des formations encaissantes.

  Cela conduit à ne pas modifier la représentation des formations encaissantes en scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 2.9 du présent volume).

2.13.2.2 L'influence d'une fracturation postulée liée à l'effet d'un séisme sur le régime hydraulique dans les formations encaissantes

Comme indiqué au chapitre 2.9.2 du présent volume, l'évolution du régime hydraulique dans les encaissants de la couche du Callovo-Oxfordien (Oxfordien et Dogger) est simulée, sur la base du modèle hydrogéologique à l'actuel calibré, au cours du prochain million d'années suivant deux scénarios :

- un scénario phénoménologique qui tient compte de la meilleure connaissance des processus de surrection tectonique et d'érosion des cours d'eau et plateaux ;
- un scénario maximaliste (enveloppe) qui suppose une vitesse de surrection tectonique extrême à l'équilibre avec les processus d'érosion des terrains. Ce scénario maximaliste conduit à une modification, au cours du prochain million d'années, des vitesses d'écoulements, des trajectoires et des exutoires naturels des encaissants aquifères du Callovo-Oxfordien.

Ces scénarios géo-prospectifs n'intègrent pas de failles dans les encaissants au droit de la ZIOS, elles ne sont donc pas retranscrites dans le modèle hydrogéologique par une modification des propriétés hydrauliques locales de la roche. Cependant, la connaissance accumulée depuis une vingtaine d'années sur les écoulements dans les encaissants du Callovo-Oxfordien et les travaux de modélisation hydrogéologique associés permettent d'apporter des éléments de réponse sur l'impact de l'activation hydraulique d'une faille non détectée postulée dans les encaissants :

- les analyses de sensibilité liées à l'activation du rôle hydraulique des failles régionales, des failles du secteur et de la zone de fracturation diffuse du modèle hydrogéologique à l'actuel (33) ont montré des impacts hydrauliques localisés uniquement à proximité immédiate des structures. Une fracturation des encaissants (Oxfordien et Dogger) pourrait ainsi conduire à une modification locale des écoulements horizontaux, sans toutefois modifier le temps de transfert en grand des solutés issus du Callovo-Oxfordien ;
- l'encaissant Oxfordien n'est pas un aquifère captif et les charges hydrauliques, plus faibles par rapport à celles des formations sus-jacentes, ne sont pas de nature à permettre des flux verticaux ascendants. De plus, cet aquifère est surplombé par une épaisse couche de formations marneuses d'âge Kimméridgien qui seraient probablement cimentée ou colmatée à la suite de l'ouverture d'une faille non détectée. L'ensemble de ces éléments tendent à montrer que les transferts convectifs verticaux vers les formations des calcaires du Barrois seraient fortement limités dans le cas de l'activation hydraulique d'une faille non détectée dans les formations sus-jacentes au Callovo-Oxfordien.

Enfin, les simulations de l'évolution des écoulements sur le prochain million d'années avec le scénario maximaliste présentent l'apparition de zones d'affleurements de l'Oxfordien dans la vallée de l'Ornain au nord de la ZIOS dès 450 ka, qui constituent un exutoire naturel des eaux souterraines bien plus pénalisant que ne le serait une discontinuité d'ouverture centimétrique dans l'Oxfordien.

L'ensemble des connaissances acquises permettent de conclure qu'une faille non détectée des formations encaissantes en lien avec un séisme n'a aucun impact sur les propriétés naturelles, le régime hydraulique et la représentation des formations encaissantes en grand dans les scénarios de sûreté.

L'INFLUENCE D'UNE FRACTURATION POSTULÉE LIÉE À L'EFFET D'UN SÉISME SUR LE RÉGIME HYDRAULIQUE DANS LES FORMATIONS ENCAISSANTES

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Ces études permettent de conclure qu'une faille non détectée postulée des formations encaissantes en lien avec un séisme n'a aucun impact sur les propriétés naturelles de ces formations, et le régime hydraulique et en conséquence sur leur représentation dans le scénario d'évolution normale.

2.13.3 L'analyse de l'influence de l'aléa sismique sur les scellements

La fonction « *s'opposer à la circulation de l'eau* » des scellements n'est pas limitée dans le temps. Ceci a pour conséquence que les scellements devront respecter l'exigence de tenue au séisme. En après fermeture, cette exigence est associée au spectre enveloppe du SMPP (séisme maximum physiquement possible).

La réponse mécanique des ouvrages de fermeture aux sollicitations dynamiques dépend des différences de rigidité entre les différents composants du scellement et les argilites. Au regard des connaissances disponibles et des dispositions de conception (41) :

- à l'échelle du stockage en grand, des travaux montrent que l'architecture souterraine en grand en « râteau » n'est pas de nature à générer des phénomènes de réflexion, d'amplification ou de résonance interne sous l'effet d'une onde sismique (cf. Chapitre 2.13.1.2 du présent volume) ;

- à l'échelle des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo, les ouvrages en profondeur remblayés ou scellés sont « solidaires » de la roche et ne peuvent pas osciller librement ; ils ont donc une faible capacité de résonance. L'absence de surface libre et l'utilisation de matériaux (argile, béton) présentant des densités proches ou similaire au milieu géologique hôte n'est pas de nature à générer des contrastes importants des vitesses d'onde sismique.

De plus, de manière plus spécifique aux scellements, ces derniers mettent en jeu deux grands types de matériaux : les matériaux argileux gonflants pour la réalisation du noyau gonflant et le béton pour constituer, le cas échéant, les massifs d'appui.

Concernant l'influence d'un SMPP sur les matériaux constitutifs des scellements, il est considéré que :

- le sur-endommagement possible du revêtement non déposé au niveau des scellements des galeries sous sollicitation sismique n'a pas d'effet sur le noyau dans la mesure où le volume intérieur du noyau reste sensiblement constant et n'affecte donc pas la pression de gonflement ;
- les matériaux ne sont pas liquéfiables et ne génèrent pas de vide sous sollicitation sismique ;
- le massif d'appui est un ouvrage présentant une rigidité significative et qui se déplace avec le massif rocheux sans amplification, les efforts sismiques sont donc négligeables par rapports aux efforts en relation avec la résistance du massif d'appui conçu pour résister à la poussée de la bentonite.

Ainsi, les éventuelles sollicitations sismiques sur les scellements sont considérées comme négligeables (41), quel que soit le niveau de l'aléa sismique considéré, y compris de type SMPP et ne conduisent pas à une modification des propriétés hydrauliques des scellements. Il n'est donc pas envisagé de dégradation des performances hydrauliques des scellements en cas de séisme.

INFLUENCE DE L'ALÉA SISMIQUE SUR LES SCELLEMENTS

- **la gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)**

  Au regard des connaissances acquises sur la sismicité du site et des analyses de robustesse des scellements (41), les éventuelles sollicitations mécaniques additionnelles des scellements incluant ou non des massifs d'appui sont négligeables quel que soit le niveau de l'aléa sismique. Il n'est donc pas considéré de dégradation des propriétés hydrauliques des scellements en lien avec un séisme en SEN.

3

La synthèse de l'analyse des risques et incertitudes et scénarios retenus pour les évaluations

3.1 La synthèse de la gestion des risques et incertitudes résiduelles de connaissances scientifiques et technologiques 184

3.2 La liste des scénarios et situations retenus et définis pour les évaluations quantitatives 206

Conformément à la démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture exposée au chapitre 1 du présent volume, l'analyse des risques et incertitudes exposée au chapitre 2 du présent volume conduit à identifier ceux et celles :

- qui sont pris(es) en compte lors de la définition de solutions techniques de conception par des mesures d'évitement et de réduction de ces risques et incertitudes ;
- qui entreraient dans la définition du scénario d'évolution normale et des situations associées ;
- qui seraient susceptibles d'entraîner la non satisfaction des fonctions de sûreté et conduisent à l'identification de scénarios d'évolution altérée, *What-if* ou d'intrusion humaine involontaire.

Les chapitres suivants présentent la synthèse de l'analyse des risques et incertitudes et la liste des scénarios retenus pour les évaluations quantitatives et le cas échéant les études de sensibilité associées.

3.1 La synthèse de la gestion des risques et incertitudes résiduelles de connaissances scientifiques et technologiques

3.1.1 La gestion des risques et incertitudes résiduelles par conception

La gestion des risques et incertitudes résiduelles par des dispositions de conception issue de l'analyse des risques et incertitudes présentées au chapitre 2 du présent volume est essentiellement associée :

- à certains processus d'origine interne susceptibles de perturber les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien. Des dispositions de conception ont été prises pour maîtriser ces processus qui peuvent être d'ordre mécanique, thermique, hydraulique, gaz, chimique, ou radiologique.

  Les dispositions de conception prises visent à s'affranchir de ces risques et incertitudes ou le cas échéant en limiter l'effet. Ce sont notamment :
  - ✓ le dimensionnement THM des quartiers de stockage ;
  - ✓ la maîtrise de l'hydraulique par des dispositions d'architecture qui limitent le transport convectif dans les ouvrages ;
  - ✓ la maîtrise du risque gaz par des scellements passants au gaz ;
  - ✓ le co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL pour limiter l'influence de certaines substances issues de la dégradation des déchets sur la migration des radionucléides ;
  - ✓ la maîtrise des matières fissiles pour rester sous-critique sur le long terme.

  Ces dispositifs de conception, sont justifiés et décrits dans les dossiers de justification des choix d'architecture (35), de la définition des ouvrages de fermetures (41) de la conception des alvéoles HA (47) et de la conception des alvéoles MA-VL (37). Une fois les dispositions de conception prises, l'analyse ne concerne que les seules incertitudes résiduelles qui persistent, elles sont prises en compte dans le scénario d'évolution normale, en particulier en situation enveloppe. Elles sont listées dans les tableaux de synthèse présentés en conclusion de l'analyse conduite pour chacun des composants dans le chapitre 2 du présent volume ;

- aux risques et incertitudes technologiques[47], incluant la réalisation des composants ouvragés contribuant à la réalisation des fonctions de sûreté.

  Des dispositifs de contrôle mis en place visent à s'affranchir de ces risques et incertitudes et de s'assurer de la bonne application des procédures.

  Bien que jugés très peu vraisemblables du fait de ces dispositifs de contrôle mis en place, certains risques ou incertitudes d'ordre technologiques ont été postulés au titre de l'évaluation de la robustesse du système de stockage. L'approche a conduit à postuler des dysfonctionnements de composants ouvragés conduisant à la définition de scénarios d'évolution altérée ou *What-if*. Ils concernent essentiellement les conteneurs de stockage HA et les scellements des ouvrages souterrains (puits, descenderies, galeries) et sont détaillés ci-après.

3.1.2 La gestion des risques et incertitudes par l'identification et la définition des scénarios

3.1.2.1 L'analyse de la couche du Callovo-Oxfordien

La couche du Callovo-Oxfordien, composant essentiel vis-à-vis de la sûreté sur le long terme après fermeture de par ses caractéristiques favorables, constitue la voie de transfert principale des radionucléides et substances toxiques chimiques.

Du fait du large panel de connaissances acquises depuis de nombreuses années, incluant les acquis du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, l'Andra dispose d'un ensemble de données d'entrée important et robuste à différentes échelles de la formation de la couche du Callovo-Oxfordien. Les quelques incertitudes résiduelles identifiées dans le socle de connaissance scientifiques et technique sont intégrées dans les choix faits pour la définition du scénario d'évolution normale, notamment dans la situation enveloppe.

Le corpus de connaissances acquises permet de disposer des gammes de valeurs représentatives de ces différents processus (extension, effet sur les caractéristiques de transport et rétention chimique). Ils ont ainsi pu être intégrés dans la définition du scénario d'évolution normale, notamment par les choix inhérents à la situation enveloppe.

Parmi les quelques incertitudes résiduelles de connaissance identifiées, certaines sont liées aux processus internes (thermique, mécanique, hydraulique, gaz, chimique) et leur couplage et/ou leur cumul qui se produisent essentiellement dans le Callovo-Oxfordien en champ proche sans affecter l'épaisseur de garde exigée. Cela renvoi aux dispositions de conception prises pour maîtriser et limiter les perturbations d'origine interne (cf. Chapitre 3.1.1 du présent volume).

Le corpus de connaissances acquises permet de représenter la couche du Callovo-Oxfordien comme un milieu homogène verticalement et horizontalement exempt de toute discontinuité détectable. La prise en compte d'une discontinuité verticale qui n'aurait pas été détectée et pouvant être hydrauliquement active, faisant l'objet d'un engagement suite à l'instruction du dossier d'option de sûreté, est postulée dans le cadre d'un scénario *What-if* défini de manière conventionnelle.

3.1.2.2 L'analyse des scellements (puits, descenderies, galeries)

Pour mémoire, les scellements font l'objet d'une exigence spécifiée en termes de conductivité hydraulique en grand du scellement. L'analyse s'est focalisée sur les risques et incertitudes susceptibles d'entraîner la non satisfaction de cette exigence et en conséquence de la non réalisation des fonctions de sûreté des scellements. L'analyse a ainsi conduit à identifier et construire des scénarios d'évolution altérée (SEA) et des scénarios *What-if* selon la vraisemblance du risque ou de l'incertitude analysée.

[47] Il est entendu par risques et incertitudes « technologiques », ceux et celles qui sont lié(e)s à une mauvaise application des procédures mises en œuvre pour construire l'installation de stockage, en particulier pour la réalisation et la mise en place des composants ouvragés contribuant à la réalisation de fonctions de sûreté, notamment les scellements et les conteneurs de stockage HA.

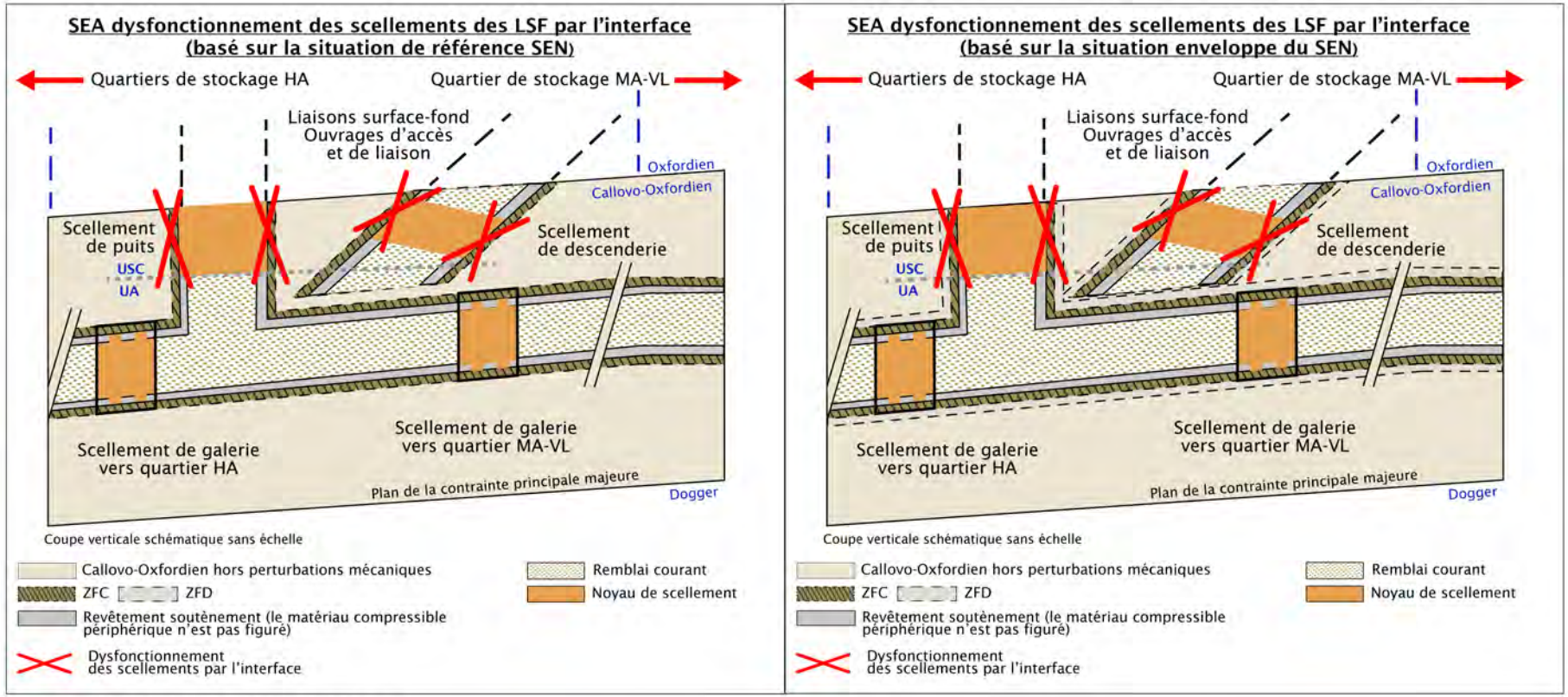
3.1.2.2.1 Les scénarios d'évolutions altérée de dysfonctionnement des scellements identifiés

Les scénarios de dysfonctionnement des scellements visent à évaluer comment l'architecture du stockage (notamment son caractère borgne) et le Callovo-Oxfordien apportent de la robustesse en cas de dysfonctionnement et de vérifier si la voie de migration des radionucléides et substances toxiques chimiques par la couche du Callovo-Oxfordien reste majoritaire par rapport à celle par les voies ouvrages du stockage.

L'analyse conduit à identifier les scénarios d'évolution altérée suivants :

- un SEA « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par l'interface » (les scellements des galeries étant opérants), cf. Figure 3-1.

  Ce scénario repose sur la considération peu vraisemblable de la présence éventuelle d'une zone de fracturation connectée au droit du noyau argileux des scellements de puits et descenderies réalisés dans la couche du Callovo-Oxfordien au niveau de l'unité silto carbonatée (USC) du fait des incertitudes résiduelles sur le comportement différé des argilites (cf. Chapitre 2 du présent volume). Le dysfonctionnement des scellements est représenté dans ce scénario d'évolution altérée par une dégradation hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien et en conséquence la non-réalisation de la performance exigée des scellements des liaisons surface-fond ;

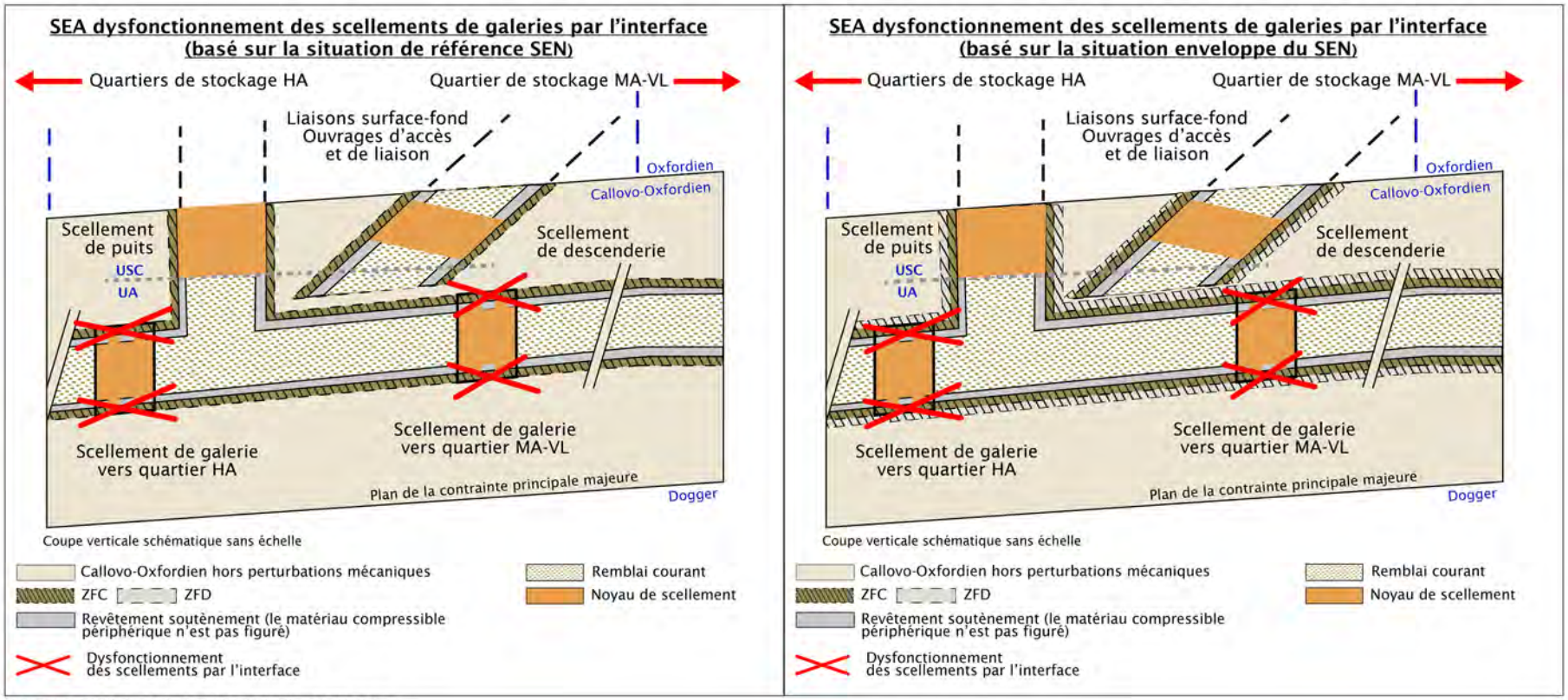


CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0003-B

Figure 3-1 *Schéma illustratif du SEA de « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par l'interface »*

- un SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface » (les scellements des liaisons surface-fond étant opérants), cf. Figure 3-2.

  Du fait d'incertitudes résiduelles de connaissance sur les processus d'autocolmatage (cf. Chapitre 2 du présent volume), ce scénario considère un auto-colmatage imparfait des argilites endommagées mécaniquement en champ proche dans l'unité argileuse de la couche du Callovo-Oxfordien ce qui provoquerait un défaut de performance hydraulique. Le dysfonctionnement des scellements des galeries est représenté dans ce scénario d'évolution altérée par une dégradation hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien et en conséquence la non-réalisation de la performance exigée des scellements de galerie ;



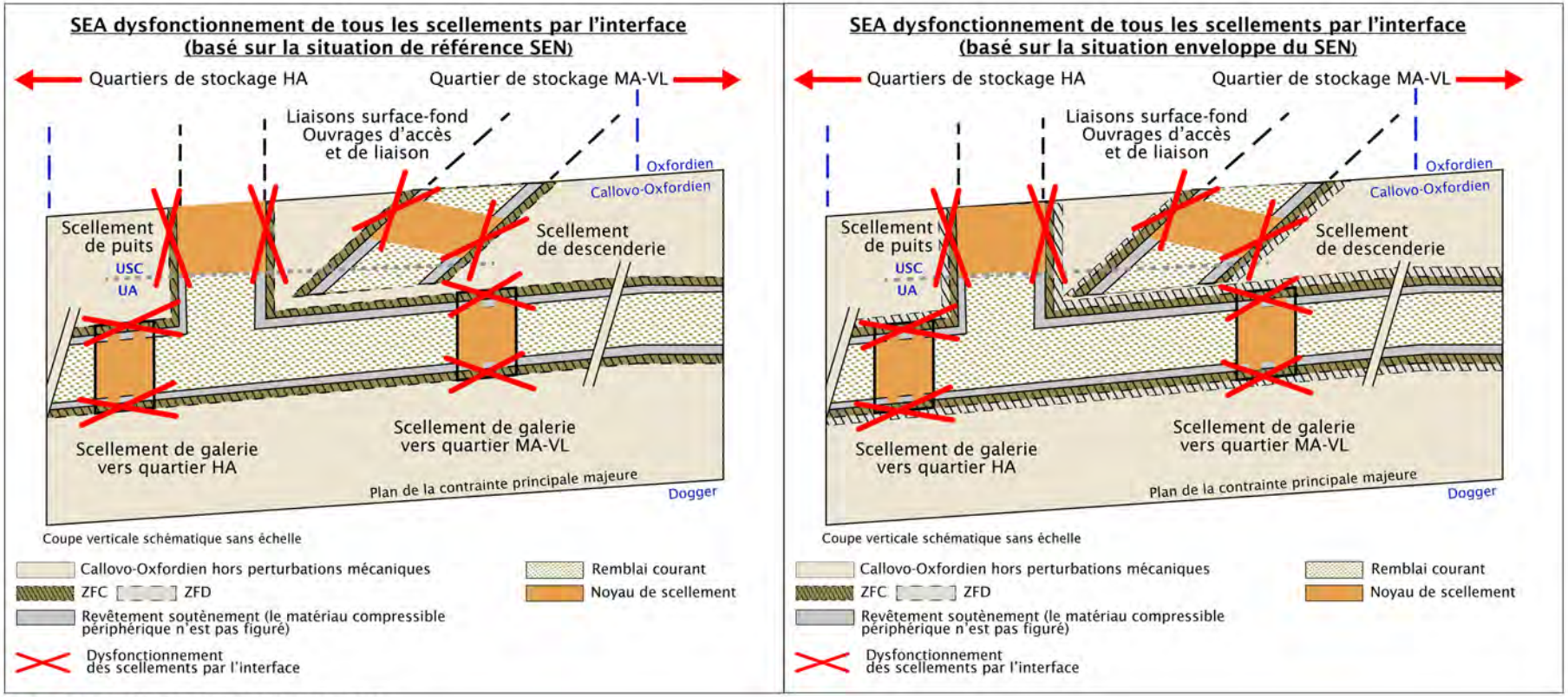
CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0004-B

Figure 3-2 Schéma illustratif du SEA de « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »

- un SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements (liaisons surface-fond et galeries) par l'interface », cf. Figure 3-3.

  Ce scénario est fondé sur une analyse globale menée sur l'ensemble des scellements (puits, descenderie et galeries) contribuant à la même fonction de sûreté « S'opposer à la circulation de l'eau », qui a conduit à identifier une cause commune de dysfonctionnement de ces ouvrages par l'interface entre le noyau et la couche du Callovo-Oxfordien.

  Le dysfonctionnement de l'ensemble des scellements est représenté dans ce scénario d'évolution altérée par une dégradation hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien continue depuis les alvéoles jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien. Elle entraîne en conséquence la non-réalisation de la performance exigée des scellements des liaisons surface fond (puits et descenderies) et des galeries ce qui conduit à la non-réalisation de la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau ».



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0005-B

Figure 3-3 Schéma illustratif du SEA de « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »

3.1.2.2.2 Les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements identifiés

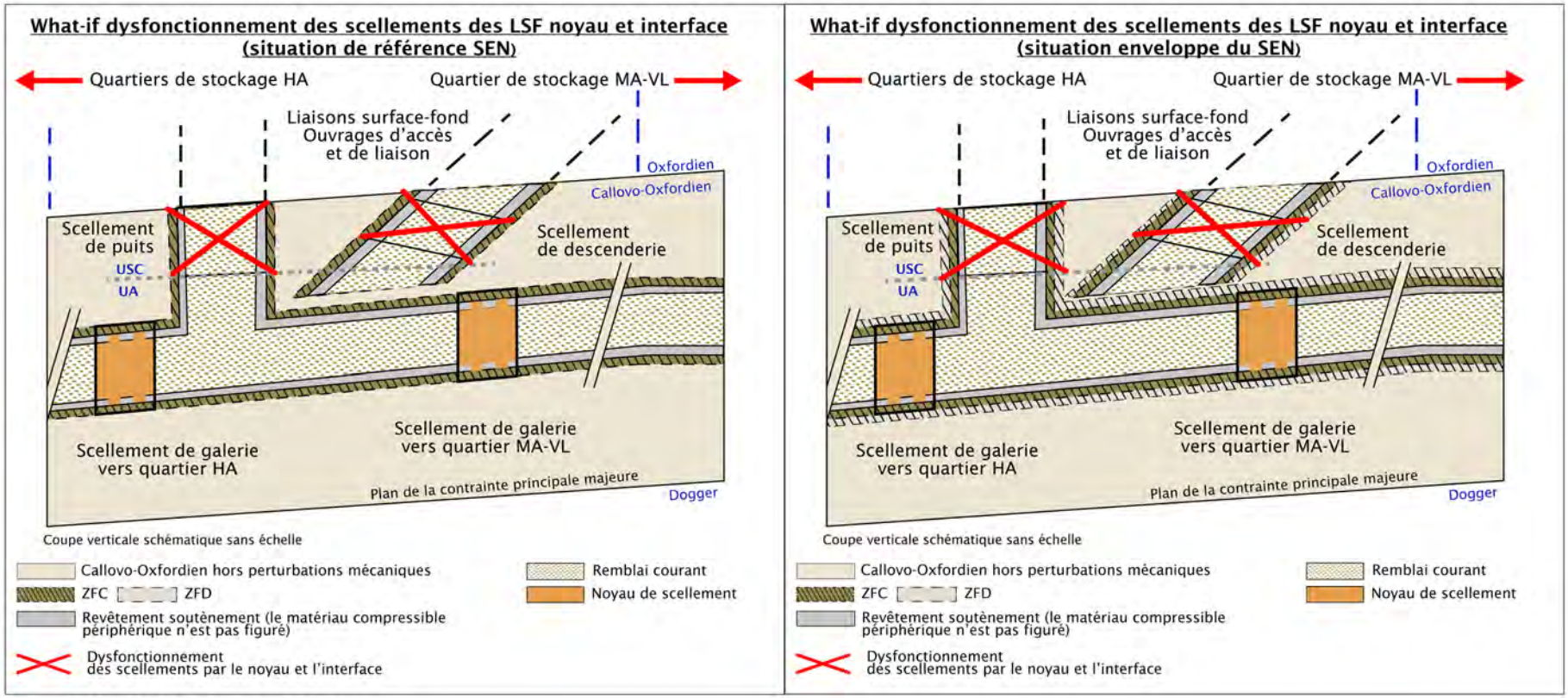
Au regard des connaissances scientifiques et technologiques acquises, l'analyse a conduit à postuler des scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements qui reposent sur des événements considérés comme très peu vraisemblables. Ces scénarios postulés visent à évaluer comment l'architecture du stockage (son caractère borgne) et le Callovo-Oxfordien apportent de la robustesse et de vérifier si la voie de migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques par la couche du Callovo-Oxfordien reste majoritaire par rapport à celle par le stockage.

Ces scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements sont :

- un scénario *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par le noyau argileux et par l'interface » (les scellements des galeries étant opérants), cf. Figure 3-4.

  Il est postulé dans ce scénario *What-if* que le noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond n'est pas réalisé de manière conforme aux exigences applicables au centre de stockage Cigéo. Cela conduit à représenter le noyau argileux des scellements avec des caractéristiques hydrauliques équivalentes à celle du remblai des galeries. De manière conservative il est également postulé un mauvais contact hydromécanique entre le noyau et l'interface représenté par une zone de fracturation connectée au droit du noyau argileux des scellements de puits et descenderies telle que représentée en scénario d'évolution altérée par une dégradation hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien.

  Cette représentation par cumul de dysfonctionnements des scellements des liaisons surface-fond par le noyau argileux et l'interface induit une forte dégradation de la performance hydraulique des scellements et donc la non-réalisation des performances exigées des scellements de liaison surface-fond ce qui conduit à la non-réalisation de la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau » ;



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0006-B

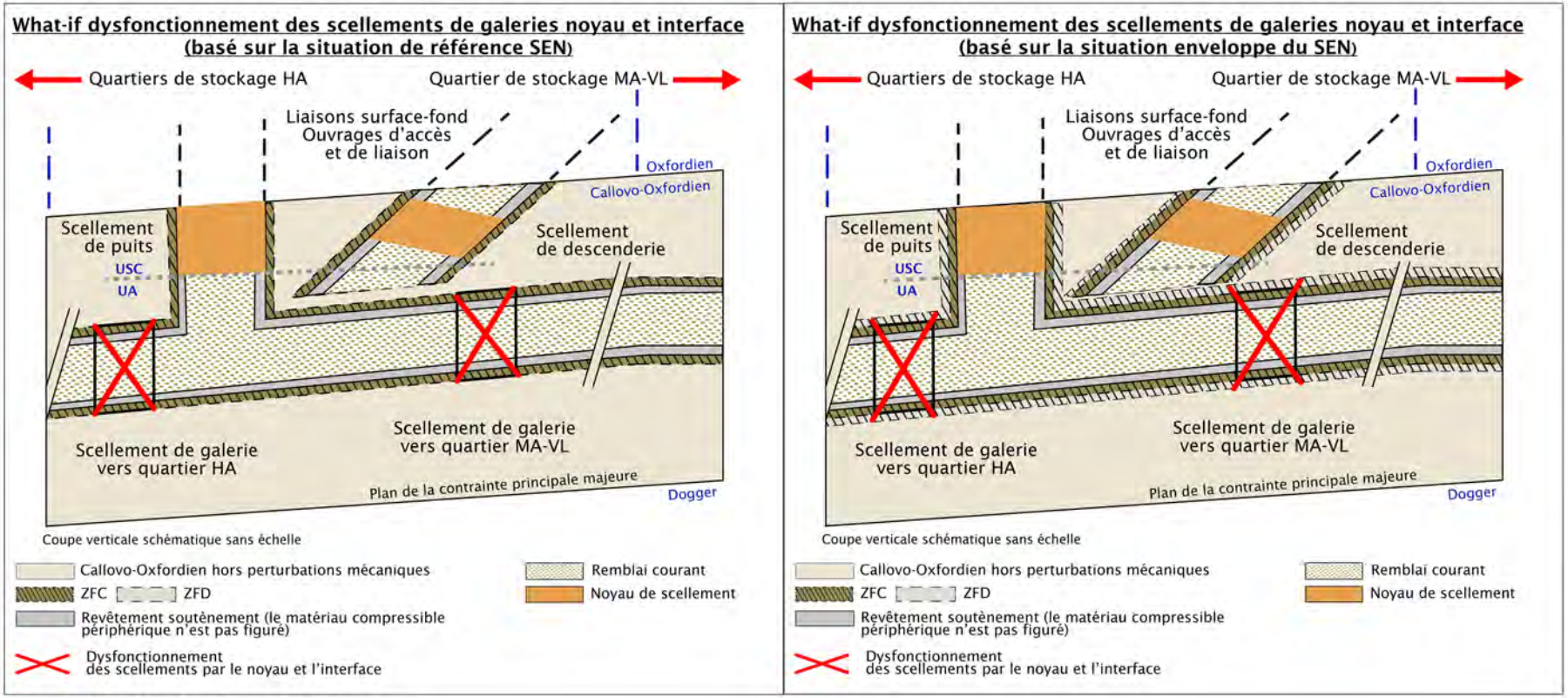
Figure 3-4 *Schéma illustratif du scénario What-if de « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par le noyau argileux et par l'interface »*

- un scénario *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface » (les scellements des liaisons surface-fond étant opérants), cf. Figure 3-5.

  Comme pour les scellements des liaisons surface-fond, il est postulé dans ce scénario *What-if* que le noyau argileux des scellements de galerie n'est pas réalisé de manière conforme aux exigences applicables au centre de stockage Cigéo. Cela conduit à représenter le noyau argileux des scellements avec des caractéristiques hydrauliques équivalentes à celle du remblai des galeries.

  Il est également postulé un mauvais contact hydromécanique entre le noyau et l'interface représenté par un auto-colmatage imparfait des argilites endommagées mécaniquement en champ proche ce qui provoquerait un défaut de performance hydraulique telle que représentée en scénario d'évolution altérée par une dégradation hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien.

  Cette représentation par cumul de dysfonctionnements des scellements des galeries par le noyau argileux et l'interface induit une forte dégradation de la performance hydraulique des scellements donc la non-réalisation des performances exigées des scellements de galerie ce qui conduit à la non-réalisation de la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau » ;



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0007-B

Figure 3-5 *Schéma illustratif du scénario What-if de « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface »*

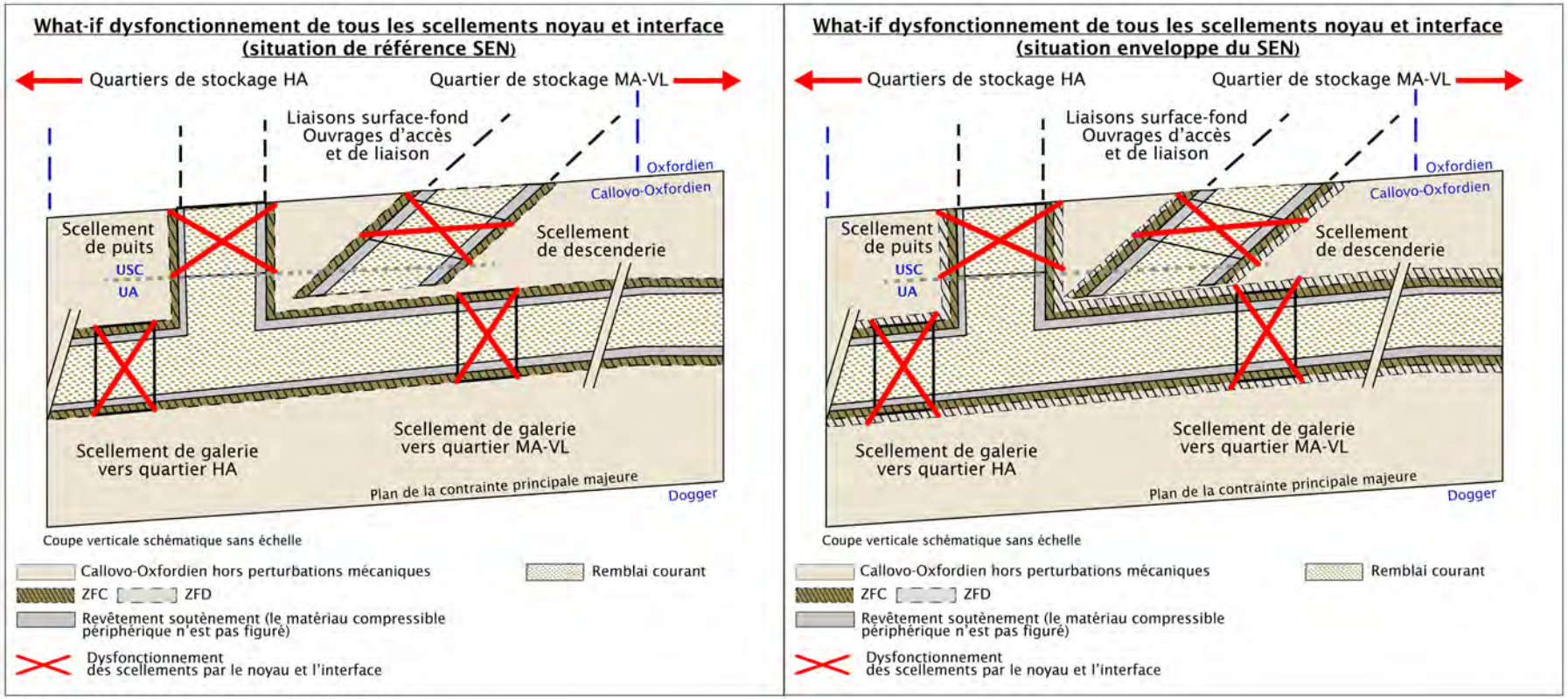
- un scénario *What-if* « Dysfonctionnement de tous les scellements (liaisons surface-fond et galeries) par le noyau argileux et par l'interface », cf. Figure 3-6.

  Par une analyse globale menée sur l'ensemble des scellements (puits, descenderie et galeries) contribuant à la même fonction de sûreté « S'opposer à la circulation de l'eau », des causes communes de dysfonctionnement de ces ouvrages ont été postulées (notamment, un défaut de mise en place du noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond et des galeries). Elle a conduit à définir un scénario *What-if* de dysfonctionnement de l'ensemble des noyaux argileux des scellements des liaisons surface-fond et des scellements de galeries, qui considère qu'ils ne sont pas réalisés de manière conforme aux exigences applicables au centre de stockage Cigéo.

  Il est également postulé un cumul avec la présence éventuelle d'une zone de fracturation connectée au droit du noyau argileux des scellements de puits et descenderies par une dégradation hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien et un auto-colmatage imparfait des argilites endommagées mécaniquement en champ proche des scellements de galeries également représenté par une dégradation hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien.

  Cela conduit à postuler un cas extrême de dysfonctionnement des scellements où le noyau argileux de l'ensemble des scellements présente des caractéristiques hydrauliques équivalentes à celle du remblai des galeries et une dégradation hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien continue le long des ouvrages de fermeture.

  Cette représentation induit une forte dégradation de la performance hydraulique de l'ensemble des scellements ce qui conduit à la non-réalisation de la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau ».



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0008-B

Figure 3-6 Schéma illustratif du scénario What-if de « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau argileux et par l'interface »

3.1.2.3 L'analyse des composants de l'alvéole HA

Pour mémoire, certains composants de l'alvéole HA font l'objet d'une exigence spécifiée : il s'agit d'une durée d'étanchéité des conteneurs de stockage HA et de conditions physico-chimiques dans l'alvéole favorisant la limitation du relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et leur immobilisation dans l'alvéole.

L'analyse s'est focalisée sur les risques et incertitudes susceptibles d'entraîner la non-satisfaction de ces exigences et en conséquence de la non réalisation des fonctions de sûreté des composants de l'alvéole HA y contribuant. L'analyse a ainsi conduit à identifier et construire des scénarios d'évolution altérée (SEA) et des scénarios *What-if* selon la vraisemblance du risque ou de l'incertitude analysée. L'analyse intègre également la gestion des incertitudes résiduelles de connaissance sur les caractéristiques des colis de déchets (inventaire, modèles de relâchement).

Pour tenir compte des incertitudes résiduelles de connaissance des inventaires des colis de déchets HA, l'inventaire retenu pour les évaluations de sûreté après fermeture est un inventaire qualifié de « margé » établi selon la méthodologie décrite au volume 3 du présent rapport. Cet inventaire « margé » qualifié d'inventaire de référence est pris en compte pour tous les scénarios retenus pour les évaluations quantitatives (SEN, SEA, *What-if* et SIHI, cf. Chapitre 3.2 du présent volume).

Concernant la distribution de cet inventaire dans le quartier de stockage HA, il a été fait le choix de retenir une distribution de l'inventaire des déchets HA cohérente avec les chroniques de livraison retenues pour le dimensionnement THM des quartiers HA à ce stade (35) (cf. Chapitre 2.3.2.3 du présent volume). Comme indiqué au chapitre 2.3.2.3.1 du présent volume, les quartiers HA sont situés en aval hydraulique de la base des liaisons surface-fond (LSF), l'importance de cette voie de transfert est donc limitée. Elle est appliquée à tous les scénarios retenus pour les évaluations quantitatives (SEN, SEA, *What-if* et SIHI, cf. Chapitre 3.2 du présent volume).

3.1.2.3.1 La gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)

Les connaissances acquises sur l'applicabilité des modèles de relâchement pour les différentes familles de déchets HA ont permis de proposer un modèle pour les deux situations du scénario d'évolution normale selon l'approche définie au chapitre 1.4.1.3 du présent volume). Les incertitudes résiduelles de connaissances associées concernent quelques données de paramétrage des modèles, mais les acquis de connaissances ont permis de proposer une gestion de ces incertitudes en scénario d'évolution normale en particulier en situation enveloppe selon l'approche définie pour la définition de ses deux situations.

Cela a conduit au choix en situation enveloppe du scénario d'évolution normale d'un modèle de relâchement conservatif pour chacune des familles de colis HA retenue dans l'inventaire avec un paramétrage conservatif (cf. Chapitre 2.7.1 du présent volume).

3.1.2.3.2 Les scénarios d'évolution altérées de dysfonctionnement des conteneurs de stockage identifiés

Un conteneur de stockage pour *« protéger les déchets de l'eau »* en garantissant une étanchéité à l'eau durant une période suffisante permettant de couvrir les incertitudes suivantes :

- incertitudes sur l'altération aqueuse de la matrice vitrifiée en température ;
- incertitudes sur la maîtrise du comportement des radionucléides en température (solubilité et sorption à l'interface solide/liquide au-delà de 80 °C).

Le conteneur de stockage permet également de couvrir les incertitudes sur l'influence d'un milieu cimentaire vis-à-vis de l'altération de la matrice vitrifiée pendant sa période d'étanchéité.

Le conteneur de stockage HA fait l'objet de contrôles et de surveillance avant sa mise en place dans les alvéoles de stockage et pendant la phase de fonctionnement. Il est dimensionné en tenant compte de processus de corrosion sous contrainte. Seule une incertitude résiduelle de connaissance liée à l'influence de l'activité bactérienne persiste, elle est couverte en retenant une valeur conservative de la vitesse de corrosion pour déterminer la durée d'étanchéité en situation de référence du SEN. Il n'a pas été identifié de risques ou incertitudes conduisant à considérer un conteneur dysfonctionnant en scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 2.7.1.5 du présent volume).

L'analyse des risques et incertitudes des différents composants de l'alvéole HA, en particulier du MREA et du conteneur de stockage HA conduit à identifier deux scénarios d'évolution altérée (cf. Chapitre 2 du présent volume) :

- un SEA de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA0 du quartier pilote HA ;
- un SEA de dysfonctionnement d'un conteneur de stockage HA1 ou HA2 par alvéole HA1 ou HA2 du quartier de stockage HA.

Ces scénarios d'évolution altérée supposent, l'événement peu vraisemblable d'un défaut dans la mise en place du MREA ou la pénétration d'oxygène dans l'alvéole HA après sa mise en place pendant la phase de fonctionnement. Ces évènements entraineraient une perte d'étanchéité plus rapide que prévue des conteneurs de stockage HA après fermeture du stockage, c'est-à-dire avant la durée d'étanchéité exigée.

Pour ces scénarios, il est considéré un modèle de relâchement labile à l'ensemble de l'inventaire des conteneurs dysfonctionnants pour couvrir l'ensemble des incertitudes résiduelles sur l'environnement physico-chimique des alvéoles HA lors de la rupture prématurée des conteneurs.

3.1.2.3.3 Les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des conteneurs de stockage identifiés

L'analyse des risques et incertitudes des différents composants de l'alvéole HA, en particulier du MREA et du conteneur de stockage HA a conduit à postuler le scénario *What-if* suivant :

- scénario *What-if* de « Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) ».

L'analyse des risques et incertitudes des différents composants de l'alvéole HA, en particulier du MREA et du conteneur de stockage HA a conduit à postuler un cas extrême conduisant à un scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA bien que cet événement soit considéré comme très peu vraisemblable compte tenu de l'ensemble des dispositifs de contrôle et surveillance mis en place. Cela conduit à postuler la perte d'étanchéité prématurée de l'ensemble des conteneurs de stockage HA. Ce scénario *What-if* vise à vérifier la robustesse du système de stockage et le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien.

Pour ces scénarios *What-if,* il est considéré un modèle de relâchement labile à l'ensemble de l'inventaire des conteneurs dysfonctionnants pour couvrir l'ensemble des incertitudes résiduelles sur l'environnement physico-chimique des alvéoles HA lors de la rupture prématurée des conteneurs.

3.1.2.4 L'analyse des composants de l'alvéole MA-VL

Pour mémoire, les structures en béton de l'alvéole MA-VL contribuent à favoriser la limitation du relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et leur immobilisation dans l'alvéole de par les conditions physico-chimiques qu'ils induisent. L'analyse s'est donc focalisée sur les risques et incertitudes susceptibles d'entraîner une dégradation de leur performance.

L'analyse intègre également la gestion des incertitudes résiduelles de connaissance sur les caractéristiques des colis de déchets (inventaire, modèles de relâchement). Pour tenir compte des incertitudes résiduelles de connaissance des inventaires des colis de déchets MA-VL, l'inventaire retenu pour les évaluations de sûreté après fermeture est un inventaire qualifié de « margé » établi selon la méthodologie décrite au volume 3 du présent rapport. Cet inventaire est retenu pour tous les scénarios retenus pour les évaluations quantitatives (SEN, SEA, *What-if* et SIHI).

Concernant la distribution de cet inventaire, il a été fait le choix de retenir une distribution de l'inventaire des déchets MA-VL qui s'affranchit des incertitudes liées aux chroniques de livraison (35) (cf. Chapitre 2.3.2.3 du présent volume) et complétée d'études de sensibilité.

3.1.2.4.1 La gestion des incertitudes résiduelles dans le scénario d'évolution normale (SEN)

a) Le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques des déchets MA-VL

L'analyse des incertitudes résiduelles associées aux connaissances décrites dans le corpus de connaissance prend en compte la nature des déchets MA-VL du point de vue de leur comportement physico-chimiques dans les alvéoles de stockage. En effet, si les connaissances sur les processus et les modèles de représentation des relâchements des radionucléides (et des substances toxiques chimiques) sont consolidées pour l'essentiel des familles de colis MA-VL retenues dans l'inventaire, il persiste des incertitudes résiduelles quant à l'applicabilité de certains modèles en condition de stockage et à certains paramètres du modèle.

Les incertitudes sont gérées en retenant en situation enveloppe du SEN, un modèle de relâchement conservatif pour chacune des familles de colis MA-VL retenue dans l'inventaire.

b) Les structures en béton des alvéoles MA-VL

Pour mémoire, les matériaux cimentaires des alvéoles MA-VL favorisent la rétention des radionucléides et des substances toxiques chimiques par sorption et par précipitation, en particulier des actinides ;

Les mécanismes pilotant l'évolution de ces matériaux sur le long terme sont connus. Les quelques incertitudes résiduelles sont liées à l'extension spatio-temporelle de leur dégradation par hydrolyse et le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans les bétons dégradés en particulier sous l'influence de perturbations chimiques issues de certains déchets MA-VL. L'analyse a montré que l'Andra dispose d'un ensemble de données important sur l'évolution et le comportement des matériaux cimentaires. La connaissance acquise permet de disposer des valeurs conservatives caractéristiques des propriétés physico-chimiques des matériaux cimentaires et de facteurs correctifs permettant la gestion des incertitudes résiduelles en scénario d'évolution normale, notamment dans le cadre de la situation enveloppe ;

L'influence de certaines substances issues des déchets MA-VL et qui peuvent être à l'origine de perturbations du Callovo-Oxfordien et modifier ses propriétés de transport et de rétention (précipitation et sorption).

Des choix de conception visent à en réduire l'effet à la fois dans le Callovo-Oxfordien et sur les autres alvéoles. Les incertitudes résiduelles identifiées dans le socle de connaissance scientifiques et technique sont intégrées en scénario d'évolution normale.

3.1.2.4.2 Les scénarios d'évolution altérées et *What-if* de dysfonctionnement des composants de l'alvéole MA-VL

À l'issue de l'analyse des composants de l'alvéole MA-VL, il n'a pas été identifié de scénario d'évolution altérée ou *What-if*, l'ensemble des risques et incertitudes étant intégrés au SEN.

3.1.2.5 Les formations encaissantes supérieures et inférieures au Callovo-Oxfordien

Les formations encaissantes n'ayant pas de fonctions de sûreté, les risques et incertitudes résiduelles de connaissance sont gérées dans le cadre du scénario d'évolution normale (SEN).

Les acquis de caractérisation menés depuis de nombreuses années permettent de représenter les différents niveaux des formations encaissantes à la couche du Callovo-Oxfordien avec des caractéristiques qui se fondent sur la connaissance acquise. Seules quelques incertitudes sur la variabilité latérale des niveaux marneux ont conduit aux choix suivants :

- pour tenir compte des incertitudes sur la variabilité latérale des niveaux marneux et de leurs propriétés hydro-dispersives, les propriétés intrinsèques des formations encaissantes sont définies sur la base des gammes de valeurs disponibles et du modèle hydrogéologique afin de maximiser les flux vers les exutoires considérés ;
- pour tenir compte tenu des incertitudes sur la variabilité latérale des formations C3a et C3b, le transfert dans ces formations n'est pas pris en compte en SEN. Elles sont néanmoins intégrées dans les modélisations hydrogéologiques.

Les acquis de connaissance sur le modèle hydrogéologique concernent à la fois le modèle hydrogéologique à l'actuel et son évolution sur le long terme. Deux modèles d'évolution géodynamique ont été considérés, le premier considérant une évolution géodynamique phénoménologique, le second considérant une évolution géodynamique maximaliste (cf. Volume 7 du présent rapport). Les incertitudes résiduelles concernent l'évolution des champs de charge et celles relatives aux directions des trajectoires des particules et des vitesses d'écoulement/porosité cinématiques de l'Oxfordien Carbonaté et du Dogger.

L'incertitude résiduelle sur l'évolution des champs de charge est prise en compte de manière à encadrer les évolutions possibles :

- en situation de référence : modèle hydrogéologique à un million d'années basé sur le modèle géodynamique dit phénoménologique ;
- en situation enveloppe : modèle hydrogéologique à un million d'années basé sur le modèle géodynamique dit « maximaliste ».

Les incertitudes résiduelles relatives aux directions des trajectoires des particules et des vitesses d'écoulement/porosité cinématiques de l'Oxfordien Carbonaté sont prises en compte dans le choix des exutoires et de leur localisation de cette formation. De même les incertitudes résiduelles associées aux trajectoires des particules pour le Dogger sont prises en compte dans le choix des exutoires de cette formation.

3.1.2.6 La biosphère

Selon la démarche de l'Andra (cf. Chapitre 1 du présent volume), l'analyse a pris en compte les incertitudes sur les évolutions climatiques sur le million d'années et par conséquent sur les biosphères à considérer et les incertitudes sur les possibles activités humaines et leurs habitudes alimentaires.

Trois biosphères types sont retenues pour les évaluations radiologiques et toxicologiques en s'appuyant sur les simulations réalisées :

- une biosphère type tempérée ;
- une biosphère chaude type subtropicale humide de type Cr ;
- une biosphère froide type boréale.

En s'appuyant sur la connaissance acquise, en particulier sur la modélisation hydrogéologique, différents exutoires ont été retenus (cf. Chapitre 2.10.3 du présent volume) et plusieurs groupes de référence hypothétiques définis (cf. Chapitre 4 du présent volume).

3.1.2.7 L'analyse du risque d'intrusion humaine involontaire

En application de la démarche de définition des scénarios en après-fermeture définie au chapitre 1 du présent volume, ne sont considérées que des situations d'intrusions humaines involontaires liées à des activités de forages profonds.

Les scénarios reconduits pour le dossier d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo sont :

- *un forage avec extraction de carottes* visant à évaluer une exposition externe du fait d'examen visuel des carottes (cf. « Guide de sûreté n° 1 de l'ASN » (1)) ;
- *un forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle dans le Dogger*. Le scénario considère qu'un forage exploratoire du Dogger traverse le stockage puis est supposé abandonné à sa profondeur cible au Dogger ;
- *un forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage*. Ce scénario résulte de l'abandon à la cote du stockage d'un forage destiné à l'exploitation géothermique du Trias. Il se caractérise par un diamètre du forage plus important que pour un forage de reconnaissance.

S'ajoute à cette liste d'intrusion involontaire par forage, le scénario suivant :

- *un forage d'exploration qui traverse un alvéole MA-VL pendant le transitoire hydraulique-gaz*.

La figure 3-7 illustre de manière schématique les situations de forage retenues.

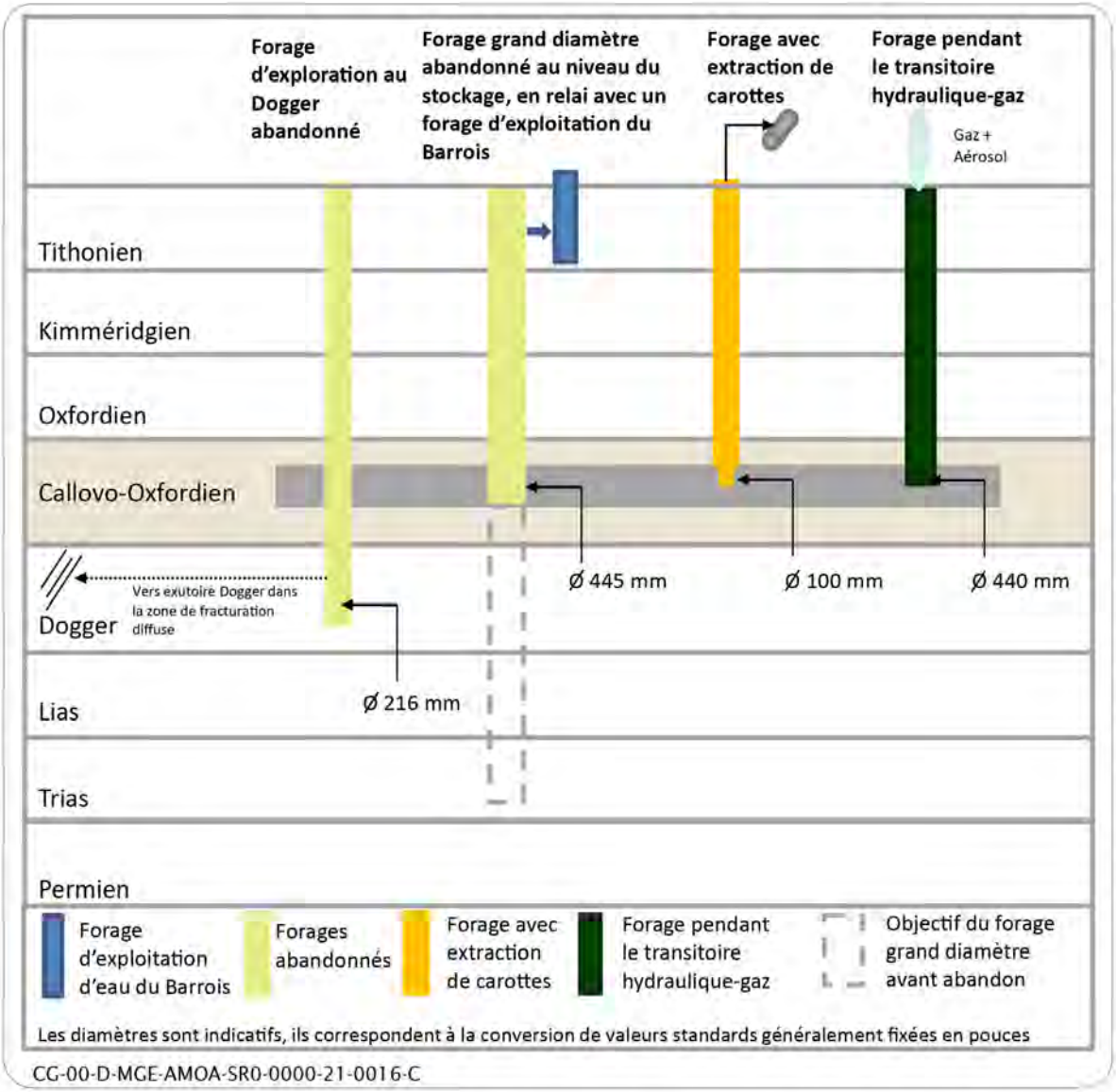


Figure 3-7 Illustration schématique des scénarios d'intrusion humaine involontaire retenus pour quantification

3.1.3 Le regroupement des scénarios SEA et *What-if* identifiés à l'issue de l'analyse des risques et incertitudes

En s'appuyant sur l'analyse menée composant par composant, une analyse plus globale est conduite en regard des fonctions de sûreté en après fermeture (cf. Chapitre 1.1.2.2 du présent volume). Pour mémoire, l'objectif visé est d'identifier les causes communes qui peuvent conduire au dysfonctionnement de l'ensemble des composants contribuant à une fonction de sûreté. Elle permet également de vérifier le niveau d'indépendance des fonctions de sûreté en s'assurant qu'un même risque ou incertitude n'est pas susceptible d'affecter plusieurs fonctions de sûreté.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans les logigrammes des figure 3-8 et figure 3-9 ci-après respectivement pour les fonctions « *s'opposer à la circulation de l'eau* » et « *limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage* ».

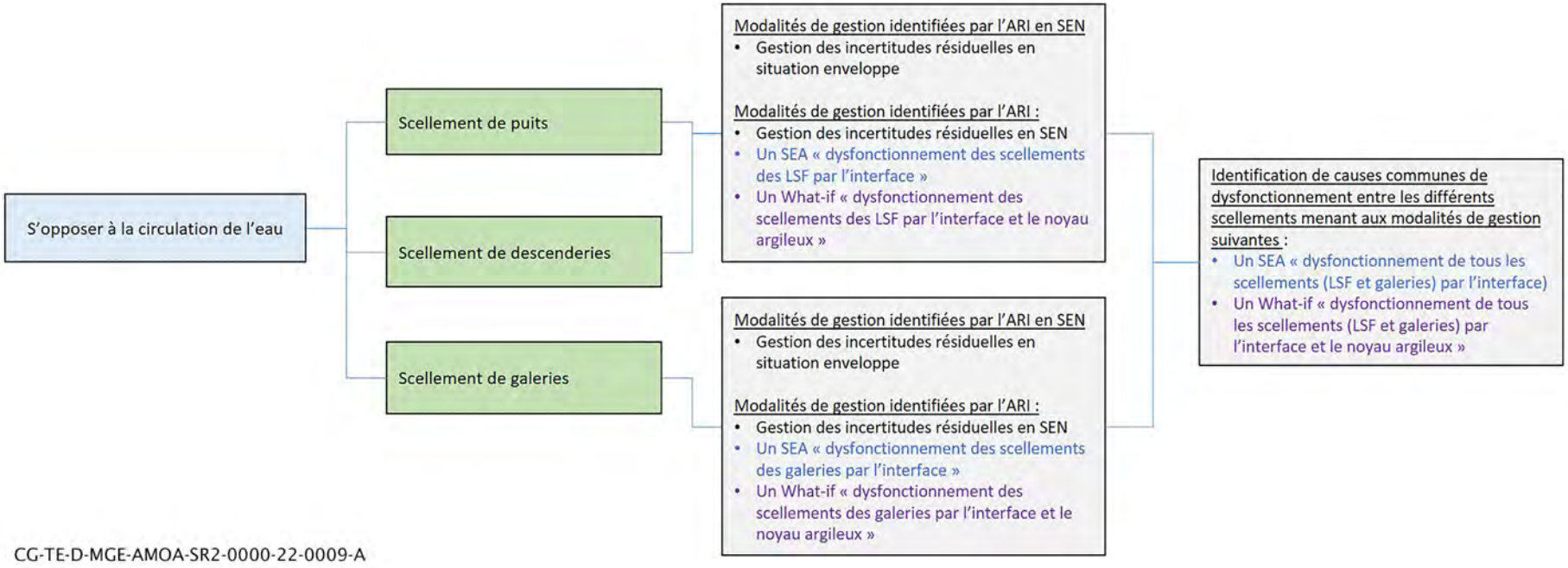


Figure 3-8 Logigramme résumant les modalités de gestion des incertitudes résiduelles par les scénarios (SEN et SEA et What-if identifiés) en regard de la fonction s'opposer à la circulation de l'eau

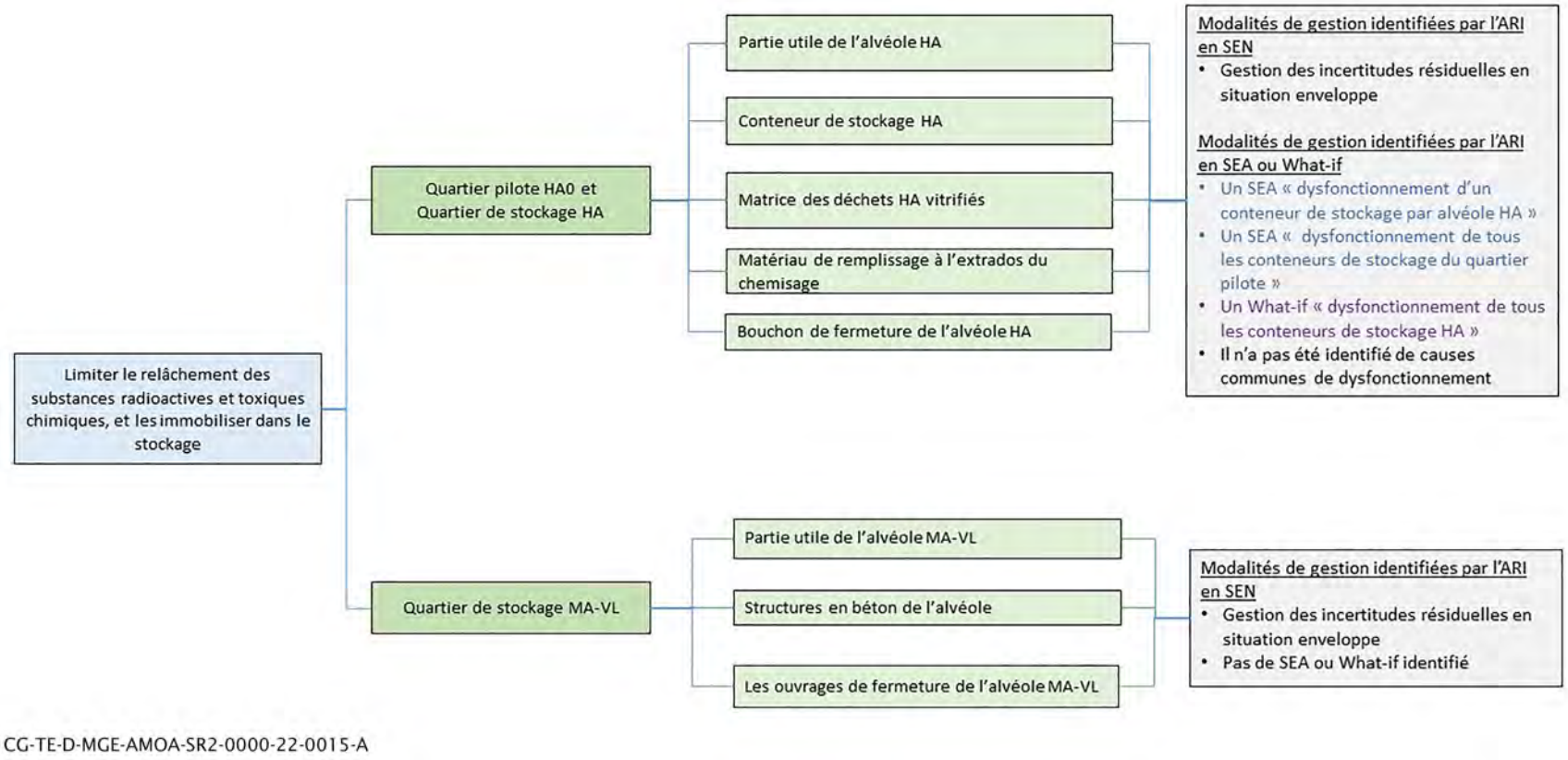


Figure 3-9 Logigramme résumant les modalités de gestion des incertitudes résiduelles par les scénarios (SEN et SEA et What-if identifiés) en regard de la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »

3.2 La liste des scénarios et situations retenus et définis pour les évaluations quantitatives

Liste des scénarios retenus

L'analyse des risques et incertitudes menée sur la base des acquis de connaissances scientifiques et technologiques, des dispositions de conception et des exigences applicables à l'installation de stockage Cigéo conduit l'Andra à retenir :

- deux situations associées au scénario d'évolution normale : une situation de référence et une situation enveloppe ;
- deux scénarios de type SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA :
  - ✓ un SEA de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA0 du quartier pilote HA ;
  - ✓ un SEA de dysfonctionnement d'un conteneur de stockage HA1 ou HA2 par alvéole HA1 ou HA2 du quartier de stockage HA ;
- trois scénarios de type SEA de dysfonctionnement des scellements :
  - ✓ un SEA de dysfonctionnement des scellements des Liaisons surface-fond (LSF) par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien (scellements des galeries opérants) ;
  - ✓ un SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien (scellements des LSF opérants) ;
  - ✓ un SEA de dysfonctionnement de tous les scellements (LSF et galeries) par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien ;
- trois scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements :
  - ✓ un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des LSF par le noyau argileux et l'interface (scellements des galeries opérants) ;
  - ✓ un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface (scellements des LSF opérants) ;
  - ✓ un scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements (LSF et de galeries) par le noyau argileux et l'interface ;
- un scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) ;
- deux scénarios *What-if* postulant une discontinuité non détectée dans la couche du Callovo-Oxfordien :
  - ✓ un scénario *What-if* discontinuité non détectée non traversante de la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ un scénario *What-if* discontinuité non détectée traversant la couche du Callovo-Oxfordien ;
- quatre scénarios d'intrusion humaine involontaire par forage :
  - ✓ un scénario forage avec extraction de carottes ;
  - ✓ un scénario forage d'exploration au Dogger abandonné à sa côte prévisionnelle ;
  - ✓ un scénario forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage ;
  - ✓ un scénario forage d'exploration qui traverse un alvéole MA-VL pendant le transitoire hydraulique-gaz.

3.2.1 Le scénario d'évolution normale et les situations associées

Tableau 3-1 Liste des cas de calcul associés au scénario d'évolution normale (SEN)

Scénario d'évolution normale	
Situation de référence	**Situation de référence présentant un état initial saturé** Cette situation repose sur un ensemble d'hypothèses et de données dont la logique de sélection est de retenir celles qui s'appuient sur la meilleure connaissance scientifique et technique disponible (ex : évolution spatio-temporelle des perturbations chimiques, cinétique de corrosion des conteneurs de stockage HA, représentation du foisonnement…). Ce scénario considère de manière conservative le stockage comme entièrement saturé dès l'instant initial et un transfert des radionucléides et toxiques chimiques uniquement par voie aqueuse.
Situation enveloppe	**Situation enveloppe présentant un état initial saturé** Cette situation correspond à la prise en compte des exigences applicables au centre de stockage Cigéo (*e.g.* Scellements, durée d'étanchéité minimale des conteneurs de stockage HA…). Deux positionnements du stockage sont considérés dans la couche du Callovo-Oxfordien pour prendre en compte l'exigence de 50 mètres de couche du Callovo-Oxfordien saine : • positionnement à 50 mètres du toit de la couche du Callovo-Oxfordien (cas 1) ; • positionnement à 50 mètres du mur de la couche du Callovo-Oxfordien (cas 2). Ce scénario considère de manière conservative le stockage comme entièrement saturé dès l'instant initial et un transfert des radionucléides et toxiques chimiques uniquement par voie aqueuse.

3.2.2 La liste des scénarios d'évolution altérés (SEA) retenus et définis pour quantification

L'Andra retient pour quantification les scénarios d'évolution altérée suivants présentés dans le tableau 3-2 ci-après.

Tableau 3-2 Liste des scénarios d'évolutions altérée (SEA) retenus et définis pour quantification

Scénarios d'évolution altérée (SEA)	
Scénarios d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des scellements	**SEA- Dysfonctionnement des scellements des Liaisons surface-fond (LSF) par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien (scellements des galeries opérants)** Ce scénario correspond au dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par l'interface. Il considère la formation d'une zone fracturée connectée (ZFC) continue au droit de ces ouvrages de fermeture réalisés dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT), unités litho-stratigraphiques en partie haute de la couche du Callovo-Oxfordien.
	SEA- Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien (scellements des LSF opérants) Ce scénario correspond au dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface. Il considère un défaut de cicatrisation hydraulique de la ZFC dans l'unité argileuse (UA) où sont implantées les installations de fond du stockage, notamment au droit des zones de dépose du revêtement.
	SEA- Dysfonctionnement de tous les scellements (LSF et galeries) par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien Ce scénario correspond à un cumul de dysfonctionnement de tous les scellements (puits, descenderies et galeries) par l'interface respectivement par la création d'une ZFC dans l'USC et l'UT au droit du noyau argileux et par un défaut de cicatrisation hydraulique de la ZFC, au droit des zones de dépose du revêtement.
Scénarios d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA	**SEA- Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA0 du quartier pilote HA** Ce scénario postule la perte d'étanchéité prématurée en lien avec une corrosion oxydante généralisée à tous des conteneurs de stockage du quartier pilote HA.
	SEA- Dysfonctionnement d'un conteneur de stockage HA1 ou HA2 par alvéole HA1 ou HA2 du quartier de stockage HA Ce scénario considère la perte d'étanchéité prématurée d'un conteneur de stockage HA1 ou HA2 par alvéole du quartier de stockage HA en lien avec une corrosion oxydante localisée dans l'alvéole de certains conteneurs de stockage HA.

3.2.3 La liste des scénarios *What-if* retenus et définis pour quantification

L'Andra retient pour quantification les scénarios *What-if* suivants (cf. Tableau 3-3).

Tableau 3-3 Liste des scénarios What-if retenus et définis pour quantification (LSF : Liaisons surface-fond)

Scénarios *What-if*	
***What-if* de dysfonctionnement des scellements**	*What-if* - Dysfonctionnement des scellements des LSF (puits et descenderies) par le noyau argileux et l'interface (scellements des galeries opérants) Ce scénario correspond au dysfonctionnement des scellements des LSF (puits et descenderies) par (i) le noyau argileux qui possède des propriétés hydrauliques de remblai, (ii) un défaut d'interface, avec la formation d'une zone fracturée connectée (ZFC) continue au droit des ouvrages de fermeture dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT) avec des propriétés pénalisantes.
	What-if - Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et l'interface (scellements des LSF opérants) Ce scénario correspond au dysfonctionnement des scellements des galeries par (i) le noyau argileux qui possède des propriétés hydrauliques de remblai, et (ii) un défaut de cicatrisation hydraulique de la ZFC continu le long des ouvrages de fermeture dans l'unité argileuse (UA) avec des propriétés pénalisantes.
	***What-if* - Dysfonctionnement de tous les scellements (LSF et galeries) par le noyau argileux et l'interface** Ce scénario correspond à une combinaison du dysfonctionnement des scellements des LSF (puits et descenderies) et des galeries. Il considère : • le dysfonctionnement des LSF par (i) le noyau argileux qui possède des propriétés hydrauliques de remblai, et (ii) un défaut d'interface, avec la formation d'une zone fracturée connectée (ZFC) continue au droit des ouvrages de fermeture avec des propriétés pénalisantes ; • et le dysfonctionnement des scellements des galeries par (i) le noyau argileux qui possède des propriétés hydrauliques de remblai, et (ii) un défaut de cicatrisation hydraulique de la ZFC au droit des ouvrages de fermeture et la prise en compte de propriétés pénalisantes.
***What-if* de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA**	***What-if* - Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA)** Ce scénario correspond à la perte d'étanchéité prématurée de l'ensemble des conteneurs de stockage HA (quartiers pilote et quartier de stockage HA). Il postule (i) une corrosion prématurée du conteneur de stockage et (ii) la mise en place d'un milieu physico-chimique défavorable aux verres nucléaires dans l'alvéole HA.
***What-if* de discontinuité non détectée de la couche du Callovo-Oxfordien**	***What-if* - Scénario « Discontinuité non détectée non traversante de la couche du Callovo-Oxfordien »** Ce scénario postule une discontinuité hydrauliquement active dans la partie inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien qui n'aurait pas été détectée. Il est également postulé qu'elle intercepte quelques alvéoles de stockage et créer ainsi une voie de transfert localement convective depuis les alvéoles de stockage vers la formation encaissante du Dogger puis de l'exutoire retenu dans la zone de fracturation diffuse.

Scénarios *What-if*	
	***What-if* - Scénario « Discontinuité non détectée traversant la couche du Callovo-Oxfordien »** Ce scénario postule une discontinuité hydrauliquement active traversant la couche du Callovo-Oxfordien qui n'aurait pas été détectée. Il est également postulé qu'elle intercepte quelques alvéoles de stockage et créer ainsi une voie de transfert localement convective depuis les alvéoles de stockage vers la formation encaissante du Dogger puis de l'exutoire retenu dans la zone de fracturation diffuse.

3.2.4 La liste des scénarios d'intrusion humaines involontaires (SIHI) retenus

L'Andra retient pour quantification les scénarios d'intrusion humaine involontaires suivants listés dans le tableau 3-4.

Tableau 3-4 Liste des scénarios d'intrusion humaine involontaires (SIHI) pour quantification

Scénario d'Intrusion Humaine Involontaires (SIHI)	
Forage avec extraction de carottes	Les impacts considérés sont exclusivement les impacts immédiats d'exposition externe sur un foreur manipulant les carottes Scénario répondant à la recommandation du guide de sureté de l'ASN de 2008.
Forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle	Le forage de reconnaissance atteint sa cote prévisionnelle. Il constitue un court-circuit local des gardes supérieures et inférieures de la couche du Callovo-Oxfordien et induit une possibilité de migration des radionucléides vers les exutoires du Dogger.
Forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage.	Le forage constitue un court-circuit de la garde supérieure de la couche du Callovo-Oxfordien. Un relais hydraulique fonctionne avec un forage d'exploitation du Barrois. L'hypothèse d'un arrêt du forage au droit du stockage est majorante en termes de conséquences hydrauliques.
Forage d'exploration qui traverse un alvéole MA-VL pendant le transitoire hydraulique-gaz	Ce forage constitue un court-circuit local de la garde supérieure de la couche du Callovo-Oxfordien pendant le transitoire hydraulique-gaz. Les impacts considérés sont exclusivement les impacts immédiats du travailleur.

4

La description des biosphères

4.1 La description des modèles associés à la biosphère type tempérée 212
4.2 La description des modèles associés à la biosphère type chaude 220
4.3 La description des modèles associés à la biosphère type froide 222

La biosphère représente le dernier maillon de la chaîne de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques depuis les colis de déchets jusqu'à l'homme.

L'ensemble des connaissances sur la biosphère permet d'identifier les différentes voies de transfert potentielles depuis un exutoire vers l'homme, de sélectionner les voies de transfert pertinentes dans le contexte défini pour l'analyse de sûreté et de proposer une modélisation et des valeurs de paramètres associés afin de quantifier ces transferts.

Les impacts sont exprimés en dose efficace à l'homme pour ce qui concerne les radionucléides et en niveau d'impact toxicologique pour les substances toxiques chimiques. À cette fin, des modèles conceptuels de biosphère sont construits afin de convertir une concentration en radionucléides ou en substances toxiques chimiques dans l'eau à un exutoire donné, en un calcul de dose ou en un niveau d'impact toxicologique le cas échéant (cf. Chapitre 1.5.2 du présent volume). Cette évaluation de l'impact sur l'homme n'est pas une prédiction des effets mais représente une indication de la protection offerte par un stockage de déchets nucléaires en formation géologique profonde.

Il convient de justifier puis décrire les différents types de biosphères à prendre en compte, les exutoires, les groupes de référence hypothétiques à considérer ainsi que l'ensemble des valeurs de paramètres relatifs aux activités humaines, agricoles, et à l'environnement qui sont nécessaires pour les évaluations d'impact radiologique et chimique sur l'homme après fermeture de l'INB Cigéo (57).

En vue des évaluations quantitatives associées au dossier de demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo, sont considérées pour les évaluations d'impact aux exutoires, trois biosphères types :

- une biosphère type tempérée ;
- une biosphère chaude type subtropicale humide Cr ;
- une biosphère froide type boréale.

Conformément à la démarche (cf. Chapitre 1.5.2.2 du présent volume), ces trois biosphères sont considérées de manière non séquentielle et équiprobable.

4.1 La description des modèles associés à la biosphère type tempérée

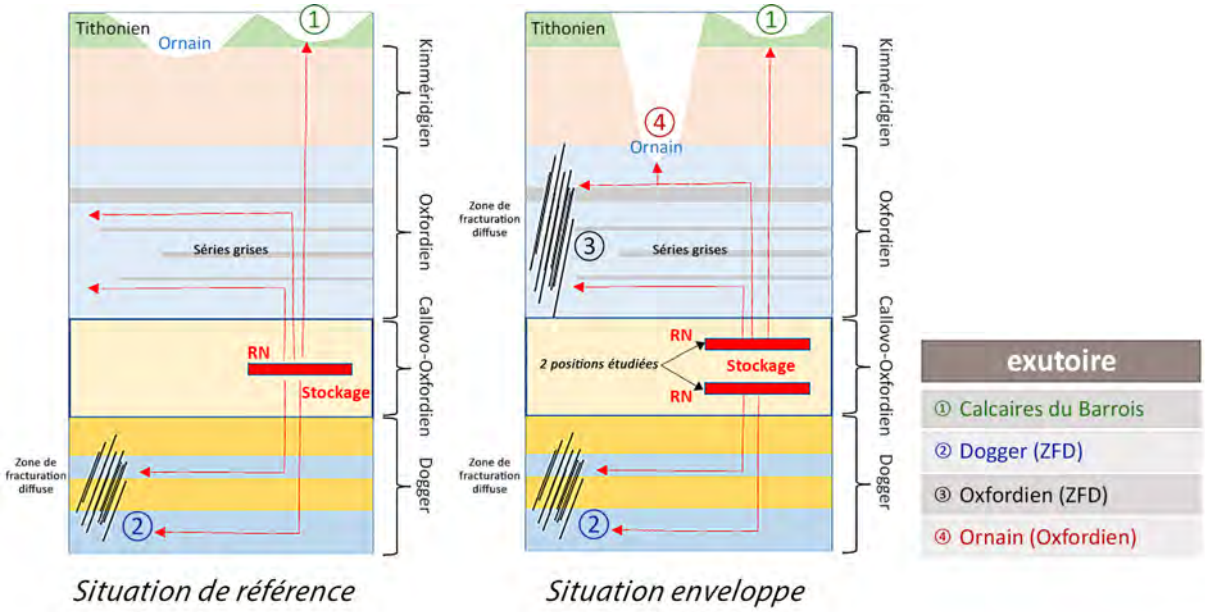
4.1.1 Le rappel du choix des exutoires

Le tableau suivant rappelle les exutoires retenus pour les évaluations d'impact radiologique et toxicologique en biosphère type tempérée (cf. Chapitre 2.10 du présent volume).

Tableau 4-1 Choix des exutoires pour les évaluations en biosphère type tempérée

Exutoire	Type d'exutoire	Positionnement	Application
Barrois	Artificiel (pompage)	Au droit du stockage dans la ZIOS	Situation de référence Situation enveloppe
Dogger (ZFD)	Artificiel (pompage)	ZFD	Situation de référence Situation enveloppe
Oxfordien (ZFD)	Artificiel (pompage)	ZFD	Situation enveloppe
Ornain (Oxfordien)	Naturel (rivière)	Rivière Ornain	Situation enveloppe

La figure 4-1 ci-dessous présente sur une coupe des différentes formations encaissantes les exutoires présentés supra pour chacune des deux situations étudiées (référence à gauche et enveloppe à droite) selon l'ordre du tableau.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-20-0116-B

Figure 4-1 Localisation des exutoires retenus pour la situation de référence et pour la situation enveloppe

4.1.2 Les groupes de référence hypothétiques retenus pour les évaluations

La biosphère type tempérée considérée pour les évaluations à long terme est une biosphère analogue à celle qui existe aujourd'hui en Meuse/Haute-Marne. Les composantes principales descriptives de cette biosphère type tempérée à savoir le climat régional, la végétation, la faune, les sols, la géomorphologie, la géologie, l'hydrologie de surface, l'hydrogéologie et les activités des communautés humaines sont décrites sur la base de la description des caractéristiques de la biosphère actuelle, tempérée, et présentées dans le volume 4 du présent rapport.

Selon une approche itérative, l'Andra considère *a priori* différents groupes de référence hypothétiques (GRH). Pour cela, l'Andra s'appuie sur les activités potentielles observées aujourd'hui localement dans la

région de Meuse Haute-Marne ainsi que sur le retour de l'instruction du « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » par l'Autorité de sûreté nucléaire (2) et par la *Peer Review Internationale* (20).

Ainsi pour chaque exutoire retenu, sont examinées les différentes activités possibles qui font un usage de l'eau (eau boisson, abreuvement des animaux, irrigation), susceptible de conduire à une exposition (exposition externe, exposition interne par inhalation et exposition interne par ingestion).

L'approche conduit également à examiner d'une part des comportements alimentaires moyens (groupe multi-activités) et des comportements alimentaires particuliers en lien avec une activité particulière (gros mangeur de viande bovine dans le cas d'un individu éleveur ou gros mangeur de fruits et légumes dans le cas d'un villageois avec un jardin potager par exemple). Cette approche permet de couvrir différentes sensibilités alimentaires et *in fine* de s'assurer que le fait pour un individu de consommer par exemple beaucoup plus de viande ou de fruits que la moyenne ou de pratiquer une activité de pêche en rivière ne conduirait pas à un impact non acceptable.

Le tableau 4-2 ci-après présente le choix des groupes de référence hypothétiques à considérer pour une biosphère type tempérée et leur justification sur la base des observations actuelles.

Tableau 4-2 Choix des groupes de référence hypothétiques (biosphère type tempérée)

Biosphère tempérée			
Nom du groupe	**Détail des activités**	**Observations**	**Domaine d'application**
Multi- activités	**Il s'agit d'un groupe dont l'individu représentatif adulte est un agriculteur qui exploite :** • des cultures de céréales (blé) ; • un élevage de bovins et ovins (produits laitiers et viandes) ; • un jardin potager et verger (fruits et légumes) ; • une basse-cour (volailles, œufs, porc).	• ensemble des activités observées actuellement ; • irrigation des jardins et abreuvement des animaux ; • irrigation de cultures de blé non observée actuellement mais qui ne peut être totalement écartée dans le futur ; • groupe qui permet d'explorer un grand nombre de voies de transfert lié à l'exploitation de l'eau.	**Groupe retenu pour tous les exutoires**
Multi-activités **Villageois jardinier (activité particulière)**	Il s'agit d'un groupe dont l'individu représentatif adulte est un agriculteur jardinier qui exploite : • un jardin potager et verger (fruits et légumes) ; • une basse-cour (volailles, œufs, porc) ; • des cultures de céréales (blé) ; • quelques bovins et ovins. **Différence avec le groupe multi-activités : consommation beaucoup plus importante des produits issus du verger et du jardin potager**	• *Idem* groupe multi-activités	**Groupe retenu en sensibilité (exutoire Dogger)** Permet d'explorer une activité particulière associée à la consommation plus importante des produits issus du verger et du jardin potager (sensibilité au régime alimentaire)

Biosphère tempérée			
Nom du groupe	**Détail des activités**	**Observations**	**Domaine d'application**
Multi-activités **Éleveur de bovins** **(activité particulière)**	Il s'agit d'un groupe dont l'individu représentatif adulte est un agriculteur éleveur de bovins qui exploite : • un élevage de bovins ; • un jardin potager et verger (fruits et légumes) ; • une basse-cour (volailles, œufs, porc) ; • des cultures de céréales (blé). **Différence avec le groupe multi-activités : consommation beaucoup plus importante de viande de bœuf et de produits laitiers**	• *Idem* groupe multi-activités	**Groupe retenu en sensibilité (exutoire Dogger)** Permet d'explorer une activité particulière associée à la consommation plus importante de viande de bœuf et de produits laitiers (sensibilité au régime alimentaire)
Multi-activités **Pêcheur chasseur**	Il s'agit d'un groupe dont l'individu représentatif adulte est un agriculteur pêcheur et chasseur qui pratique : • la pêche de poissons en rivière en activité de loisir ; • la chasse de gibier en activité de loisir ; Le reste des activités est identique au groupe multi-activités : • cultures de céréales (blé) ; • élevage de bovins et ovins (produits laitiers et viandes) ; • jardin potager et verger (fruits et légumes) ; • basse-cour (volailles, œufs, porc).	• groupe qui nécessite la présence et l'utilisation d'une rivière ; • activités de chasse et pêche observées actuellement comme loisir ; • permet d'explorer la consommation de poisson issu de la rivière et la consommation de gibier s'abreuvant dans la rivière.	**Groupe retenu en sensibilité (exutoire rivière Ornain)** Permet d'explorer un groupe multi-activités rivière et la pratique des activités pêche en rivière et chasse de loisir (sensibilité au régime alimentaire)

Les différents groupes de référence hypothétiques retenus pour les évaluations quantitatives pour la biosphère type tempérée sont :

- un groupe multi-activités appliqué à tous les exutoires ;
- en sensibilité :
  - ✓ un groupe (multi-activités) éleveur bovins appliqué à l'exutoire Dogger qui permet d'explorer une sensibilité alimentaire à travers une consommation plus importante de bœuf et de produits laitiers ;
  - ✓ un groupe (multi-activités) villageois jardinier appliqué à l'exutoire Dogger qui permet d'explorer une sensibilité alimentaire à travers une consommation plus importante des produits issus du verger et du jardin potager ;
  - ✓ un groupe (multi-activités) pêcheur chasseur appliqué à l'exutoire rivière Ornain qui permet d'explorer les activités de pêche en rivière et chasse de gibier.

Conformément à la démarche biosphère Andra et aux recommandations de la CIPR 101 (9), l'Andra retient pour les évaluations d'étudier systématiquement l'individu adulte et la possibilité d'étudier également les deux classes d'âge suivantes :

- enfant de 10 ans (représentatif de la tranche d'âge 6-15 ans) ;
- enfant de 1 an (représentatif de la tranche d'âge 3 mois à 5 ans).

Ainsi pour le groupe de référence hypothétique multi-activités, les évaluations radiologiques sont également réalisées pour les enfants de 10 ans et pour les enfants de 1 an.

En intégrant aux groupes retenus précédemment les différents individus représentatifs on obtient différents groupes biosphère à construire qui sont synthétisés sur figure 4-2 ci-dessous :

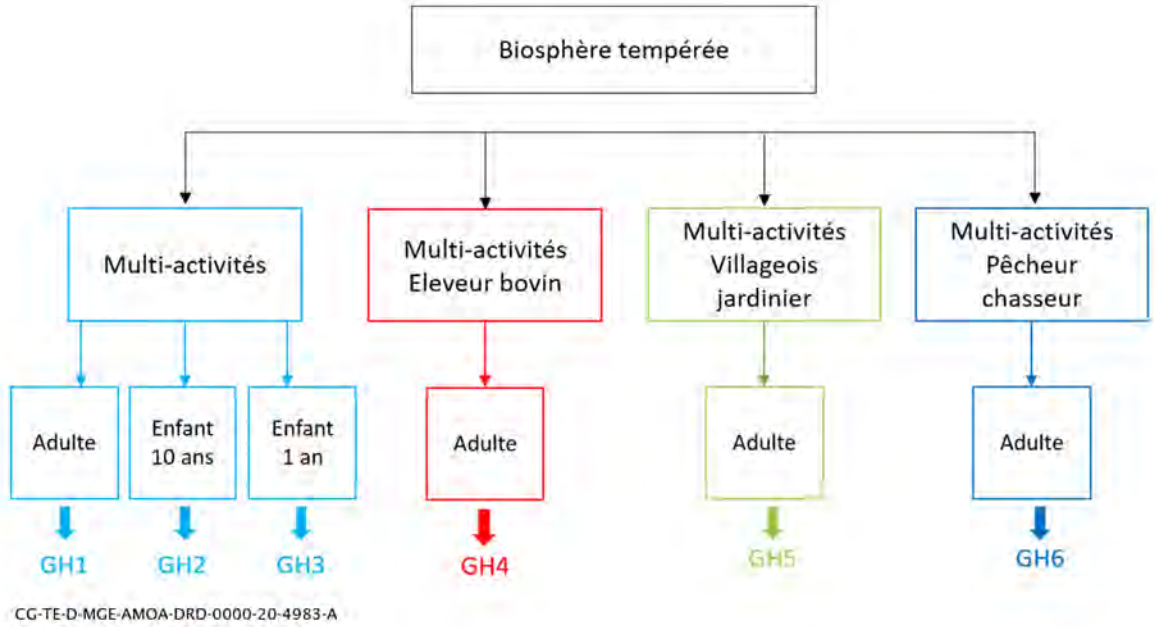


Figure 4-2 *Groupes hypothétiques biosphère (GH) à construire pour les évaluations après fermeture du système de stockage Cigéo (biosphère type tempérée)*

4.1.3 La description des groupes de référence hypothétiques

Les voies d'atteinte à l'homme qui sont considérées pour chaque individu sont :

- l'inhalation (mise en suspension de particules de sols contaminés) ;
- l'ingestion (des produits animaux et végétaux, eau de boisson, sol par inadvertance) ;
- l'exposition externe (lors du temps de présence sur des sols contaminés et uniquement pour les radionucléides).

4.1.3.1 Le comportement alimentaire et les consommations

De manière conservative, le groupe de référence hypothétique vit en autarcie complète (niveau d'autoconsommation de 1) pour l'eau de boisson et tous les produits animaux et végétaux issus des activités du groupe de référence hypothétique. Les comportements alimentaires dépendent également des groupes de références hypothétiques sélectionnés.

Pour la biosphère type tempérée, il est retenu :

- pour la classe d'âge adulte, l'enquête alimentaire réalisée localement sur la zone de l'OPE (Observatoire Pérenne de l'Environnement par l'Andra en collaboration avec l'IRSN (60). Cette enquête n'est disponible que pour les adultes ;
- pour la classe d'âge enfant de 10 ans, l'enquête alimentaire OPE (individu adulte) avec application pour chaque catégorie d'aliment d'un ratio adulte/enfant de 10 ans calculé en utilisant l'enquête alimentaire nationale INCA 3 (61) ;
- pour la classe d'âge enfant de 1 an, l'enquête alimentaire OPE (individu adulte) avec application pour chaque catégorie d'aliment d'un ratio adulte/enfant de 1 an calculé en utilisant l'enquête alimentaire nationale INCA 3 (61).

Le détail des quantités d'aliments consommés ainsi que les valeurs des autres paramètres utiles à la réalisation des calculs en biosphère type tempérée et les justifications associées sont présentés dans la note support « Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage » citée en référence (57).

4.1.3.2 Les voies de transfert du groupe de référence hypothétique multi-activités

Les voies de transfert retenues pour le groupe multi-activités sont présentées sur le schéma ci-après.

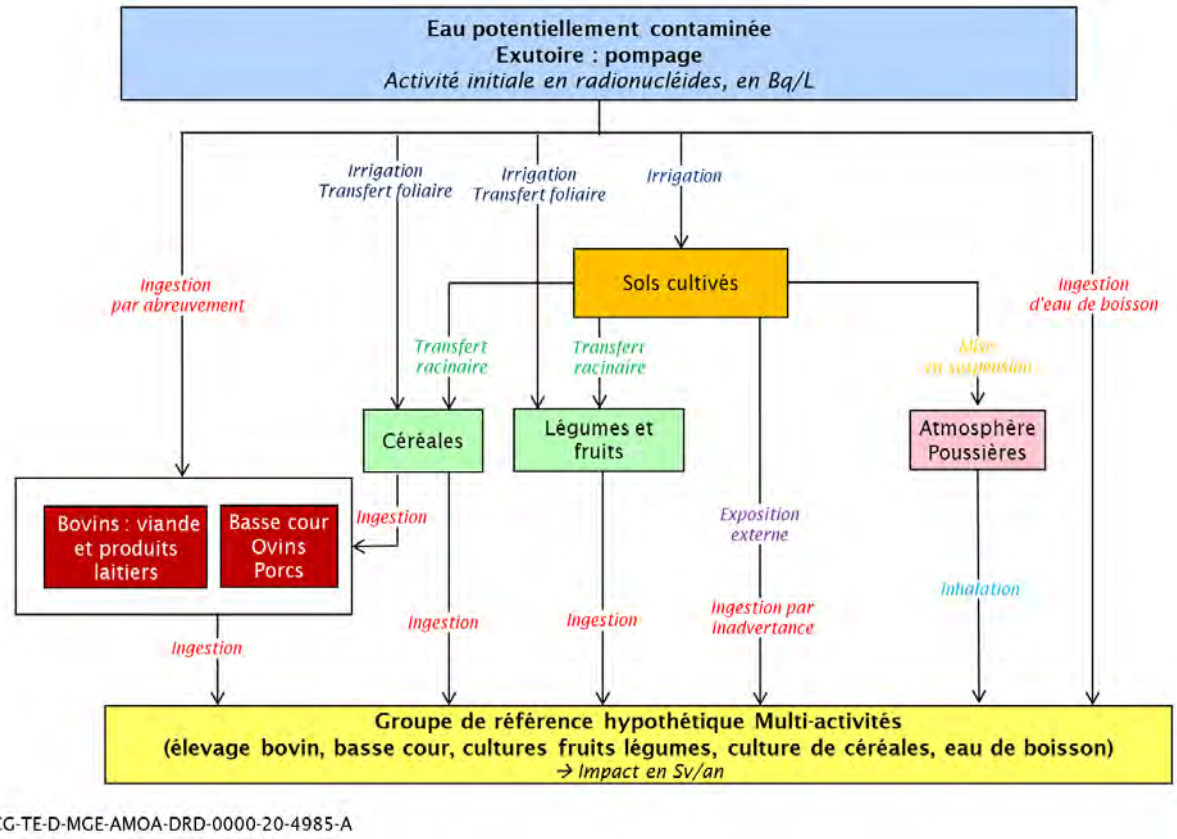


Figure 4-3 *Schéma des voies de transfert retenues pour un individu représentatif du groupe de référence hypothétique multi-activités*

4.1.3.3 Les voies de transfert du groupe de référence hypothétique multi-activités éleveur bovin

Les voies de transferts retenues pour le groupe de référence hypothétique multi-activités éleveur bovins (GH4) sont identiques aux voies de transfert du groupe de référence hypothétique multi-activités (cf. Figure 4-3), la différence entre les deux groupes réside uniquement dans les quantités consommées (sensibilité au régime alimentaire) (57).

4.1.3.4 Les voies de transfert du groupe de référence hypothétique multi-activités villageois jardinier

Les voies de transferts retenues pour le groupe de référence hypothétique multi-activités villageois jardinier (GH5) sont identiques aux voies de transfert du groupe de référence hypothétique multi-activités (cf. Figure 4-3), la différence entre les deux groupes réside uniquement dans les quantités consommées (sensibilité au régime alimentaire) (57).

4.1.3.5 Les voies de transfert du groupe de référence hypothétique multi-activités et pêcheur chasseur à l'exutoire rivière Ornain

Le groupe de référence hypothétique multi-activités pêcheur chasseur est un agriculteur qui en plus de ses multiples activités pratique :

- la pêche dans la rivière Ornain qui implique une consommation de poisson ;
- la chasse de gibier aux abords de la rivière qui implique une consommation de gibier.

Ses autres activités sont similaires au groupe multi-activités.

Par ailleurs, on considère que les prairies autour de la rivière peuvent potentiellement être inondées et donc contaminer l'herbe ingérée par les bovins. De même, il est supposé que le gibier aux abords de la rivière Ornain s'abreuve uniquement dans cette rivière.

Le schéma ci-dessous présente les voies de transferts retenues pour le GRH multi-activités pêcheur chasseur :

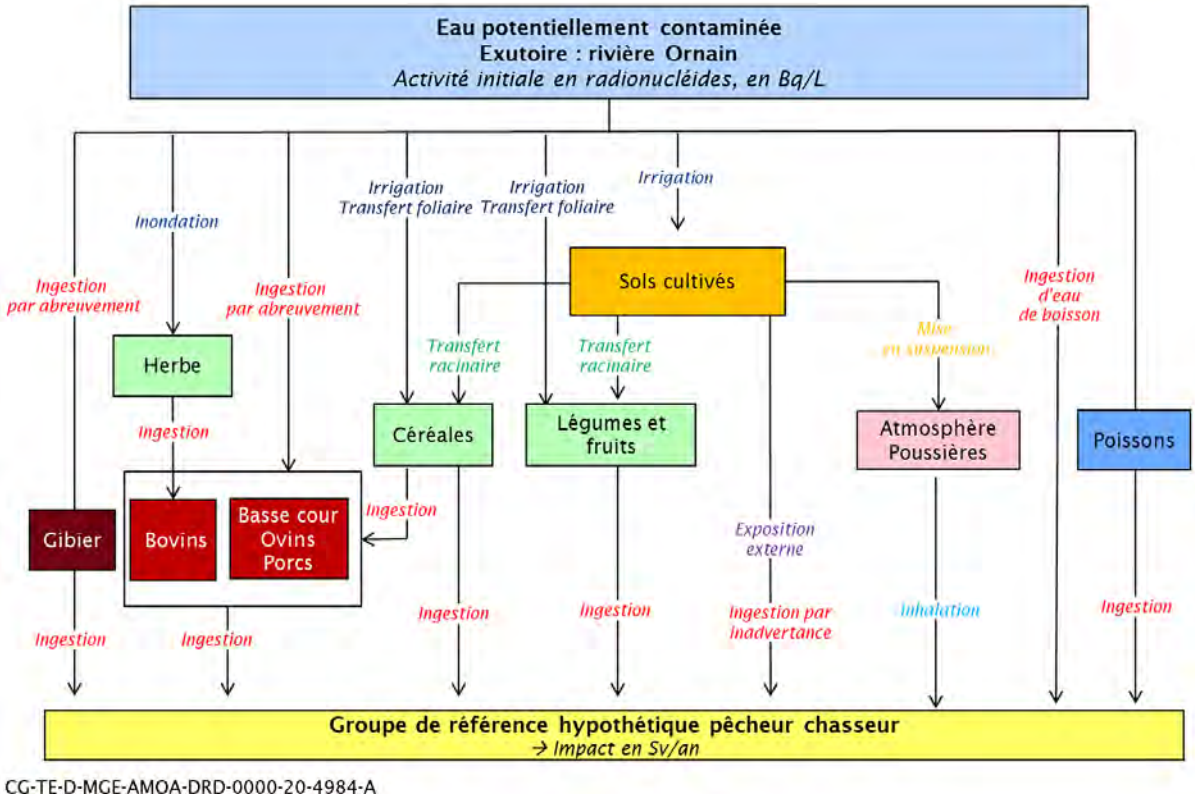


Figure 4-4 *Schéma des voies de transfert retenues pour un individu représentatif du groupe de référence hypothétique multi-activités pêcheur chasseur à l'exutoire rivière Ornain (GH6)*

4.2 La description des modèles associés à la biosphère type chaude

Une biosphère chaude subtropicale humide de type Cr est retenue pour l'évaluation des impacts radiologiques et chimiques à long terme (cf. Chapitre 2.11 du présent volume). Ce type de biosphère apparait dans le futur dans le cas de l'évolution du climat selon le scénario d'évolution fortement perturbée par les activités anthropiques (cf. Volume 7 du présent rapport). Un climat chaud de type Cr s'apparente à ce que l'on peut trouver actuellement au nord-ouest de l'Espagne, dans le Languedoc ou au nord de la Provence.

4.2.1 Le rappel du choix des exutoires

Le scénario d'évolution perturbée du climat retarde au-delà de 500 000 ans l'occurrence du prochain maximum glaciaire. Bien que des incertitudes subsistent, cela va engendrer une diminution de l'érosion par incision des vallées et selon les simulations considérant les processus d'érosion, la mise à l'affleurement de l'Oxfordien surviendrait au-delà du million d'années. Sur la base de ces hypothèses, il est fait le choix de retenir les mêmes exutoires que pour la biosphère type tempérée à l'exception de

l'exutoire rivière à l'Ornain non retenu du fait de l'affleurement de l'Oxfordien qui surviendrait au-delà du million d'années donc au-delà de la période sur laquelle sont réalisées les évaluations (33).

Le tableau 4-3 ci-après présente les exutoires retenus pour les évaluations d'impact en biosphère chaude type Cr.

Tableau 4-3 Exutoires retenus pour la biosphère chaude type Cr

Exutoire	Type d'exutoire	Positionnement	Application
Dogger	Artificiel (pompage)	ZFD	Situation de référence Situation enveloppe
Barrois	Artificiel (pompage)	Au droit du stockage dans la ZIOS	Situation de référence Situation enveloppe
Oxfordien	Artificiel (pompage)	ZFD	Situation enveloppe

4.2.2 Les groupes de référence hypothétiques retenus pour les évaluations

Les activités envisageables dans le cas d'une biosphère type subtropicale Cr sont assez similaires à celles que l'on trouve pour une biosphère type tempérée. On retrouvera des activités d'agriculture et d'élevage. Des spécificités vont néanmoins apparaitre sur le type de culture et d'élevage ce qui se traduira par une modification du régime alimentaire et sur les paramètres climatiques qui vont évoluer (précipitations, besoin en irrigation).

Le schéma suivant présente les groupes biosphère retenus pour la biosphère type subtropicale Cr.

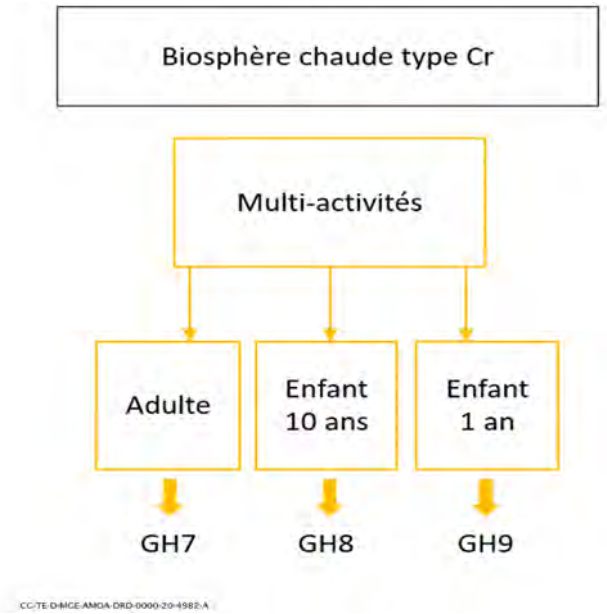


Figure 4-5 Groupes retenus en biosphère subtropicale Cr

4.2.3 Les voies de transfert et la description du groupe de référence hypothétique

Ce groupe se distingue du groupe de référence hypothétique multi-activités considéré en biosphère tempérée par une culture plus intensive de fruits et légumes et un élevage d'ovins important en plus de l'élevage bovin, c'est-à-dire un type d'agriculture et de régime alimentaire proche de ce qui est observé aujourd'hui autour du bassin méditerranéen.

Le schéma de représentation des voies de transferts depuis l'eau extraite par pompage depuis les différents exutoires vers l'homme pour l'adulte du groupe de référence hypothétique multi-activités en biosphère type subtropicale Cr est identique à celui présenté pour la biosphère type tempérée (cf. Figure 4-3). Les voies de transfert sont identiques pour les adultes et les enfants, seules les valeurs des paramètres changent (quantités ingérées par exemple). Le modèle s'applique aux différents exutoires retenus.

Les valeurs des consommations alimentaires retenues ainsi que les valeurs des autres paramètres utiles à la réalisation des calculs associés à la biosphère type chaude et les justifications associées sont présentés dans la note support « Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage » citée en référence (57).

4.3 La description des modèles associés à la biosphère type froide

4.3.1 Le rappel du choix des exutoires

Dans le cas d'un scénario d'évolution climatique perturbé par les activités anthropiques, l'apparition d'une biosphère type boréale sera retardée par rapport au scénario d'évolution climatique naturel mais quel que soit le scénario, une biosphère type boréale va apparaitre à plusieurs reprises sur le prochain million d'années en Meuse/Haute-Marne.

Les caractéristiques majeures de la biosphère boréale telle qu'elle pourrait apparaitre en Meuse/Haute-Marne dans le futur correspondent à une longue période de températures négatives, un gel saisonnier des sols et de certains points d'eau, puis de fortes crues saisonnières dues à la fonte des neiges au printemps qui favorisent l'érosion et le démantèlement des fonds de vallée.

Le choix est fait de retenir les mêmes modèles hydrogéologiques qu'en biosphère type tempérée à savoir le modèle hydrogéologique phénoménologique en situation de référence et le modèle hydrogéologique maximaliste en situation enveloppe et par conséquent les mêmes exutoires et caractéristiques associés.

Le tableau 4-4 ci-après présente les exutoires retenus pour les évaluations d'impact en biosphère froide de type boréale.

Tableau 4-4 Choix des exutoires en biosphère froide type boréale

Exutoire	Type d'exutoire	Positionnement	Application
Dogger	Artificiel (pompage)	ZFD	Situation de référence Situation enveloppe
Barrois	Artificiel (pompage)	Au droit du stockage dans la ZIOS	Situation de référence Situation enveloppe
Oxfordien	Artificiel (pompage)	ZFD	Situation enveloppe
Ornain	Naturel (rivière)	Rivière Ornain	Situation enveloppe

4.3.2 Les groupes de référence hypothétiques retenus pour les évaluations

En biosphère type boréale, les vallées et les versants sont moins accueillants qu'en situation tempérée, avec une période végétative écourtée et un gel saisonnier. Les activités envisageables sont par conséquent un peu plus limitées que celles que l'on trouve pour une biosphère type tempérée. On retrouvera néanmoins des activités d'agriculture et d'élevage compatibles avec un climat plus froid.

Différents types de communautés sont envisageables pour ce type de climat comme des pasteurs semi-nomades qui établissent un campement durant les six mois d'hiver ou des communautés plus sédentaires avec une exploitation agricole.

Pour les évaluations d'impact aux exutoires durant la phase long terme après fermeture, on choisit de retenir une communauté d'exploitation agricole sédentaire qui peut rester plusieurs années au même endroit et ainsi être potentiellement plus exposée.

Deux groupes de référence hypothétiques correspondant à ce type de communauté agricole sont retenus :

- un groupe multi-activités agricoles qui utilise l'eau à travers un pompage au Barrois, au Dogger ou à l'Oxfordien (GH10) ;
- un groupe multi-activités agricoles, pêcheur, chasseur qui utilise l'eau de la rivière Ornain et qui pratique la pêche et la chasse (GH11).

Ces deux groupes sont présentés sur la figure ci-dessous.

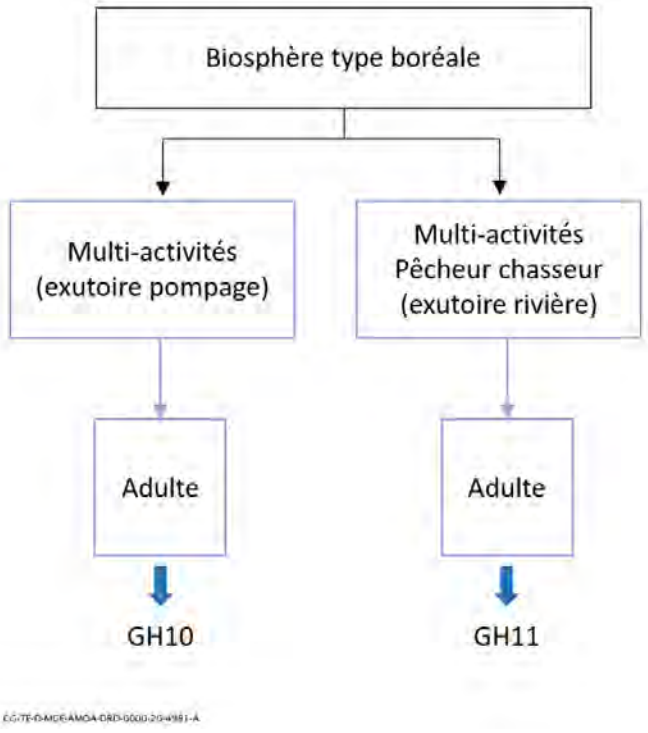


Figure 4-6 Groupes de référence hypothétiques traités en biosphère type boréale

4.3.3 Les voies de transfert et la description des groupes de référence hypothétiques

4.3.3.1 Les voies de transfert du groupe de référence hypothétique multi-activités (exutoire pompage)

Les voies d'expositions associées à ce groupe sont identiques au groupe multi-activités GH1 pour la biosphère type tempérée (cf. Figure 4-3).

L'absence à l'actuel ou dans un passé proche de climat froid type boréal en France ne permet pas de pouvoir disposer d'enquêtes alimentaires pertinentes correspondant à ce genre de climat. Le groupe multi-activités (exutoire pompage) en biosphère type boréale ayant le même type d'activités (cultures, élevage) que les groupes de référence hypothétiques multi-activités considérés en biosphère type tempéré aux exutoires pompage, il est également choisit de se baser sur l'enquête alimentaire locale OPE (60).

4.3.3.2 Les voies de transfert du groupe de référence hypothétique multi-activités pêcheur chasseur (exutoire rivière Ornain)

Les voies d'expositions associées au groupe GH11 de la biosphère type boréale sont identiques à celles du groupe multi-activités pêcheur chasseur (GH6) retenu en biosphère type tempérée (cf. Figure 4-4).

Par ailleurs, comme pour le groupe équivalent en biosphère type tempérée, on considère que les prairies autour de la rivière peuvent potentiellement être inondées et donc contaminer l'herbe ingérée par les bovins.

Le groupe GH11 multi-activités pêcheur chasseur en biosphère type boréale ayant le même type d'activités (cultures de fruits et légumes, élevage, culture de céréales, chasse et pêche en rivière) que le groupe de référence hypothétique multi-activités pêcheur chasseur en biosphère type tempéré, il est fait l'hypothèse qu'ils ont un régime alimentaire assez similaire. Par conséquent, en l'absence d'enquêtes alimentaire pertinente et spécifique à un climat plus froid, on choisit comme pour la biosphère type tempérée de se baser sur l'enquête alimentaire locale de l'OPE (60).

Les valeurs des consommations alimentaires retenues ainsi que les valeurs des autres paramètres utiles à la réalisation des calculs associés à la biosphère type froide et les justifications associées sont présentés dans la note support « Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage » citée en référence (57).

5

La description et la conceptualisation du scénario d'évolution normale

5.1 Les éléments généraux communs aux deux situations 226

5.2 La description et la conceptualisation de la situation de référence 238

5.3 La description et la conceptualisation de la situation enveloppe 275

5.4 Les indicateurs retenus pour vérifier la performance des composants et de l'architecture dans son ensemble 304

5.1 Les éléments généraux communs aux deux situations

5.1.1 Les composants et les voies de transfert potentielles pris en compte pour la description du SEN

Pour mémoire (cf. Chapitre 1 du présent volume), le scénario d'évolution normale est défini pour représenter l'évolution attendue (ou normale) sur le long terme du système de stockage en considérant des événements et processus « certains ou très probables » en cohérence avec les recommandations du guide de sûreté n° 1de l'ASN (1).

Conformément à la démarche mise en œuvre par l'Andra (cf. Chapitres 1, 2 et 3 du présent volume), le scénario d'évolution normale est composé de deux situations, une situation de référence et une situation enveloppe, chacune faisant l'objet d'une définition et d'une évaluation quantitative spécifiques. Ainsi, chacune de ces situations décrit comment les radionucléides et les substances toxiques chimiques contenus dans les déchets vont éventuellement arriver jusqu'à l'homme et l'environnement selon des hypothèses de représentation spécifiques.

La définition de chacune de ces deux situations comporte des choix structurants pour représenter chacun des composants susceptibles de constituer une voie de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques depuis les colis de déchets jusqu'à la biosphère (cf. Chapitre 1 du présent volume) :

- la situation de référence, qui représente le stockage tel que conçu, repose sur un ensemble d'hypothèses et données dont la logique de sélection est de retenir celles qui sont le plus étayées scientifiquement dans la gamme de valeurs disponibles. Elle conduit à retenir des modèles et données qualifiées de « au meilleur de la connaissance » ;
- la situation enveloppe vise à une représentation du stockage correspondant aux exigences applicables à l'installation souterraine de Cigéo. Elle conduit à retenir les valeurs des exigences de sûreté après fermeture ou les performances retenues à la conception. En l'absence d'exigences spécifiées de certaines caractéristiques des composants, le choix porte sur les modèles et valeurs de paramètres qualifiés de conservatifs dans la gamme de valeurs disponibles, c'est-à-dire les valeurs haute ou basse de la gamme de valeurs disponibles pour majorer le transfert des radionucléides et toxiques chimiques vers la biosphère. Les valeurs extrêmes jugées non réalistes selon la connaissance acquise sont exclues. Cette représentation est dénommée « enveloppe ».

Cette description considère ainsi tous les composants du stockage impliqués dans le transfert par la voie Callovo-Oxfordien ou par la voie « ouvrages » qui comprend le réseau de galeries souterraines et les liaisons surface-fond (cf. Figure 5-1).

Pour mémoire (cf. Chapitres 1.5 du présent volume), l'évaluation quantitative des scénarios repose principalement sur la simulation numérique. La maîtrise de la simulation numérique en tant qu'outil pour la quantification des impacts des scénarios nécessite une approche de simulation structurée qui conduit à la conceptualisation phénoménologique et numérique du scénario.

Ainsi, dans la suite du présent chapitre, la description de chacune des deux situations du scénario d'évolution normale, intègre la conceptualisation qui en est faite pour la réalisation des évaluations. Les indicateurs retenus pour le traitement du SEN sont rappelés à la fin de ce chapitre.

La représentation du stockage pour chacune des deux situations du scénario d'évolution normale prend en compte l'état initial du stockage à la fermeture et son évolution sur le long terme en tenant compte de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), notamment des incertitudes résiduelles de connaissance à prendre en compte dans le scénario d'évolution normale.

Les phénomènes qui régissent l'évolution du stockage ne sont pas nécessairement tous représentés. Ils ne sont toutefois pas négligés ou ignorés par l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitres 1 et 2 du présent volume). Par exemple, les deux situations du scénario d'évolution normale décrites dans le présent chapitre considèrent uniquement le transport par l'eau reposant sur un état initial saturé, état jugé « enveloppe » vis-à-vis du transfert de solutés (cf. Chapitre 2 du présent volume). Le transitoire hydraulique-gaz fait l'objet d'études spécifiques (cf. Chapitre 2 du présent volume).

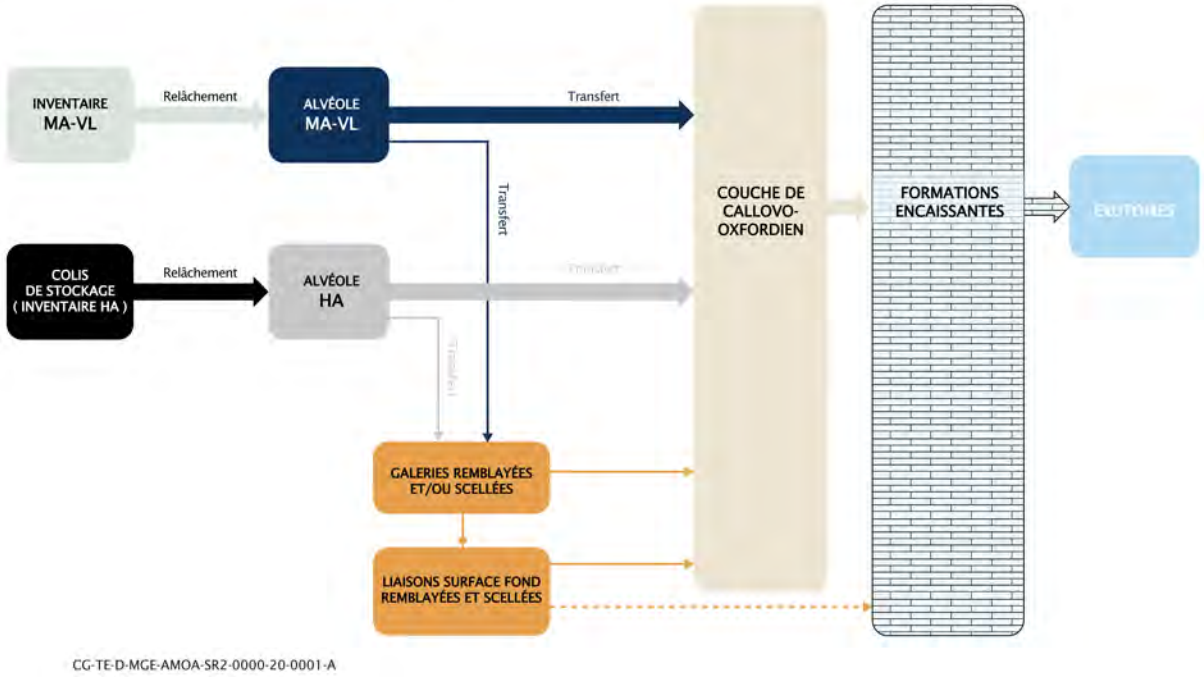


Figure 5-1 *Représentation schématique des composants et voies de transfert potentielles pris en compte pour la description de chacune des situations du scénario d'évolution normale*

Dans un premier temps, les chapitres suivants présentent les principaux aspects communs aux deux situations du scénario d'évolution normale (référence, enveloppe) : les radionucléides et les substances toxiques chimiques retenus, l'architecture de stockage, puis les inventaires en radionucléides et substances toxiques chimiques et leur distribution dans l'architecture. Le chapitre 5.2 du présent volume présente ensuite la description et la conceptualisation de la situation de référence, suivi du chapitre 5.3 du présent volume qui présente la description et la conceptualisation de la situation enveloppe.

5.1.2 Les radionucléides retenus

Sur la base de la liste de 144 radionucléides retenus pour l'inventaire radioactif des colis de déchets de l'inventaire de référence, et compte tenu de l'ordre de grandeur du temps de transfert minimal au sein de la couche du Callovo-Oxfordien et dans le stockage, qui est d'environ de l'ordre de la centaine de milliers d'années dans le contexte de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale (SEN) (cf. Chapitre 6 du présent volume), seuls les radionucléides de l'inventaire initial ayant une période radioactive supérieure à 1 000 ans, soit deux ordres de grandeur sous le temps de transfert minimal, sont considérés. Les radionucléides de période plus courte qui apparaissent par filiation radioactive sont également pris en compte (cf. Tableau 5-1).

Tableau 5-1 Liste des radionucléides retenus pour l'évaluation quantitative du scénario d'évolution normale (chaînes de filiation incluses)

Radionucléide	Période (ans)	Radionucléide	Période (ans)
Be10	1,60E+06	Pb202	5,30E+04
C14	5,70E+03	Pb205	1,53E+07
Al26	7,17E+05	Bi208	3,68E+05
Cl36	3,01E+05	Bi210m	3,00E+06
K40	1,27E+09	Ra226	1,60E+03
Ca41	1,03E+05	Th229	7,34E+03
Mn53	3,68E+06	Th230	7,54E+04
Fe60	1,50E+06	Th232	1,41E+10
Ni59	7,60E+04	Pa231	3,28E+04
Se79	3,77E+05	U233	1,59E+05
Kr61	2,10E+05	U234	2,46E+05
Rb87	4,81E+10	U235	7,04E+06
Zr93	1,53E+06	U236	2,37E+07
Nb92	3,50E+07	U238	4,47E+09
Nb93m	1,60E+01	Np236	1,52E+05
Nb94	2,00E+04	Np237	2,14E+05
Mo93	4,00E+03	Pu239	2,41E+04
Tc97	2,60E+06	Pu240	6,56E+03
Tc98	4,20E+06	Pu242	3,74E+05
Tc99	2,14E+05	Pu244	8,00E+07
Pd107	6,50E+06	An243	7,36E+03
Sn126	2,30E+05	Cm245	8,50E+03
I129	1,61E+07	Cm246	4,73E+03
Cs135	2,30E+06	Cm247	1,60E+07

Radionucléide	Période (ans)
La147	6,00E+04
Sm146	1,00E+06
Gd150	1,82E+06
Dy154	3,00E+06
Ho163	4,57E+03
Ho166m	1,20E+03
Lu176	4,00E+10
Hf182	9,00E+06
Re186m	1,90E+05

Radionucléide	Période (ans)
Cm248	3,40E+05
Cm250	8,00E+03
Bk247	1,38E+03

Chaînes de filiation considérées

Zr93 -> Nb93m

4N (Cm244-> Pu240->U236->Th232->Ra228->Th288)

4N+1 (Cm245->Pu241->Am241->Np237->U233->Th229)

4N+2 (Cm246->Pu242->U238->U234->Th230->Ra226->Pb210)

4N+3 (Am243->Pu239->U235->Pa231->Ac227).

Les éléments chimiques auxquels sont associés les radionucléides se déclinent en deux catégories de comportement physico-chimique, applicables à tous les scénarios de sûreté :

- les éléments mobiles à relativement mobiles et solubles à relativement solubles, dont le transfert est peu ou pas sensible aux conditions physico-chimiques régnant dans les alvéoles, dans la couche du Callovo-Oxfordien et dans les formations encaissantes ; les principaux éléments appartenant à cette catégorie sont l'iode, le chlore, le sélénium (sous sa forme Se(+VI)), le carbone (sous sa forme organique), le potassium, le calcium… :
  - ✓ le carbone est retenu sous forme 100 % organique (sous forme de soluté), sans sorption, et soluble dans les composants cimentaires et dans la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ la limite de solubilité du sélénium (Se) est différentiée entre la forme Se(+VI) et Se(-II/0) au regard de la stabilité de ce dernier dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2 du présent volume) ;
- les éléments peu à très peu mobiles et/ou peu à très peu solubles, dont le transfert est lié aux conditions physico-chimiques ; l'influence du milieu physico-chimique et des perturbations chimiques (perturbation oxydante, organique, saline, alcaline) sur la migration et la rétention des éléments est prise en compte sur la base des conclusions de l'analyse des risques et incertitudes présentée au chapitre 2 du présent volume.

Pour les éléments autres que le sélénium, la spéciation dépend uniquement de l'environnement géochimique et pas de la spéciation dans les déchets.

5.1.3 Les substances toxiques chimiques retenues

Douze substances toxiques chimiques contenues dans les déchets radioactifs sont considérées (cf. Volume 3 du présent rapport) : arsenic, bore, béryllium, cadmium, cyanure libre, chrome, mercure, nickel, plomb, antimoine, sélénium, uranium.

Au regard de leurs propriétés de migration et de rétention dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, dans toutes les situations du scénario d'évolution normale (SEN) et pour les autres scénarios :

- l'amiante n'est pas retenue car elle n'est pas mobilisable par les transferts par l'eau dans le système de stockage de Cigéo ;
- l'influence du milieu physico-chimique et des perturbations chimiques (perturbation oxydante, organique, saline, alcaline) sur la migration et la rétention des éléments est prise en compte sur la base des conclusions de l'analyse des risques et incertitudes présentée au chapitre 2 du présent volume.

Pour les éléments autres que le sélénium dont la forme Se(+VI) reste stable depuis les déchets jusqu'à l'exutoire, la spéciation dépend uniquement de l'environnement géochimique et pas de la spéciation dans les déchets.

5.1.4 L'architecture de stockage retenue

L'architecture retenue pour l'évaluation de sûreté en après-fermeture est une architecture illustrative de ce qu'elle pourrait être à terminaison (cf. Figure 5-2).

Cette architecture illustrative (cf. Volume 5 du présent rapport), comprend une partie centrale avec la base des liaisons surface-fond (puits et descenderies), les zones de soutien logistique (ZSL Exploitation et ZSL Travaux) et les différentes zones de stockage des colis de déchets, indépendantes les unes des autres d'un point vue physico-chimique :

- le quartier pilote HA comprenant jusqu'à une vingtaine d'alvéoles sans préjuger de développements ultérieurs intégrés dans le cadre du déploiement progressif du stockage ;
- le quartier de stockage HA comprenant environ un millier d'alvéoles ;
- le quartier de stockage MA-VL comprenant une vingtaine d'alvéoles dans la boucle, sans préjuger d'évolutions possibles de capacité offertes par la flexibilité du quartier au regard d'évolution du besoin industriel (inventaire, conditionnement, mode de stockage…).

Plusieurs principes généraux de la conception de l'architecture souterraine tirent parti des caractéristiques favorables intrinsèques du Callovo-Oxfordien pour limiter l'effet du stockage sur les écoulements et le transfert des solutés, parmi lesquels (cf. Volume 7 du présent rapport) :

- une architecture de stockage globalement « borgne » (alvéoles HA, quartiers de stockage HA, quartier de stockage MA-VL), ce qui est favorable du point de vue du fonctionnement hydraulique, en limitant la circulation d'eau dans le stockage et privilégiant de très faibles gradients de charge le long des galeries ;
- un regroupement des liaisons surface-fond qui, associé à la borgnitude de l'installation souterraine, limite les effets de drain hydraulique par les galeries de stockage et *in fine* le transfert convectif des solutés ;
- un grand élancement des alvéoles de stockage, permettant de limiter la proportion des solutés susceptibles de migrer vers le(s) extrémité(s) des alvéoles et d'atteindre les galeries d'accès, par rapport à celle migrant au travers du Callovo-Oxfordien.

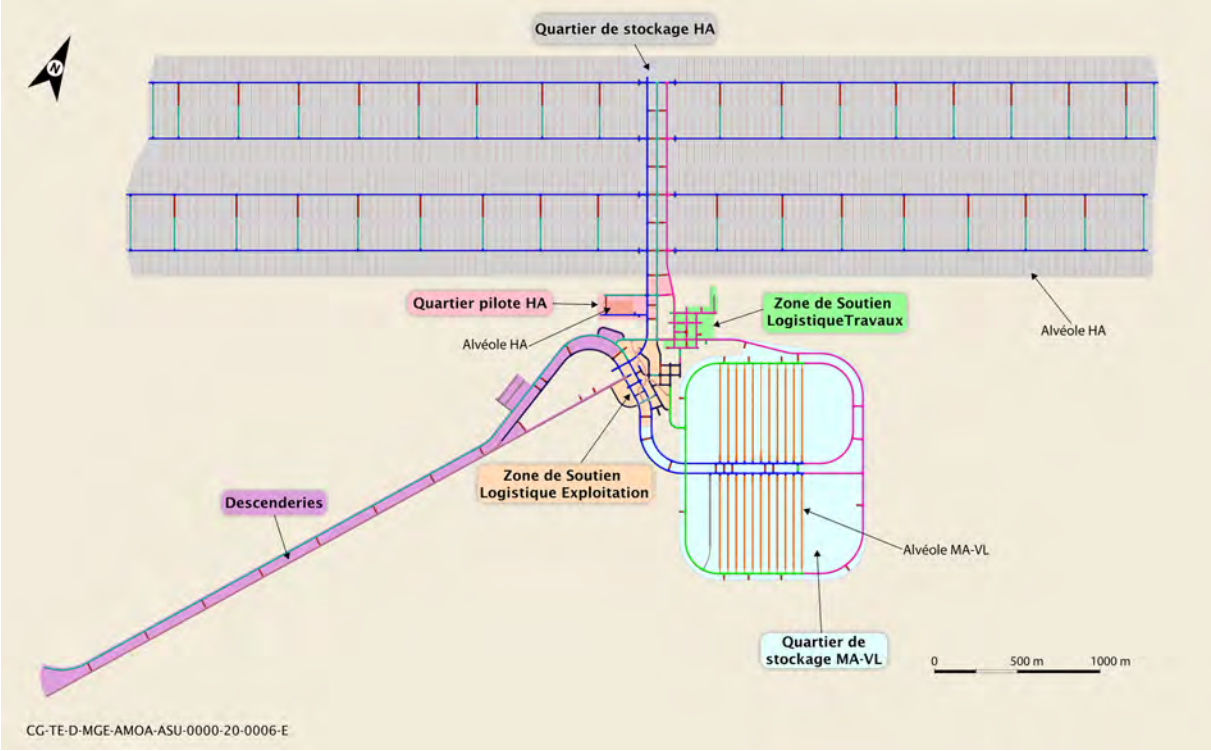


Figure 5-2 Illustration de l'architecture à terminaison retenue pour les évaluations de sûreté en après-fermeture

5.1.5 L'inventaire en radionucléides et sa distribution dans l'architecture de stockage

Les inventaires radiologiques retenus pour l'ensemble des radionucléides étudiés sont les inventaires issus du tableau de construction de l'inventaire (TCI), margés en fonction du degré de connaissances attribué à chaque famille de colis. L'inventaire considéré est détaillé au volume 3 du présent rapport et dans le document « Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage » (57).

La figure 5-3 présente l'inventaire radiologique, exprimé en moles puis en becquerels (Bq), des principaux radionucléides mobiles ou relativement mobiles (carbone 14, chlore 36, potassium 40, calcium 41, sélénium 79, iode 129), dans le quartier pilote HA, le quartier de stockage HA et le quartier de stockage MA-VL.

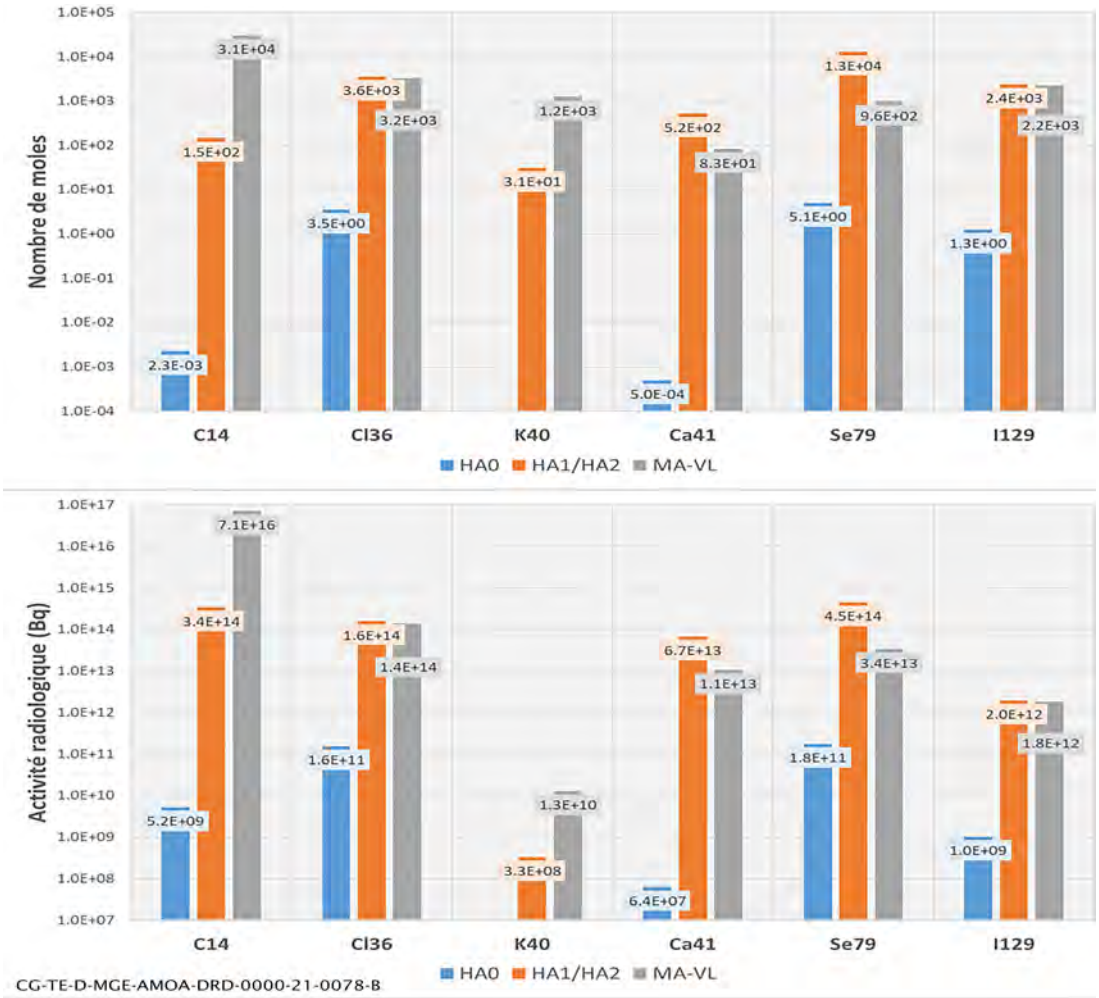


Figure 5-3 *Inventaires radiologiques des principaux radionucléides mobiles ou relativement mobiles (carbone 14, chlore 36, potassium 40, calcium 41, sélénium 79, iode 129) dans le quartier pilote HA et les quartiers de stockage HA et MA-VL*

5.1.5.1 La distribution des inventaires HA

La distribution retenue pour les inventaires HA, pour les deux situations du SEN, est déterminée en relation avec le dimensionnement thermique (cf. Volume 7 du présent rapport) sur lequel s'appuie l'architecture illustrative du stockage à terminaison présentée en figure 5-2. Comme indiqué au chapitre 2.3.2.3.1 du présent volume, les quartiers de stockage HA sont situés en aval hydraulique de la base des liaisons surface-fond (LSF), l'importance de cette voie de transfert est donc limitée.

La figure 5-4 et la figure 5-5 présentent respectivement la distribution des familles de colis au sein du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA, sur la base du descriptif de l'architecture de stockage à terminaison illustrative.

NOTA : DÉSIGNATION DES FAMILLES DE COLIS UTILISÉES POUR LES ÉVALUATIONS

À des fins de traitement numérique/informatique, la désignation des familles de colis utilisée pour les évaluations est réalisée comme suit : (i) remplacement du « tiret » par un « *underscore* » et (ii) ajout d'un « 0 » lorsque la partie numérique du nom initial ne possède que 3 chiffres, afin d'aboutir à un codage général des familles de colis sur quatre digits. Ainsi, à titre d'exemple, COG-150 devient COG_0150.

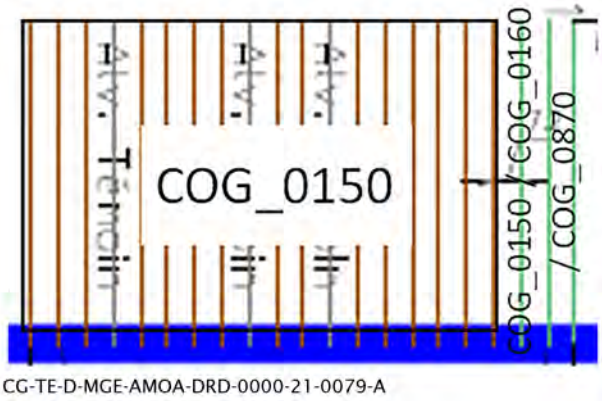


Figure 5-4 *Illustration de la distribution des familles de colis retenue au sein du quartier pilote HA*

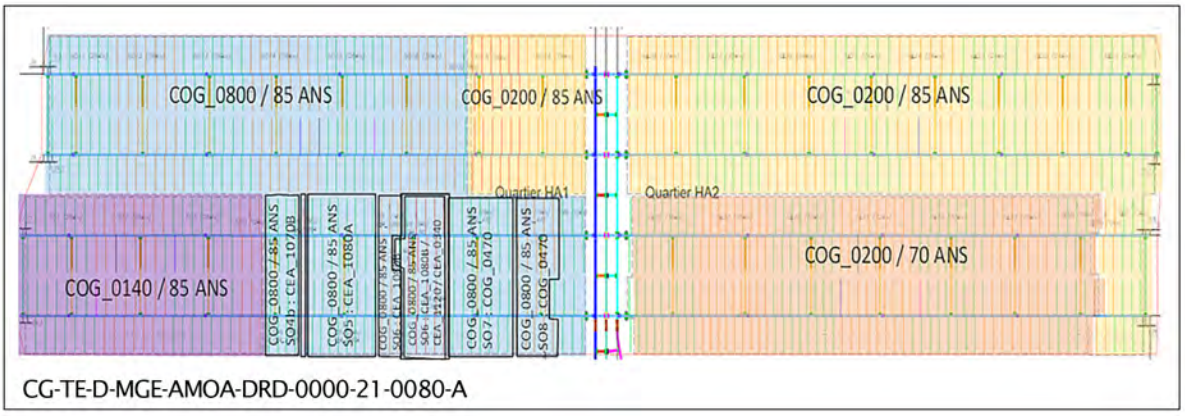


Figure 5-5 *Illustration de la distribution des familles de colis retenue au sein du quartier de stockage HA*

5.1.5.2 La distribution des inventaires MA-VL

Conformément à l'analyse des risques et des incertitudes présentées au chapitre 2 du présent volume, le mode de distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein du quartier et au sein des alvéoles de stockage MA-VL correspond à une distribution « fictive » dont l'objectif est de tester la robustesse du stockage en cas de dysfonctionnement des scellements, sachant qu'elle n'a pas d'incidence en scénario d'évolution normale.

La distribution de l'inventaire des colis MA-VL dans l'architecture à terminaison illustrative, appliquée aux deux situations du SEN, se base sur les principes suivants :

- le radionucléide iode 129 retenu comme « pilote » compte tenu de sa période radioactive très longue ($1{,}6 \times 10^7$ ans) et de son caractère mobile dans les différents compartiments du stockage ;
- la redistribution de l'inventaire est réalisée en considérant de manière fictive une répartition des alvéoles entiers ayant les plus fortes activités en radionucléide « pilote » à partir du coin nord-est du quartier de stockage MA-VL (à proximité de la galerie de recoupe) les plus susceptibles de contribuer à des sorties par les liaisons surface-fond dans les scénarios de dysfonctionnement des ouvrages. Ce mode de répartition conduit à concentrer l'essentiel de l'inventaire dans quelques alvéoles situés au nord-est du quartier de stockage MA-VL. Cette répartition illustrée par la figure 5-6 par alvéoles entiers respecte par ailleurs les règles de co-stockage géométrique et physico-chimique des colis (cf. Volume 3 du présent rapport) ;

- dans chaque alvéole, les familles de colis sont ensuite « fictivement » reclassées du nord au sud, en fonction de leur activité linéique pour le radionucléide « pilote », de manière à rapprocher les plus fortes activités en iode 129 du point de sortie potentiel (au niveau de la galerie de jonction au nord-est) ;
- la distribution des activités radiologiques des autres radionucléides est par construction déterminée par la distribution des activités radiologiques en iode 129 (radionucléide « pilote » retenu).

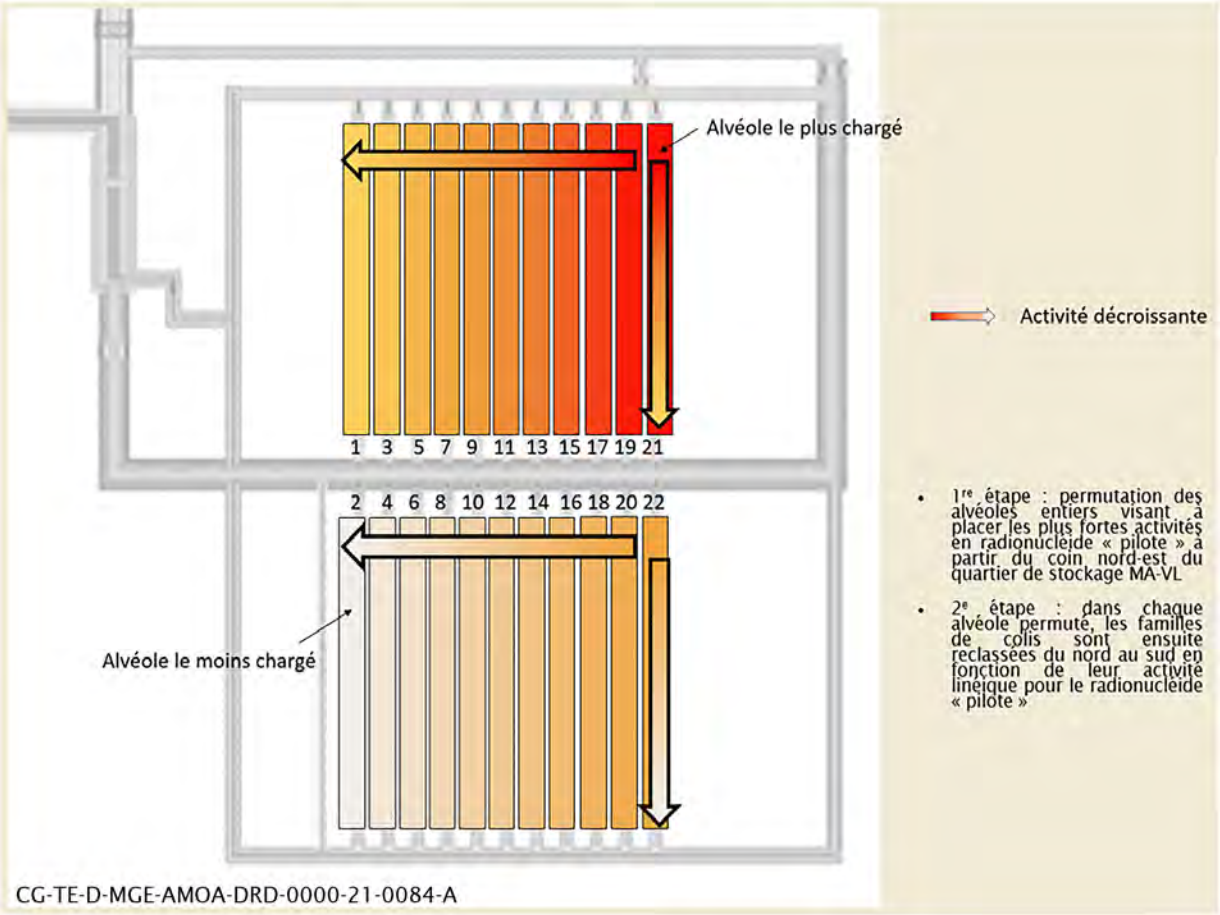


Figure 5-6 Mode de répartition de l'inventaire radiologique MA-VL retenu pour le traitement quantitatif des deux situations du SEN

Appliquant ce mode de répartition, la figure 5-7 illustre la répartition fictive « enveloppe » de l'inventaire des colis de déchets au sein du quartier de stockage MA-VL, en retenant l'iode 129 comme radionucléide « pilote ».

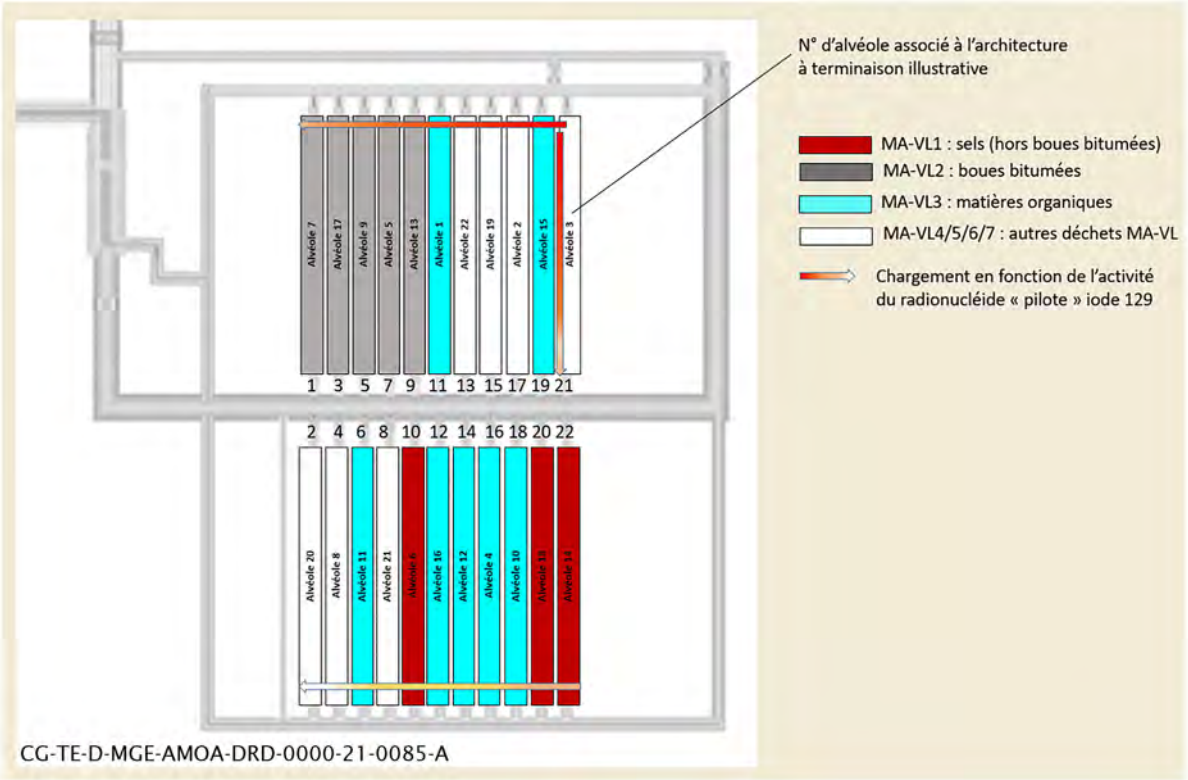


Figure 5-7 *Illustration de la répartition de l'inventaire radiologique MA-VL retenue pour le traitement du SEN avec l'iode 129 comme radionucléide « pilote »*

De façon corollaire, la figure 5-8 illustre de façon plus précise la distribution des familles de colis de déchets[48] retenues pour l'ensemble des radionucléides au sein du quartier de stockage MA-VL, en retenant l'iode 129 comme radionucléide « pilote ».

[48] La désignation des familles de colis MA-VL pour les évaluations suit le même principe que celle des familles de colis HA (cf. NOTA du chapitre 5.1.5.1 du présent volume précisant cette désignation).

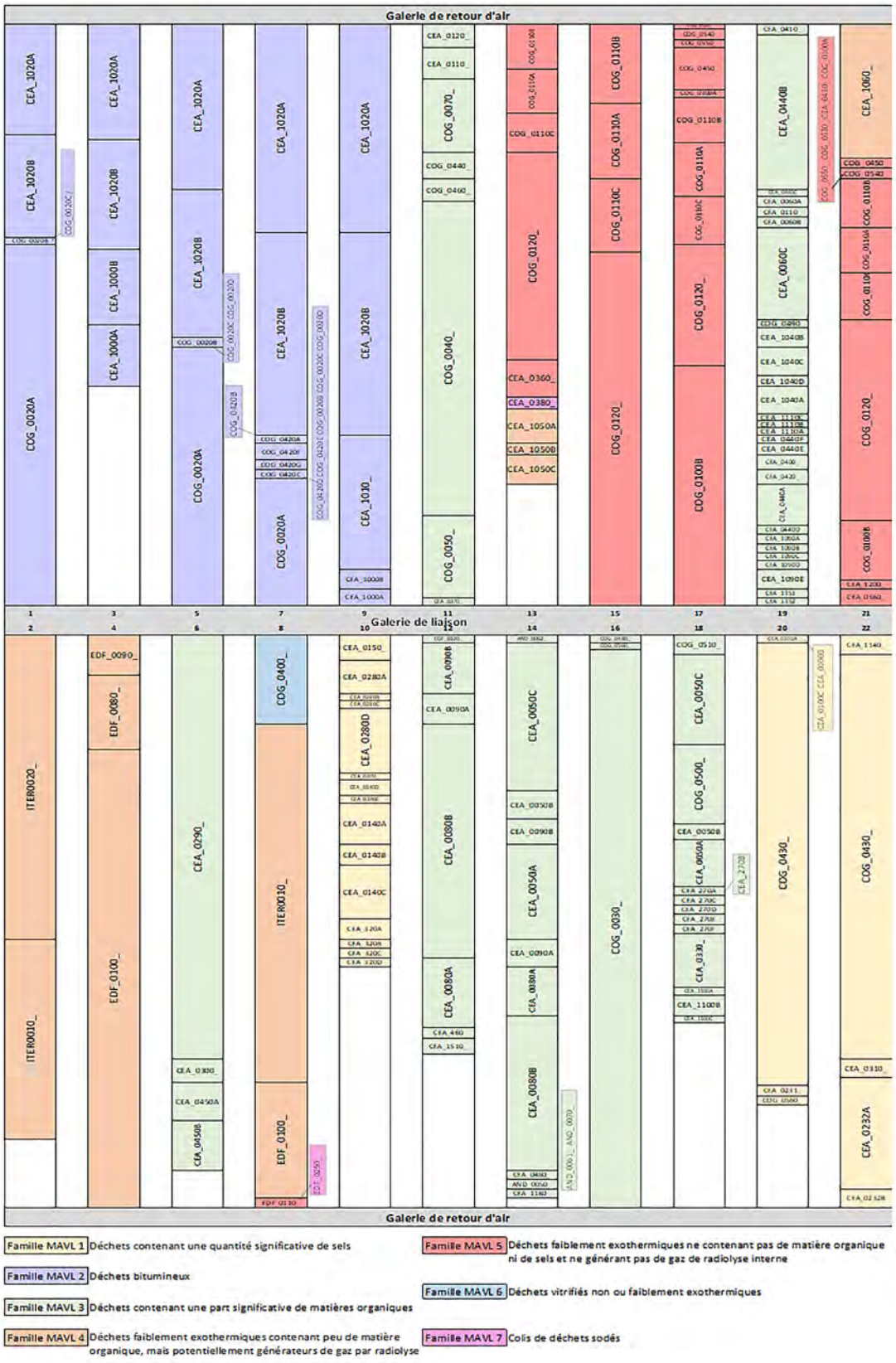


Figure 5-8 *Illustration de la distribution des familles de colis retenue au sein du quartier de stockage MA-VL avec l'iode 129 comme radionucléide « pilote »*

5.1.6 L'inventaire en substances toxiques chimiques et sa distribution dans l'architecture de stockage

L'inventaire en substances toxiques chimiques est établi conformément à la démarche exposée dans le volume 3 du présent rapport (et le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)) pour chaque famille de colis de déchets à l'échelle du colis moyen sur la base des informations fournies par les producteurs au titre du déchet pour l'ensemble des substances toxiques chimiques, de la matrice verre pour le bore, des écrans pour le plomb, et des enveloppes primaires en inox pour le chrome et le nickel.

Conformément à la démarche (cf. Chapitre 1 du présent volume), seul l'inventaire au titre des déchets est pris en compte dans le SEN.

À titre illustratif, la figure 5-9 indique l'inventaire massique, exprimé en kilogrammes, des substances toxiques chimiques mobiles ou relativement mobiles (bore, sélénium, cyanure, mercure, arsenic, uranium), dans le quartier pilote HA, le quartier de stockage HA et le quartier de stockage MA-VL.

La distribution de l'inventaire en substances toxiques chimiques dans l'architecture à terminaison, identique pour les deux situations du SEN, suis celle retenue pour les radionucléides. Plus particulièrement pour les inventaires MA-VL, la distribution est celle induite par la distribution de l'inventaire radiologique du radionucléide « pilote » iode 129 dans le quartier de stockage MA-VL et les alvéoles MA-VL.

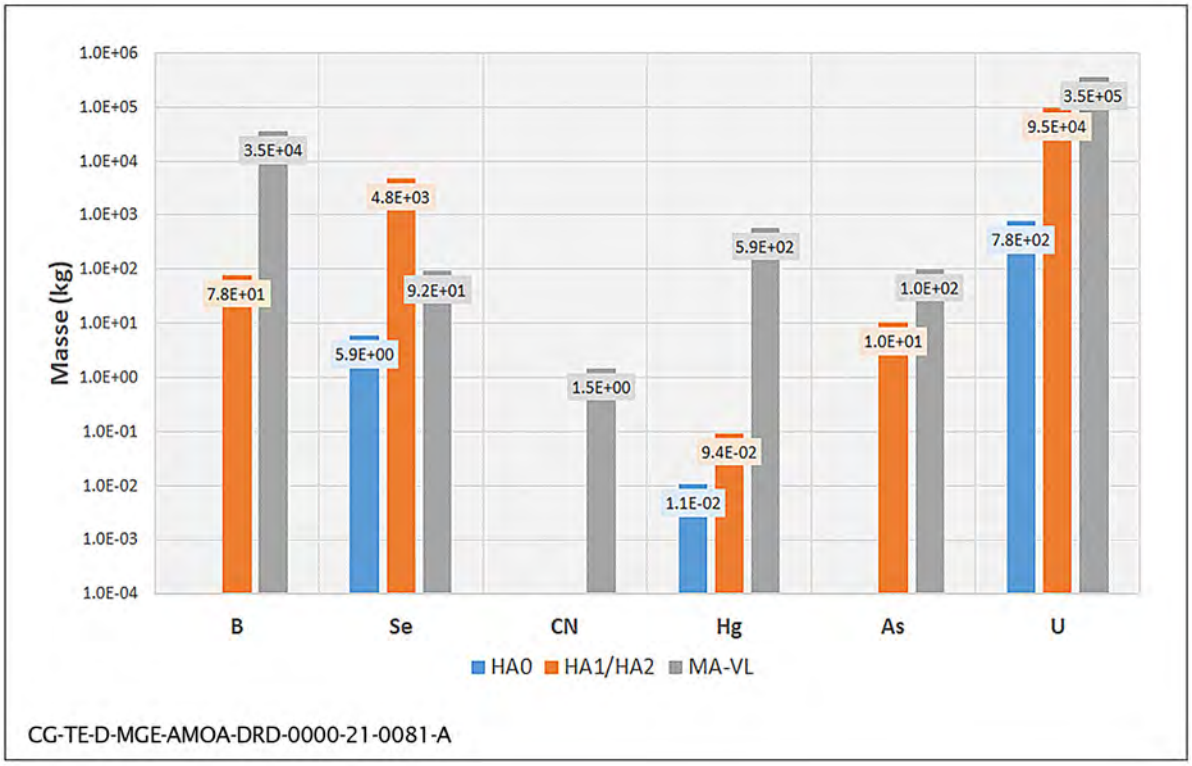


Figure 5-9 *Inventaires massiques des principales substances toxiques chimiques mobiles ou relativement mobiles (bore, sélénium, cyanure, mercure, arsenic, uranium) dans le quartier pilote HA et les quartiers de stockage HA et MA-VL*

5.2 La description et la conceptualisation de la situation de référence

Les données utilisées pour le traitement du scénario d'évolution normale (SEN) en situation de référence et les hypothèses associées sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.1 La position du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien

En situation de référence, il est considéré la profondeur d'implantation « réaliste »[49] des ouvrages souterrains au sein de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Volume 5 du présent rapport).

Les épaisseurs de gardes supérieures et inférieures sont déduites de la profondeur d'implantation, et définies en tenant compte de l'épaisseur réelle de la couche du Callovo-Oxfordien dans la ZIOS et en soustrayant l'extension verticale maximale de l'endommagement mécanique en voûte et radier des ouvrages. Dans cette situation, les épaisseurs de garde saine de part et d'autre sont supérieures au minimum exigé (50 mètres) au droit des alvéoles de stockage HA et MA-VL. Elles sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

D'un point de vue conceptuel, le positionnement vertical des ouvrages souterrains au sein du Callovo-Oxfordien en situation de référence est schématiquement représenté sur la figure 5-10. L'indication sur le schéma de la fonction « f(x, y, z) » traduit le fait que le positionnement vertical des alvéoles ou groupes d'alvéoles, et donc l'épaisseur des gardes saines du Callovo-Oxfordien associées, dépend de la localisation (x, y) de ces alvéoles (ou de ce groupe d'alvéoles) dans l'architecture à terminaison illustrative.

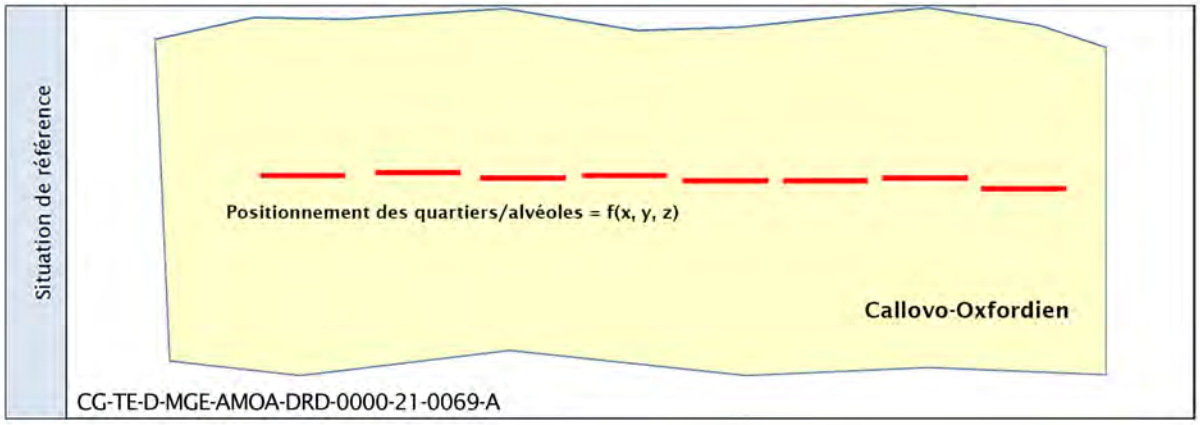


Figure 5-10 Représentation schématique du positionnement vertical des ouvrages souterrains de l'installation souterraine de Cigéo au sein de la couche du Callovo-Oxfordien pour la situation de référence

[49] Prise en compte de la cote verticale d'implantation de l'architecture illustrative dans la couche du Callovo-Oxfordien. Les gardes inférieures et supérieures sont déduites à partir des cotes locales du toit et du mur de la couche du Callovo-Oxfordien et intègrent le pendage et les variations d'épaisseurs de cette dernière.

5.2.2 La couche du Callovo-Oxfordien

5.2.2.1 La couche du Callovo-Oxfordien saine[50]

Les principales caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien se basent sur les connaissances acquises et l'analyse des risques et des incertitudes résiduelles associées présentée au chapitre 2 du présent volume.

5.2.2.1.1 La géométrie du Callovo-Oxfordien et les gardes associées

Le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien sont respectivement assimilés aux surfaces SNC (surface de non-conformité) et LS0 (limite de séquence 0). L'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien est de 153 mètres en moyenne sur la ZIOS et varie de 142 mètres à 162 mètres du sud-ouest vers le nord-est, conformément à la direction principale des apports de sédiments. Pour un stockage implanté de manière « réaliste » (cf. Note de bas de page du chapitre 5.2.1 du présent volume) au sein de la couche du Callovo-Oxfordien en situation de référence, il en est déduit des gardes supérieure et inférieure de Callovo-Oxfordien. Au droit du quartier de stockage HA, la variabilité de la garde supérieure, respectivement inférieure, est de 60 mètres à 100 mètres, respectivement de 85 mètres à 60 mètres, du sud-ouest vers le nord-est de la ZIOS. Au droit du quartier de stockage MA-VL, la garde d'argile (supérieure ≈ inférieure) est d'environ 60 mètres en tenant compte de la dimension des alvéoles MA-VL et de celles des zones endommagées mécaniquement autour des alvéoles MA-VL.

La couche du Callovo-Oxfordien est représentée sous la forme d'une couche homogène latéralement et verticalement et exempte de fractures (cf. Chapitre 2 du présent volume).

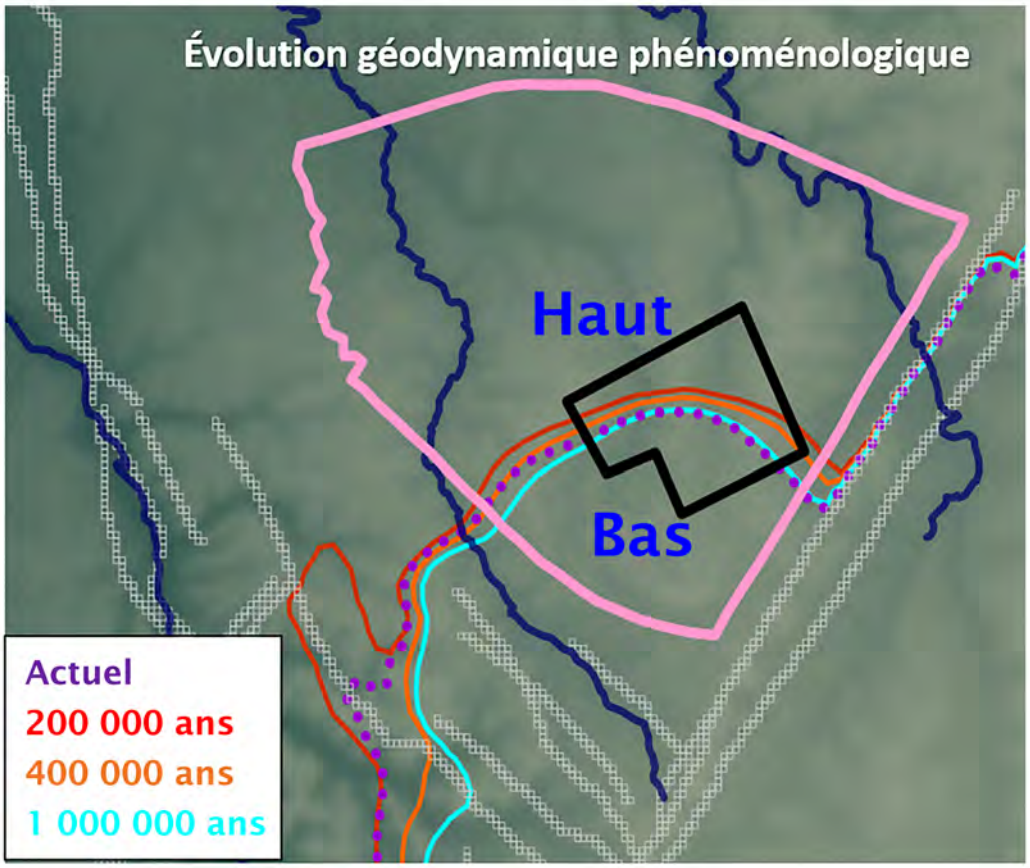
5.2.2.1.2 Les gradients de charge hydrauliques verticaux

L'évolution dans le temps des charges hydrauliques dans l'Oxfordien et le Dogger a une influence sur l'évolution du gradient de charge hydraulique vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien, moteur du transfert convectif au sein des composants de l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo. L'évaluation de ce gradient est effectuée sans tenir compte de la surpression interstitielle (cf. Chapitre 2 du présent volume). Le gradient retenu pour la situation de référence est ainsi déterminé par les charges des encaissants supérieurs et inférieurs, et l'épaisseur de Callovo-Oxfordien. Les évolutions des écoulements dans les formations encaissantes, l'Oxfordien carbonaté et le Dogger, induites par une évolution géodynamique phénoménologique, au cours du prochain million d'années, influencent leurs échanges hydrauliques à travers le semi-perméable de la formation du Callovo-Oxfordien.

La position à l'actuel de la limite séparant les écoulements descendants des écoulements ascendants dite « ligne d'inversion du gradient vertical de charge » est affectée par l'évolution géodynamique.

Le scénario d'évolution géodynamique phénoménologique (applicable à la situation de référence) est caractérisé par un déplacement de la ligne d'inversion du gradient de quelques centaines de mètres en direction du nord-ouest, jusqu'à environ 400 000 ans, puis un retour vers la position à l'actuel au-delà, pour retrouver la position initiale (à l'actuel) à un million d'années (cf. Volume 7 du présent rapport et chapitre 2 du présent volume). Cette faible évolution s'explique par une surrection tectonique de faible amplitude et par le maintien sous couverture de l'aquifère de l'Oxfordien dans la vallée de l'Ornain, qui conduit à peu modifier l'organisation des charges hydrauliques dans les encaissants (cf. Figure 5-11).

[50] Le terme « saine » signifie la couche d'argile du Callovo-Oxfordien sans endommagement mécanique.



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0072-C

Figure 5-11 *Gradients de charge hydraulique ascendants verticaux dans la couche du Callovo-Oxfordien pour le scénario d'évolution géodynamique phénoménologique applicable pour la situation de référence*

La figure 5-12 présente les lignes d'iso-gradient de charge hydraulique au droit de la ZIOS, avec la ligne d'iso-gradient nul partageant les zones à gradients montants (au nord de la ligne) et descendants (au sud de la ligne).

En situation de référence, il est retenu les gradients de charge hydraulique verticaux « *best-estimate* » estimés par modélisations hydrogéologiques et considérant la géométrie réelle de la couche du Callovo-Oxfordien et le positionnement des différents ouvrages de stockage dans la ZIOS. Le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA se situent dans une zone à flux d'eau ascendant dont le gradient de charge hydraulique varie entre 0 $m.m^{-1}$et 0,08 $m.m^{-1}$; alors que la majorité du quartier de stockage MA-VL est localisée dans une zone à flux d'eau descendant avec un gradient de charge hydraulique variant de 0 $m.m^{-1}$ à -0,02 $m.m^{-1}$ (cf. Figure 5-12).

Compte tenu d'une absence d'évolution du sens et de l'intensité des écoulements horizontaux dans l'Oxfordien sur le prochain million d'années au droit de la ZIOS, il est pris en compte, en situation de référence, un gradient de charge horizontal d'intensité 3×10^{-3} $m.m^{-1}$ globalement orienté vers le nord et appliqué de manière uniforme et pérenne sur le million d'années.

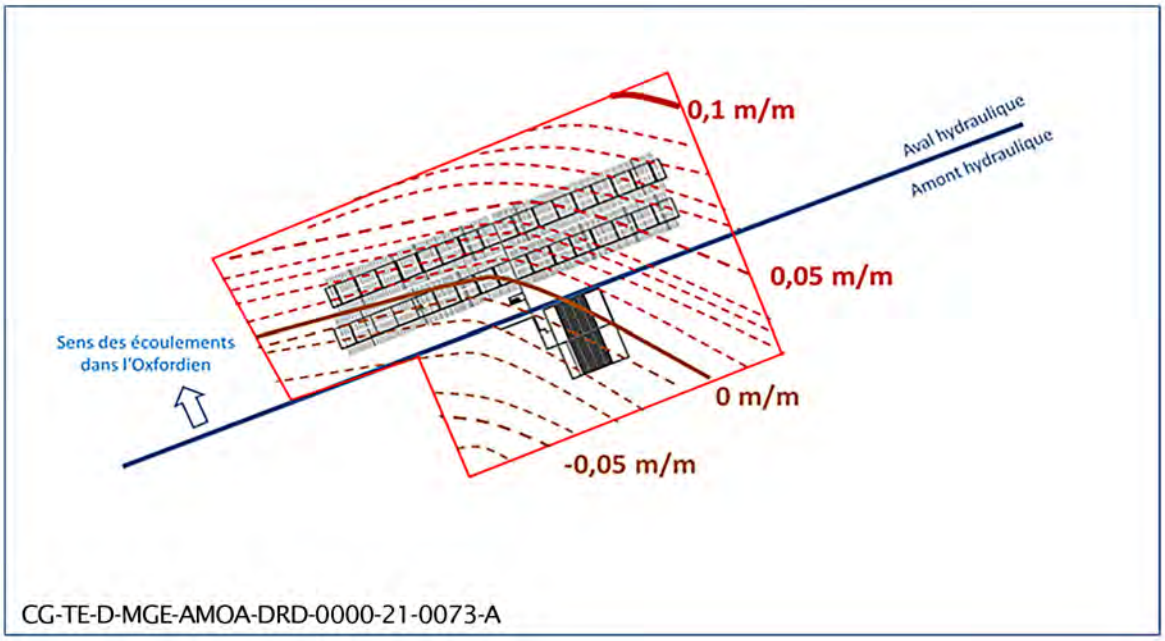


Figure 5-12 *Cartographie des gradients de charge hydraulique verticaux dans la couche du Callovo-Oxfordien à l'actuel (applicable pour la situation de référence) pour l'architecture à terminaison illustrative*

La figure 5-13 illustre la combinatoire des gradients de charge hydraulique vertical (dans la couche du Callovo-Oxfordien) et horizontal (dans l'Oxfordien) considérés pour la situation de référence. L'intensité du régime hydraulique dans les ouvrages remblayés est fonction du gradient de charge hydraulique vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien, mais également du gradient de charge hydraulique horizontal dans les encaissants supérieurs (Oxfordien).

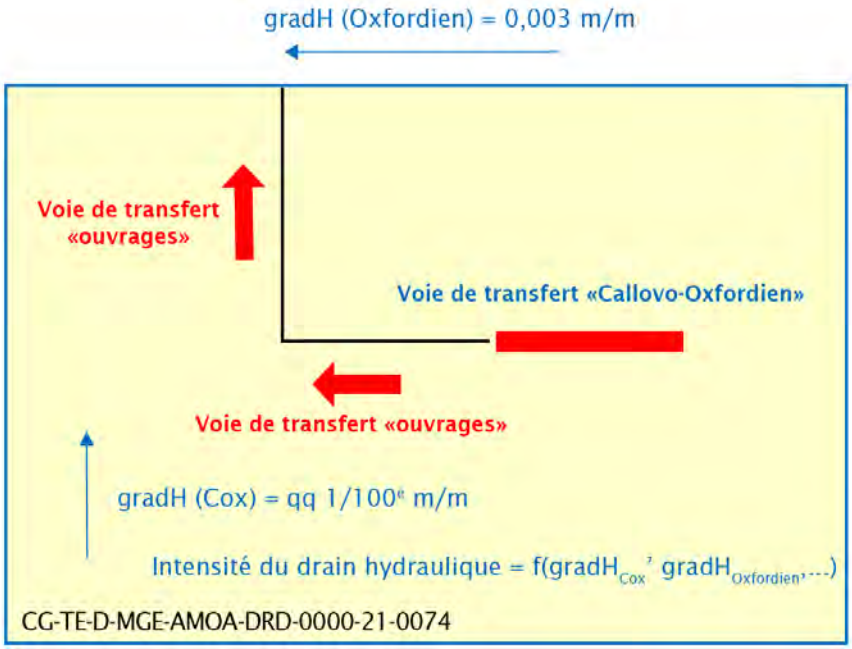


Figure 5-13 *Combinatoire des gradients de charge hydraulique (vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien et horizontal dans l'Oxfordien) retenue pour la situation de référence*

5.2.2.1.3 Les mécanismes et paramètres hydrauliques et de transfert des solutés

a) Les mécanismes hydrauliques et de transfert des solutés

Sur la base de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), le Callovo-Oxfordien, les encaissants et les ouvrages de stockage sont considérés comme des milieux poreux continus équivalents à propriétés hydro-dispersives constantes dans le temps, saturés en eau dès l'instant initial (régime hydraulique permanent). Les mécanismes de transfert des solutés sont la convection, la diffusion et la dispersion avec prise en compte de la décroissance radioactive des radionucléides. La sorption et la précipitation chimique sont également considérés dans l'ensemble des matériaux pour les éléments concernés par la rétention.

Les conditions aux limites hydrauliques et de transfert de solutés sont constantes dans le temps.

b) Les valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert des solutés

En situation de référence, les valeurs retenues pour les paramètres hydrauliques, de transfert de solutés et de rétention chimique[51] sont les valeurs de référence, phénoménologiques ou « *best-estimate* », définies au meilleur des connaissances selon la démarche présentée au chapitre 1 du présent volume et l'analyse des risques et incertitudes présentée au chapitre 2 du présent volume. Les valeurs de dispersivités longitudinales et verticale sont définies de manière conventionnelle. Les valeurs retenues pour tous ces paramètres sont présentées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

Au regard des connaissances acquises, et en tenant compte d'une anisotropie de la conductivité hydraulique d'un facteur trois entre les deux directions (horizontale et verticale), les valeurs de conductivité hydraulique retenues pour le Callovo-Oxfordien sain sont de 7×10^{-14} m.s^{-1} dans la direction verticale et 2×10^{-13} m.s^{-1} dans la direction horizontale. Les valeurs du coefficient de diffusion et des paramètres de rétention chimique (coefficient de partage, limite de solubilité) sont les valeurs de référence du référentiel de connaissances (cf. « Le comportement des radionucléides et des toxiques chimiques » (32)).

Les valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert de solutés, ainsi que les valeurs des paramètres de rétention chimique par sorption et précipitation, retenues pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79 (principaux radionucléides mobiles), sont indiquées respectivement dans le tableau 5-4 et le tableau 5-5 du chapitre 5.2.9 du présent volume (à la fin du chapitre 5.2 du présent volume décrivant la situation de référence).

5.2.2.2 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains

5.2.2.2.1 La représentation et l'extension de l'endommagement

Comme décrits au volume 7 du présent rapport et retenus lors de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), l'endommagement mécanique des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien (à la suite des opérations de construction du stockage) est conceptualisé par une zone fracturée connectée (ZFC) et une zone à fracturation discrète (ZFD).

L'endommagement mécanique est représenté de manière continue le long des ouvrages, hormis au droit des zones de dépose du revêtement-soutènement (*i.e.* Au niveau des ouvrages de fermeture), sur toute la durée des évaluations.

[51] En l'absence de mesure ou d'analogie pour un élément, il n'est pas considéré de rétention chimique.

Leur représentation en situation de référence prend en compte :

- la différence de comportement selon l'unité (UA, USC/UT) de la couche du Callovo-Oxfordien (*i.e.* ZFC représentée autour des ouvrages dans l'UA avec une extension « médiane » de l'endommagement et absence de ZFC dans l'USC et l'UT) ;
- les processus d'auto-colmatage et de cicatrisation hydraulique (fermeture mécanique des fractures ; *i.e.* La ZFD n'est pas représentée en situation de référence) ;
- la géométrie et la proportionnalité de l'extension de l'endommagement par rapport au diamètre et à l'orientation de l'ouvrage excavé selon la contrainte principale majeure ou mineure (extension « médiane ») ;
- la géométrie et la proportionnalité de l'extension de l'endommagement de la ZFC par rapport au taux de vide des alvéoles et au foisonnement des argilites sur le long terme (ZFC-f).

Par simplification, les zones de fracturation initiales liées au creusement (ZFC-0) sont représentées par des cercles de surface équivalente à celles des ellipses représentant l'endommagement (cf. Figure 5-14). Également, les différentes galeries étant orientées selon la contrainte majeure ou la contrainte mineure, il est choisi pour l'ensemble des galeries l'orientation correspondant à la plus grande surface (*i.e.* σ_h).

Comme défini au chapitre 2 du présent volume, la surextension de la ZFC liée au foisonnement des alvéoles de stockage HA et MA-VL (ZFC-f) est également prise en compte dans les évaluations. Sa représentation conceptuelle au droit des alvéoles de stockage HA et MA-VL est détaillée respectivement aux chapitres 5.2.3 et 5.2.4 du présent volume.

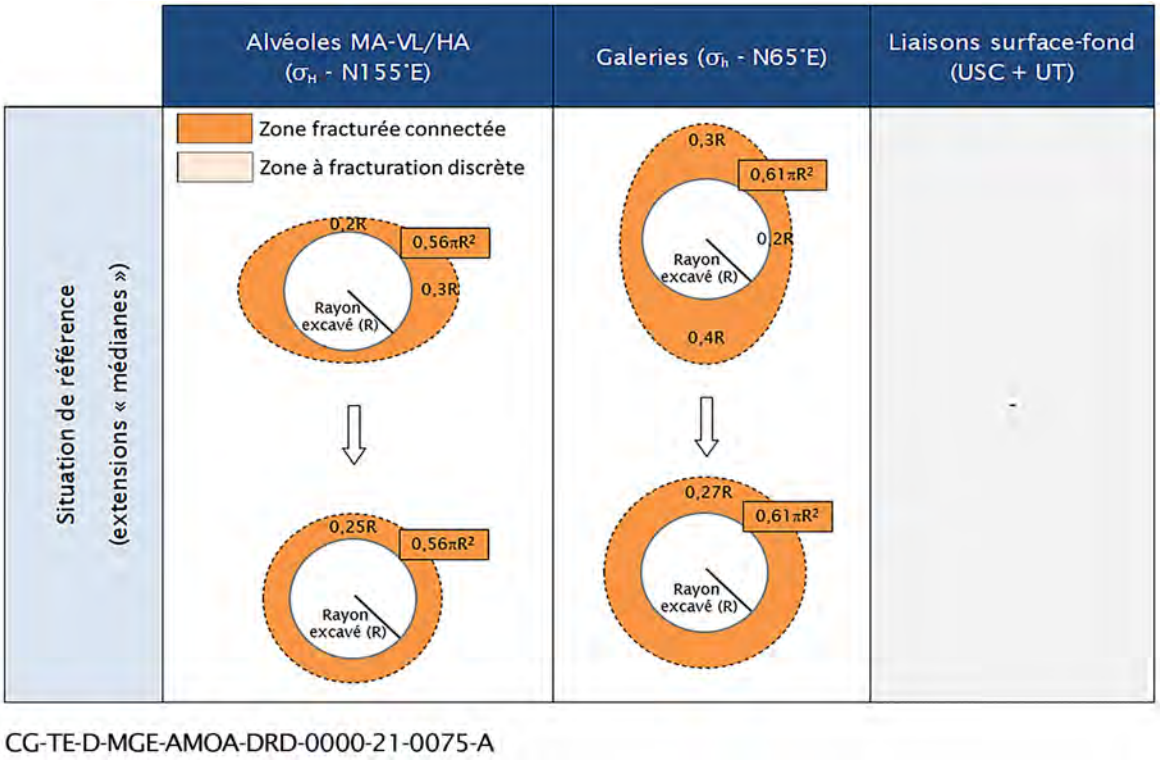


Figure 5-14 *Schéma de conceptualisation de l'endommagement mécanique (zones de fracturation connectée et à fracturation discrète) en situation de référence*

5.2.2.2.2 Les propriétés hydro-dispersives et de rétention chimique de la zone endommagée

Conformément à la démarche (cf. Chapitre 1 du présent volume) et l'analyse présentée au chapitre 2 du présent volume, les propriétés de la ZFC en situation de référence sont définies au meilleur des

connaissances. Elles sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

La zone de sur-endommagement (ZFC-f) liée au foisonnement des argilites au droit des alvéoles HA et MA-VL est représentée avec les mêmes paramètres hydro-dispersifs et de rétention chimique que la ZFC initiale issue du creusement des alvéoles (ZFC-0).

La conductivité hydraulique de la ZFC-0 et de la ZFC-f prend en compte la cicatrisation hydraulique. Suivant l'analyse présentée au chapitre 2 du présent volume, des facteurs correctifs sont appliqués aux valeurs des paramètres de diffusion de la couche du Callovo-Oxfordien, les valeurs des paramètres de solubilité et de sorption restant identiques à celles du Callovo-Oxfordien non endommagé mécaniquement (62).

5.2.2.3 Le transitoire thermique

Comme défini au chapitre 2 du présent volume, l'influence du transitoire thermique est prise en compte dans la couche du Callovo-Oxfordien (endommagée mécaniquement ou non) au droit des quartiers de déchets exothermiques dans le volume de roche évalué par modélisation (cf. Figure 5-15).

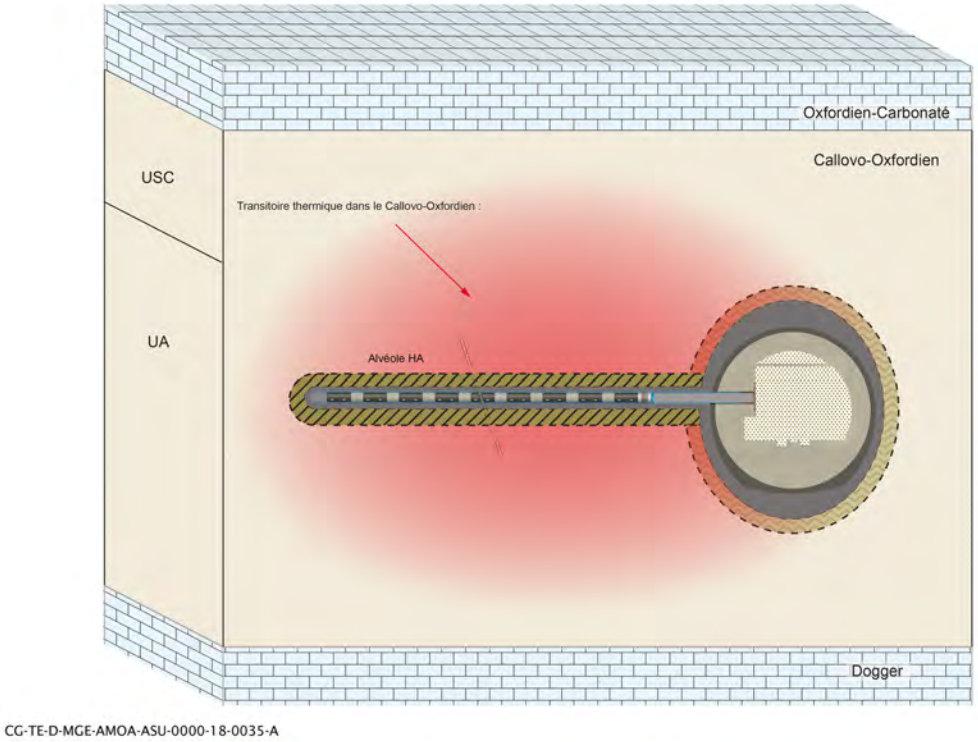


Figure 5-15 Représentation schématique de la zone affectée par le transitoire thermique autour d'un alvéole HA

L'influence de la température sur les propriétés de transport et de rétention chimique est prise en compte par l'application de facteurs correctifs aux valeurs de coefficient de diffusion effectif (dans une zone restreinte d'environ une dizaine de mètres, de part et d'autre des alvéoles HA) et à celles des paramètres de rétention de certains éléments chimiques. Ces facteurs correctifs sont détaillés dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.2.4 La perturbation alcaline de la couche du Callovo-Oxfordien

Conformément à l'analyse présentée au chapitre 2 du présent volume, le panache alcalin issu de la dégradation par hydrolyse des matériaux cimentaires est représenté par deux zones :

- une première dite « reminéralisée » correspondant à une modification importante des caractéristiques texturales, minéralogiques et géochimiques des argilites ;
- une deuxième dite « zone influencée » correspondant à une zone d'argilites peu ou non reminéralisées mais avec un pH et une concentration en potassium élevés.

L'extension spatio-temporelle des deux zones considère de manière pénalisante la dégradation de bétons dits « usuels » afin de maximiser l'extension de la perturbation alcaline de la couche du Callovo-Oxfordien.

Les volumes de roche concernés correspondent à l'extension spatio-temporelle maximale appliquée dès l'instant initial (cf. Volume 7 du présent rapport).

L'extension de la perturbation alcaline étant inférieure à celle de la ZFC-0, elle n'est pas représentée dans la couche du Callovo-Oxfordien non endommagée mécaniquement ou la ZFC-f.

L'influence de la perturbation alcaline sur les propriétés de transport et de rétention chimique est prise en compte par l'application de facteurs correctifs aux valeurs des paramètres hydro-dispersifs et de rétention de certains éléments chimiques. Ces facteurs correctifs sont détaillés dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.2.5 Les perturbations chimiques issues des déchets MA-VL

Conformément aux éléments présentés dans l'analyse des risques et incertitudes au chapitre 2 du présent volume, les perturbations salines et organiques sont représentées respectivement au droit des alvéoles MA-VL contenant des déchets salins (familles physico-chimique MA-VL 1 et 2) ou des composés organiques (MA-VL 1, 2 et 3).

Les zones d'extension des perturbations chimiques retenues et appliquées durant toute la simulation (un million d'années) sont issues des extensions maximales définies par des évaluations préparatoires[52] s'appuyant sur les colis de déchets les plus chargés en sels et organiques et appliquées à tous les alvéoles de même catégorie physico-chimique (cf. Figure 5-16) :

- pour le panache organique, (i) une zone de 10 mètres autour du diamètre excavé des alvéoles de déchets de la famille physico-chimique MA-VL 3 où la concentration en acide iso-saccharinique (ISA) excède le seuil de 10^{-4} mol.L^{-1} (le seuil de concentration en phtalates de 10^{-3} mol.L^{-1} n'est pas atteint), et (ii) une zone de cinq mètres autour du diamètre excavé des alvéoles de déchets de la famille physico-chimique MA-VL 1 où la concentration en tributyle phosphate (TBP) excède le seuil de 10^{-5} mol.L^{-1} ;
- pour le panache salin, une zone de cinq mètres autour du diamètre excavé des alvéoles de déchets de la famille physico-chimique MA-VL 1 (déchets contenant une quantité significative de sels solubles, type nitrates et sulfates) où la force ionique est comprise entre 0,2 mol.L^{-1} et 1 mol.L^{-1}.

[52] Dans le cadre des évaluations préparatoires, notamment celles des extensions des perturbations chimiques, la partie utile de l'alvéole MA-VL est représentée le plus finement possible. Il est ainsi considéré l'ensemble des composants constituant la zone de stockage : le revêtement-soutènement de l'alvéole, le béton de remplissage de la zone de stockage, les jeux inter-colis et vides apicaux, les conteneurs de stockage et les colis primaires.

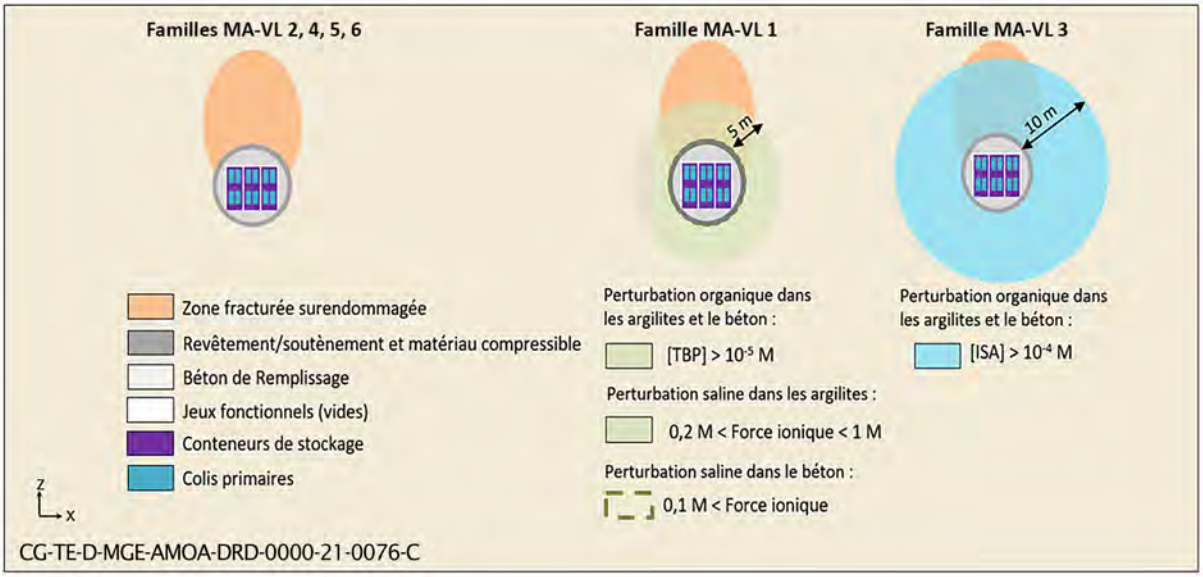


Figure 5-16 *Principes de représentation de la partie utile des alvéoles MA-VL et des perturbations chimiques associées en fonction du type de déchet et des catégories physico-chimiques des familles MA-VL*

Les facteurs correctifs appliqués en fonction de la perturbation affectant les argilites sont détaillés dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.2.5.1 La perturbation saline

Comme présenté au chapitre 2 du présent volume, la prise en compte de l'influence des fluides salins issus des déchets MA-VL (familles physico-chimiques 1 et 2), se traduit par la suppression de l'effet d'exclusion anionique dans les argilites (propriétés diffusives des espèces anioniques devenant celles des espèces neutres), et l'application de facteurs correctifs aux propriétés de rétention des alcalins et alcalino-terreux dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien endommagées ou non. Ces facteurs correctifs sont détaillés dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

Dans les argilites, ces facteurs correctifs sont appliqués en fonction de la force ionique obtenue par évaluations préparatoires. Si la force ionique est supérieure à 1 M, la rétention chimique n'est pas représentée.

5.2.2.5.2 La perturbation organique

En cohérence avec les conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), l'influence des substances organiques complexantes sur la rétention, est prise en compte et leur effet est explicitement représenté dans les argilites (endommagées mécaniquement ou non) au droit des alvéoles MA-VL qui en contiennent (familles physico-chimique MA-VL 1, 2 et 3).

L'effet de la perturbation organique est pris en compte par des facteurs correctifs appliqués aux valeurs des propriétés de sorption (Kd) et de solubilité (C_{sat}) des radionucléides et substances toxiques chimiques sensibles à la complexation (lanthanides, actinides et certains métaux de transition).

Ces facteurs correctifs sont appliqués en fonction de la concentration en molécules organiques et selon leur nature (ISA, TBP ou autres ligands), ils sont détaillés dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.2.5.3 Le cumul des perturbations

Dans le but d'établir une représentation simple et pertinente du cumul des perturbations chimiques (alcaline, saline, organique) dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien, il est retenu les principes suivants :

- si deux perturbations ont un effet sur le même élément et le même paramètre (hydraulique, de transport, de sorption ou de solubilité), le facteur correctif le plus pénalisant des deux perturbations est pris en compte ;
- si ces perturbations n'affectent pas les mêmes éléments, leurs effets sur les paramètres hydrauliques, de transport ou de rétention chimique sont pris en compte de manière indépendante.

L'application de ces principes est détaillée dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.3 Les alvéoles de stockage HA

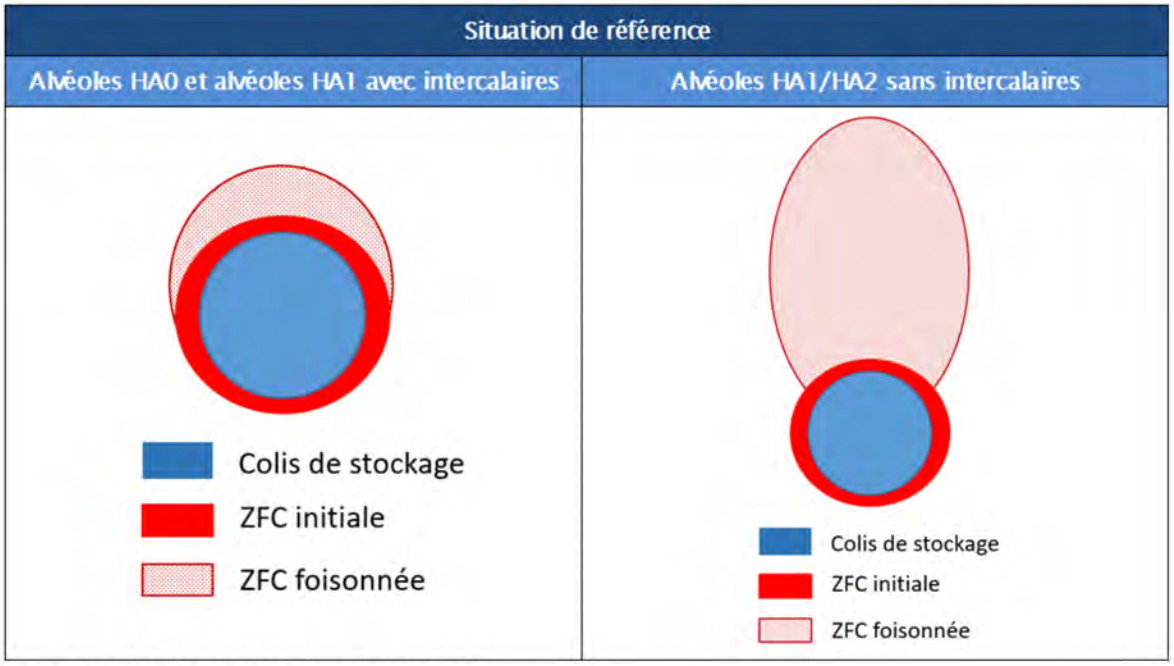
Les alvéoles de stockage HA sont des tunnels subhorizontaux creusés selon la contrainte horizontale majeure. Leur espacement est celui défini dans l'architecture à terminaison illustrative (cf. Figure 5-2) déterminé selon la thermicité des colis de déchets.

Il est considéré dans la conceptualisation (i) la tête de l'alvéole, dont la nature des matériaux n'est pas spécifiée à ce stade des études, et explicitement représentée de façon conservative par un matériau poreux continu homogène, (ii) la partie utile, (iii) les zones de fracturation sur toute la longueur de l'alvéole, ainsi que (iv) la zone de foisonnement (cf. Chapitre 2 du présent volume).

En cohérence avec l'analyse conduite dans le chapitre 2 du présent volume, les taux de vide retenus pour l'évaluation de la hauteur de foisonnement (surextension au-delà de la voûte des alvéoles) sont les suivants en situation de référence (cf. Figure 5-17) :

- 12 % pour les alvéoles du quartier pilote HA et les alvéoles du quartier de stockage HA contenant des colis intercalaires ;
- 35 % pour les alvéoles du quartier de stockage HA ne contenant pas de colis intercalaires.

Comme indiqué en figure 5-17, le chemisage et le matériau de remplissage à l'extrados du chemisage (MREA) et sa perturbation alcaline associée ne sont pas explicitement représentés. On considère que le matériau à l'extrados du chemisage (MREA) et la perturbation alcaline sont intégrés à la partie utile de l'alvéole (« colis de stockage » sur la figure 5-17).



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0077-A

Figure 5-17 *Principes de représentation de la partie utile des alvéoles HA en situation de référence*

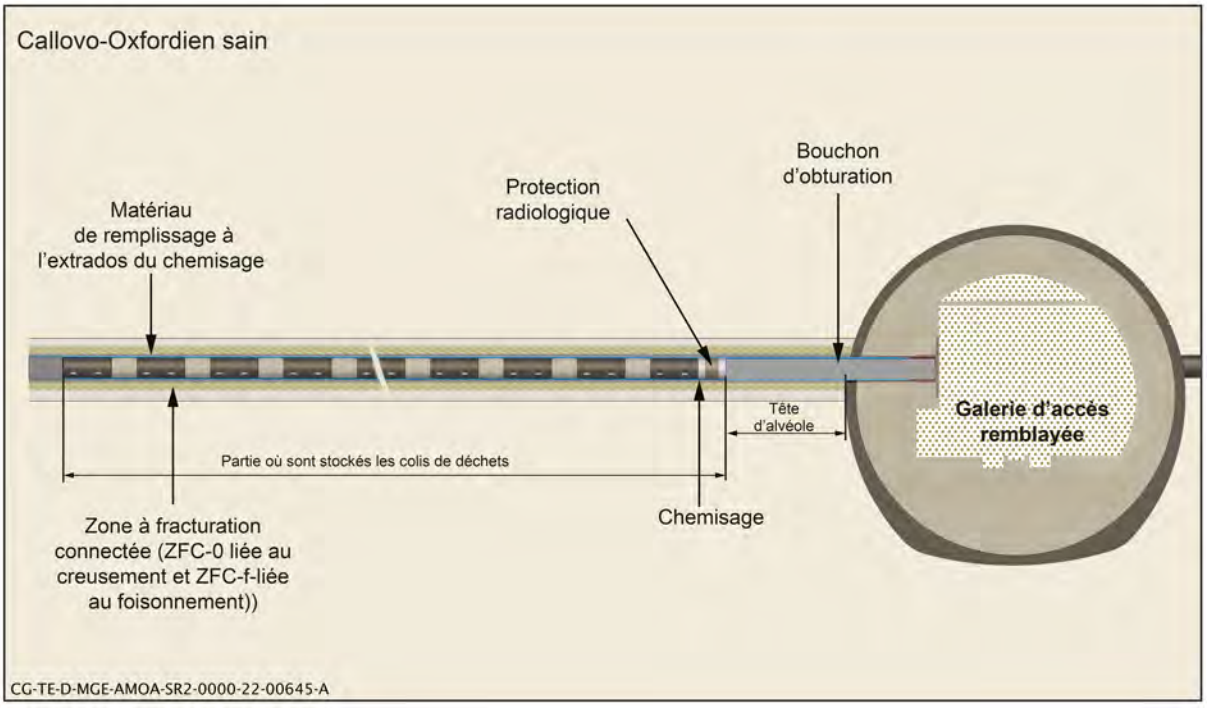


Figure 5-18 *Représentation schématique des alvéoles HA de stockage de colis de déchets HA en situation de référence*

5.2.3.1 Les colis HA stockés

5.2.3.1.1 La spéciation du sélénium dans les déchets HA

En situation de référence, il est fait l'hypothèse sur la base des connaissances (cf. Chapitre 2 du présent volume), d'une fraction de 3 % de sélénium sous la forme Se(+VI) pour l'ensemble des déchets vitrifiés (62). Pour mémoire, l'inventaire HA en sélénium 79 représente près de 93 % de l'inventaire total en sélénium 79 des déchets HA et MA-VL.

5.2.3.1.2 Le conteneur de stockage HA

Les colis de déchets HA0, HA1 et HA2, ainsi que certains colis de déchets vitrifiés MA-VL 6 sont conditionnés en conteneurs de stockage HA et disposés dans des alvéoles HA de stockage dans des quartiers spécifiques :

- les colis de déchets faiblement exothermiques (HA0) sont stockés dans le quartier pilote HA, à l'exception des familles de déchets HA0 dont les colis sont stockés en intercalaires dans le quartier de stockage HA (cf. Tableau 5-2) ;
- les colis de quelques familles de déchets MA-VL 6 vitrifiés sont stockés en intercalaires dans le quartier de stockage HA (cf. Tableau 5-2) ;
- les colis de déchets exothermiques HA1 et HA2 sont stockés dans le quartier de stockage HA.

En cohérence avec la démarche et l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitres 1 et 2 du présent volume), le scénario d'évolution normale considère qu'aucun conteneur de stockage HA n'est dysfonctionnant au moment de la fermeture du stockage.

Les conteneurs de stockage ne sont pas représentés de manière explicite et le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques est initié après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage, il est alors pris en compte par l'intermédiaire du terme source (cf. Chapitre 5.2.3.1.3 du présent volume).

Sur la base de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), la durée d'étanchéité des conteneurs de stockage en situation de référence du SEN, est évaluée en retenant une valeur haute de la vitesse de corrosion (10 $\mu m.an^{-1}$) et une épaisseur critique de flambement conservative (15 mm) (cf. Figure 5-19) :

- 3 800 ans après la mise en stockage du premier colis du quartier pour les conteneurs de stockage avec une épaisseur minimale de 53 mm (tous les conteneurs de stockage des colis de déchets HA1 et HA2 et certains conteneurs de stockage des colis de déchets HA0 et MA-VL 6 co-stockés en intercalaires dans les alvéoles de stockage des colis de déchets HA1) ;
- 550 ans après la mise en stockage du premier colis du quartier pour certains conteneurs de stockage de colis de déchets HA0 et MA-VL 6 co-stockés en intercalaires dans les alvéoles du quartier de stockage HA contenant des colis de déchets HA1 avec une épaisseur minimale de 20,5 mm (conteneurs AVM).

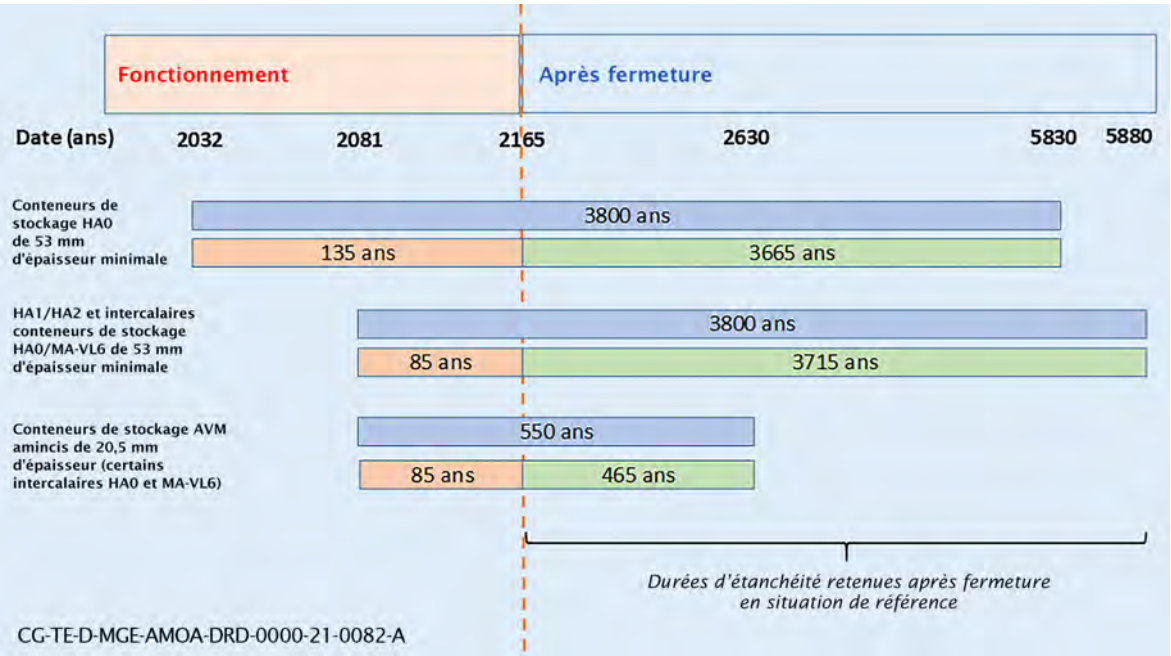


Figure 5-19 *Durées d'étanchéité des conteneurs de stockage HA retenues en situation de référence*

5.2.3.1.3 Le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques

Le relâchement des déchets vitrifiés est initié suite à la perte d'étanchéité des conteneurs de stockage. Ce relâchement, quantifié par une quantité de radionucléides ou substances toxiques chimiques relâchée par unité de temps, prend en compte la cinétique d'altération de la matrice vitreuse et l'influence de la température en condition de stockage.

Le choix des modèles de relâchement et des paramètres associés pour les colis de déchets est détaillé dans l'analyse conduite au chapitre 2 du présent volume. Les valeurs de paramètres des modèles sont présentés dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

Selon les caractéristiques intrinsèques du verre, trois modèles de relâchement sont retenus en situation de référence :

- un régime d'altération avec la prise en compte de la vitesse résiduelle en milieu argileux, en distinguant pour ce modèle, un cas sans auto-irradiation du verre et un cas avec une auto-irradiation du verre (conduisant à diminuer d'un facteur 10 la durée de relâchement du verre) ; la fraction de verre altérée en vitesse initiale et en vitesse résiduelle, est calculée à partir de paramètres définis au meilleur des connaissances en situation de référence, et en milieu saturé en eau dès l'instant initial ;
- un régime d'altération en vitesse initiale « $V_0.S$ » ;
- un modèle de type « labile » pour certaines familles présentant une faible résistance à la lixiviation ou pour lesquelles les données disponibles (composition du verre, surface accessible à l'eau) ne permettent pas de paramétrer un modèle de relâchement.

Le tableau 5-2 synthétise les modèles de relâchement retenus, par famille élémentaire de déchet, pour la situation de référence.

Tableau 5-2 Modèles de relâchement retenus pour la quantification des termes sources verre (quartiers de stockage HA) en situation de référence

Filière déchets - Quartier stockage	Famille élémentaire de déchets et type de conteneur		Durée de vie du conteneur en phase après fermeture (ans)	Modèle de relâchement (situation de référence)
Déchets HA0 – Quartier pilote HA	COG_0150		3665	$V_0.S$
	COG_0160			Labile
	COG_0870 (non vitrifiés)			Labile
Déchets HA0 (intercalaires) – Quartier de stockage HA	Piver	CEA_0200	3715	$V_0.S$
		CEA_1190		Labile
	AVM amincis (20,5 mm)	CEA_1500 (non vitrifiés)	465	Labile
		CEA_0350		Prise en compte de la vitesse résiduelle
		CEA_1070A CEA_1070B		
		CEA_1080-S'21		Prise en compte de la vitesse résiduelle
		CEA_1080-SAN-60-15-22		
		CEA_1080-SAN-55-20-20-DS		
		CEA_1080-SAN-55-20-20		$V_0.S$
		CEA_1080-SPNM'		$V_0.S$
Déchets MA-VL6 (intercalaires) – Quartier de stockage HA		CEA_1120A CEA_1120B		V_0-V_R
	CEA_0340		3715	$V_0.S$
	COG_0470			
	COG_0475			Labile
Déchets HA1 & HA2 – Quartier de stockage HA	COG_0140 (HA1)			Prise en compte de la vitesse résiduelle
	COG_0200/85 ans (HA2) COG_0200/70 ans (HA2)			
	COG_0800 (HA1)			
	COG_0810A (assimilé COG_0140)			
	COG_0820A (assimilé COG_0140)			

	COG_0830 (assimilé COG_0200/70)		
	COG_0880 (assimilé COG_0140)		
	COG_0890 (assimilé COG_0140)		
	COG_0900 (assimilé COG_0140)		
	COG_0810B (HA1)		Labile
	COG_0820B (HA1)		
	COG_0850 (HA1) (non vitrifiés)		

5.2.3.2 La partie utile de l'alvéole HA

Comme indiqué au chapitre 5.2.3 du présent volume, la partie utile de l'alvéole HA (colis stockés, vides résiduels, chemisage, MREA et perturbation alcaline associée) est représentée comme un milieu poreux continu homogène, entièrement saturé dès la fermeture définitive de l'installation souterraine.

Conformément à l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), les propriétés hydrauliques de la partie utile sont assimilées à celles d'un sable et les propriétés de transport sont prises de manière conservative ($Dp = D_0(HTO)$). Il n'est pas pris en compte de rétention par sorption ou précipitation au sein de l'alvéole HA. Les valeurs de paramètres sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

Cette représentation est maintenue sur toute la durée de l'évaluation.

5.2.3.3 Le dispositif d'obturation de l'alvéole HA

Le bouchon d'obturation remplit les vides en tête d'alvéole. Eu égard à l'absence d'exigence de performance hydraulique du matériau du bouchon mis en place en tête d'alvéole HA, il est fait le choix, en cohérence avec l'analyse conduite au chapitre 2 du présent volume, de représenter explicitement le bouchon d'obturation de la tête d'alvéole HA comme un matériau poreux continu homogène, de conductivité hydraulique équivalente à celle d'un sable, avec des propriétés de transport prises de manière conservative ($Dp = D_0(HTO)$) et aucune propriété de rétention chimique. Les valeurs de paramètres sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.3.4 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche de l'alvéole HA

La zone endommagée mécaniquement est représentée selon les modalités exposées au chapitre 2 du présent volume et conceptualisée en tenant compte des éléments suivants (cf. Chapitres 5.2.2 du présent volume) (cf. Figure 5-17) :

- l'endommagement mécanique initial lié au creusement des alvéoles selon la contrainte horizontale majeure est représenté en situation de référence par une ZFC-0 ;
- le sur-endommagement mécanique lié au foisonnement des alvéoles (ZFC-f) dont l'extension est représentée en fonction d'un taux de vide unique conservatif de 12 % pour le quartier pilote HA et les alvéoles du quartier de stockage HA contenant des colis en intercalaires, et de 35 % pour les

autres alvéoles du quartier de stockage HA. Le foisonnement est représenté dès l'instant initial et possède les mêmes propriétés hydro-dispersives et de rétention que la ZFC-0 ;

- la perturbation alcaline issue du matériau de remplissage de l'espace annulaire (MREA) est intégrée à la partie utile de l'alvéole HA ;
- la perturbation thermique et son influence sur les propriétés hydro-dispersives et de rétention chimique dans la couche du Callovo-Oxfordien endommagée ou non est prise en compte selon les modalités présentées au chapitre 5.2.2.3 du présent volume.

Les valeurs de paramètres retenus sont détaillés dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.4 Les alvéoles de stockage MA-VL

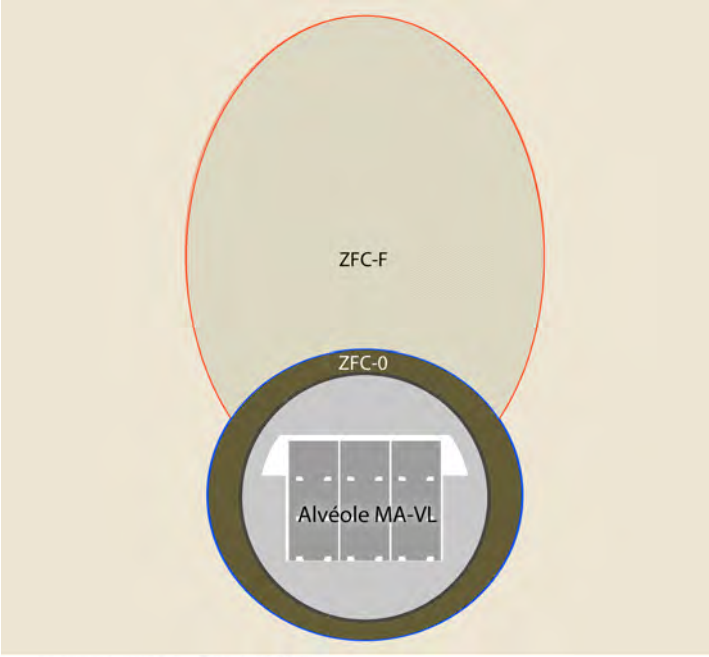
Le quartier de stockage MA-VL est représenté selon l'architecture à terminaison illustrative présentée en figure 5-2. Les alvéoles de stockage des déchets MA-VL sont subhorizontaux et sont creusés selon la contrainte horizontale majeure. Leur espacement est celui défini dans l'architecture à terminaison illustrative (cf. Figure 5-2).

Les alvéoles de stockage MA-VL sont représentés selon trois parties distinctes :

- une partie utile où sont stockés les colis de déchets, représentée sur une longueur de plusieurs centaines de mètres (cf. Figure 5-20) ;
- un massif en béton à chaque extrémité ;
- un ouvrage d'obturation à chaque extrémité (mise en place d'un remblai, cf. Chapitre 5.2.6 du présent volume).

Compte tenu de ses rôles et/ou fonctions, la conceptualisation des alvéoles MA-VL distingue (i) l'inventaire en radionucléides et substances toxiques chimiques et sa distribution dans les alvéoles de stockage, (ii) les modèles de relâchement des déchets MA-VL, (iii) la partie utile de l'alvéole (les colis de stockage, les vides résiduels et le béton de structure) et (iv) la zone d'argilites endommagées mécaniquement.

La partie utile à l'intrados du revêtement/soutènement intègre les colis de stockage MA-VL et les vides résiduels dans l'alvéole. Cette zone est représentée comme un milieu poreux homogène dont les propriétés hydro-dispersives sont considérées comme conservatives sans distinction des vides résiduels ou des colis de stockage.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0069-A

Figure 5-20 *Schéma conceptuel de la zone fracturée connectée au droit de la partie utile d'un alvéole de stockage MA-VL (orienté selon la contrainte principale majeure) et des caractéristiques de transport et de rétention en situation de référence du SEN (représentation du foisonnement : ZFC-f)*

Conformément à l'analyse des risques et des incertitudes présentées au chapitre 2 du présent volume, il est considéré une zone fracturée de sur-endommagement par foisonnement de la roche (ZFC-f) autour des alvéoles MA-VL en fonction de leur taux de vide. Le taux « moyen » de vide retenu pour l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL est de 20 % en situation de référence (cf. Figure 5-21). Le scénario de propagation verticale de la roche foisonnée (extension maximale en voûte) est retenu pour calculer l'extension de l'endommagement en voûte, radier et parement.

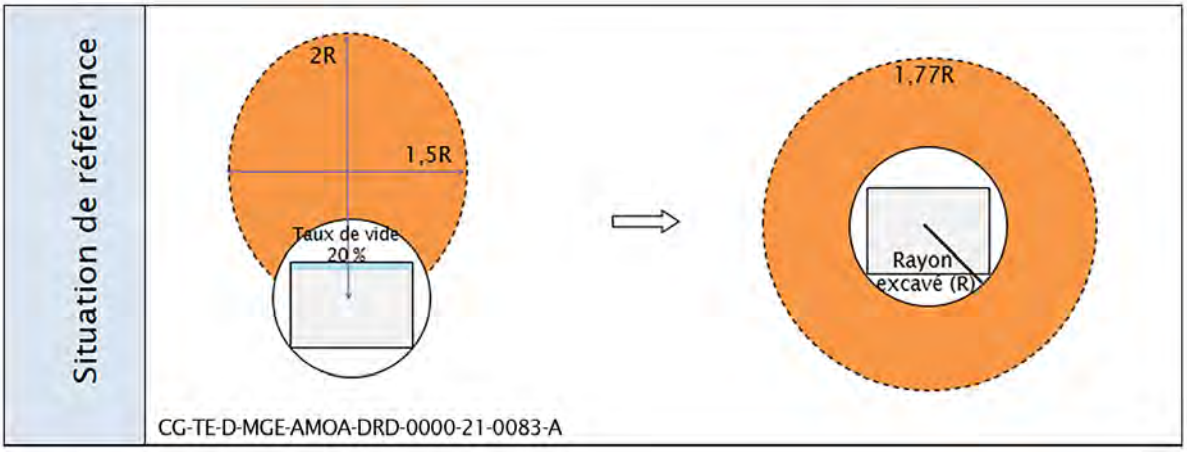


Figure 5-21 *Schéma de conceptualisation de la zone de fracturation connectée surendommagée (zone de foisonnement ZFC-f) au droit de la partie utile des alvéoles MA-VL en situation de référence*

5.2.4.1 Les colis MA-VL stockés

5.2.4.1.1 Le cas spécifique du sélénium

Comme énoncé au chapitre 2 du présent volume, au regard des incertitudes sur la forme chimique du sélénium dans les déchets MA-VL, il est fait l'hypothèse que la totalité de l'inventaire en sélénium des déchets MA-VL est sous la forme Se(+VI).

5.2.4.1.2 Les modèles de relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques des déchets MA-VL

Selon la nature physico-chimique des familles de déchets et les connaissances acquises (cf. Chapitre 2 du présent volume), la situation de référence du SEN retient :

- un modèle de corrosion généralisée des éléments métalliques activés pour les déchets métalliques ;
- le modèle COLONBO (cf. Chapitre 2.8.1.1.2 du présent volume sur la durée d'intégrité du conteneur estimée à 1 000 ans) associé à un modèle basé sur la solubilité du $NaNO_3$ pour les déchets salins avec matrice bitume ;
- un modèle de relâchement labile pour les déchets pour lesquels les modèles ci-dessus ne s'appliquent pas (cf. Chapitre 2.8.1.1.2 du présent volume).

Les modèles de relâchement sont présentés pour chaque famille de colis MA-VL dans le tableau 5-3 (cf. Chapitre 2 du présent volume) et les paramètres associés à chacun de ces modèles sont présentés dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

Tableau 5-3 Modèles de relâchement retenus pour la quantification des termes sources des colis MA-VL, par alvéole, en situation de référence

Type d'alvéole	N° alvéole	Mode de stockage	Identifiant colis	Modèle de relâchement (situation de référence)
MA3-2/3	1	CS	CEA_0110/CEA_0120/CEA_0370	Labile
			COG_0040/COG_0050/COG_0070/COG_0440/COG_0460	Labile
MA5-22	2	Stockage panier	COG_0100/COG_0110/COG_0120	Corrosion généralisée + Labile
			COG_0450/COG_0530/COG_0540/COG_0550	Labile
MA4/5-2/25	3	CS	CEA_1060/CEA_1200/CEA_0360/CEA_0430	Labile
		CS	COG_0100/COG_0110/COG_0120	Corrosion généralisée + Labile
		CS	COG_0450/COG_0530/COG_0540/COG_0550	Labile
MA3-23	4	SD	COG_0030/COG_0480/COG_0500	Labile
MA2-4	5	CS	CEA_1020	NaNO3
			COG_0020	COLONBO+$NaNO_3$ (COG_0020A) et Labile (COG_0020B/C/D)

Type d'alvéole	N° alvéole	Mode de stockage	Identifiant colis	Modèle de relâchement (situation de référence)
			COG_0420	COLONBO+$NaNO_3$ et NaNO3 (COG_0420A) et Labile (COG_0420B/C/D/E) et COLONBO+$NaNO_3$ (COG_0420F/G)
MA1-26	6	Stockage panier	CEA_0070/CEA_0140/CEA_0150/CEA_0280/ CEA_0320	Labile
MA2-4	7	CS	CEA_1020	$NaNO_3$
			COG_0020	COLONBO+$NaNO_3$ (COG_0020A) et Labile (COG_0020B/C/D)
MA4-21	8	SD	EDF_0080/EDF_0090/EDF_0100	Labile
MA2-4	9	CS	CEA_1020	$NaNO_3$
			COG_0020	COLONBO+$NaNO_3$ (COG_0020A) et Labile (COG_0020B/C/D)
MA3-23/24	10	SD	COG_0500	$NaNO_3$
			COG_0510	Labile
			CEA_0050/CEA_1100/CEA_0270/CEA_0330	Labile
MA3-6	11	CS	CEA_0290/CEA_0300/CEA_0450	Labile
MA3-4/5/27	12	CS	AND_0050/AND_0061/AND_0062/AND_0070	Labile
MA3-4/5/26	12	CS	CEA_0050/CEA_0080/CEA_0090	Labile
	12	Stockage panier	CEA_1180	Labile
	12	CS	CEA_0480	Labile
MA2-4	13	CS	CEA_1000/CEA_1010	COLONBO+$NaNO_3$
			CEA_1020	$NaNO_3$
MA1-1/5	14	CS	CEA_1140/CEA_0232/CEA_0310	Labile
			COG_0430	$NaNO_3$
MA3-2/27	15	CS	CEA_0060/CEA_0110/CEA_1110/CEA_0400/ CEA_0410/CEA_0420/CEA_0440	Labile
		CS	CEA_1040/CEA_1090/CEA_1151/CEA_1152	Labile
		CS	COG_0490	Labile
MA3-5	16	CS	CEA_0080/CEA_0090/CEA_1510/CEA_0460	Labile
			EDF_0120	Labile
MA2-4	17	CS	CEA_1000	COLONBO+$NaNO_3$

Type d'alvéole	N° alvéole	Mode de stockage	Identifiant colis	Modèle de relâchement (situation de référence)
			CEA_1020	$NaNO_3$ (CEA_1020A) et COLONBO+$NaNO_3$ (CEA_1020B)
MA1-5/7	18	CS	COG_0430	$NaNO_3$
			CEA_0100	Labile
			CEA_0231	Labile
			COG_0560	Labile
MA5-22	19	Stockage panier	COG_0110/COG_0120	Corrosion généralisée + Labile
MA4-1/5	20	CS	ITER_0010/ITER_0020	Labile
MA4/5/6/7-5	21	CS	EDF_0100/EDF_0110/EDF_0250	Labile
			ITER_0010	Labile
			COG_0400	Labile
MA4/5/7-2/3/22/27	22	CS	CEA_1050	Labile
	22	CS	CEA_0360/CEA_0380	Labile
	22	Stockage panier	COG_0110/COG_0120	Corrosion généralisée + Labile

CS : conteneur de stockage ; SD : stockage direct.

5.2.4.2 La partie utile de l'alvéole MA-VL

5.2.4.2.1 La partie utile hors structures en béton

Deux modes de stockage des colis sont envisagés :

- le stockage de colis primaires MA-VL en conteneur de stockage en béton :
  - ✓ les conteneurs de stockage de déchets MA-VL n'ont aucune fonction de sûreté après fermeture[53] ; ils ne sont donc pas explicitement représentés pour les évaluations de performance et de sûreté ;
  - ✓ dans le cas spécifique des déchets salins avec matrice bitume, la période d'intégrité physique du conteneur de stockage, estimée à ce stade à 1 000 ans, est prise en compte dans la définition du terme source du modèle de relâchement COLONBO (cf. Chapitre 2 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62) ;
- le stockage de colis primaires MA-VL directement en panier ou sur plateau :
  - ✓ les colis de déchets ne sont pas représentés individuellement mais constituent un terme source global dépendant du choix des modèles de relâchement (62).

[53] Pour les évaluations de sûreté, la partie utile de l'alvéole est représentée comme un milieu poreux continu homogène dans lequel est positionné le terme source global des solutés. Cependant, il est à noter que dans le cadre des évaluations préparatoires, et notamment l'évaluation des extensions des perturbations chimiques (cf. Chapitre 5.2.2.5 du présent volume), l'ensemble des composants constitutifs de la partie utile de l'alvéole (colis primaire, conteneur de stockage, vides résiduels...) sont représentés de manière explicite. Les valeurs de paramètres retenues pour ces composants dans les évaluations préparatoires sont tracées dans le tableau 5-4 pour la situation de référence et le tableau 5-7 pour la situation enveloppe.

Globalement, la partie utile (hors structures en béton) intégrant les jeux inter-colis et les colis de stockage est représentée comme un milieu poreux continu homogène, entièrement saturé dès l'instant initial dont les propriétés hydrauliques sont assimilées à celles d'un sable et les propriétés de transport sont prises de manière conservative ($Dp = D_0(HTO)$).

Cette représentation est maintenue sur toute la durée de l'évaluation (cf. Chapitre 2 du présent volume).

5.2.4.2.2 Les structures en béton de l'alvéole MA-VL

Les structures en béton de l'alvéole MA-VL (revêtement-soutènement, parois internes, radiers, béton de remplissage…) contribuent à « *limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage* ». La contribution est exprimée en termes d'environnement chimique favorable aux phénomènes de précipitation et de sorption.

Les valeurs de sorption et de solubilité dans les bétons sont définies en situation de référence au meilleur des connaissances (62) et considèrent de manière globale la mise en place d'un milieu cimentaire et réducteur. Conformément à la démarche exposée au chapitre 1 du présent volume et aux conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume) :

- les coefficients de distribution (Kd) correspondent à la valeur conservative entre les valeurs *best-estimate* des coefficients de distribution des bétons « sains » ou « altérés » ;
- les limites de solubilité (C_{sat}) correspondent à la valeur conservative entre les valeurs *best-estimate* des limites de solubilité des bétons « sains » ou « altérés » ;
- pour les éléments pour lesquels on ne dispose d'aucune mesure, ni d'analogie, on ne retient pas de rétention chimique ($Kd = 0$, $C_{sat} = \infty$).

Aucune propriété hydraulique ou de transport diffusif n'est attendue des bétons de structure. Conformément aux conclusions du chapitre 2 du présent volume, ils sont représentés avec des propriétés hydrauliques équivalentes à celles d'un sable et des propriétés de transport prises de manière conservative ($Dp = D_0(HTO)$).

Ces représentations sont maintenues sur toute la durée de l'évaluation.

Les valeurs de paramètres sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.4.2.3 Les perturbations chimiques issues de déchets MA-VL dans les bétons de structure MA-VL

a) La perturbation oxydante liée aux sels

Comme indiqué au chapitre 2 du présent volume, les alvéoles contenant des déchets MA-VL salins (familles physico-chimiques MA-VL 1 et 2) contiennent des sels nitrates qui, de par leur réactivité potentielle et l'activité bactérienne, imposeraient des conditions oxydantes avec des modifications attendues des propriétés de sorption et de solubilité de certains radionucléides ou substances toxiques chimiques dans les bétons de structure.

L'analyse phénoménologique a permis d'identifier les radionucléides et les substances toxiques chimiques sensibles à ces conditions. Ce choix impacte les éléments chimiques Np, Se, Cr et Pu. Les valeurs de solubilité et de rétention retenues sont présentées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

b) La perturbation saline issue de déchets MA-VL

Comme indiqué au chapitre 2 du présent volume, pour prendre en compte l'influence des fluides salins issus de certains déchets MA-VL (familles physico-chimiques MA-VL 1 et 2), des facteurs correctifs sont appliqués aux propriétés de rétention des alcalins et alcalino-terreux dans la partie utile de l'alvéole MA-VL.

Dans les bétons de structure, il est considéré que si la force ionique est supérieure à 0,1 M, des facteurs correctifs sont appliqués à la rétention chimique des radionucléides.

L'influence de la perturbation saline sur les propriétés hydrauliques et de transport n'est pas représentée car ces paramètres sont déjà pris de manière pénalisante en SEN (les bétons de structure sont assimilés à un sable pour les deux situations).

Les valeurs retenues sont présentées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

c) La perturbation organique issue de déchets MA-VL

Comme indiqué au chapitre 2 du présent volume, compte tenu de l'influence des substances organiques complexantes sur la rétention, celles-ci sont prises en compte et leur effet est explicitement représenté dans les bétons de structure MA-VL (familles physico-chimiques MA-VL 1, 2 et 3).

Dans les bétons de structure, la perturbation organique est prise en compte de manière identique à la perturbation organique dans la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 5.2.2.5 du présent volume), c'est-à-dire :

- les mêmes éléments chimiques sont impactés (lanthanides, actinides et certains métaux de transition) : Mn, Ni, Pd, La, Sm, Gd, Dy, Ho, Lu, Ac, Th, U, Np, Pu, Am et Cm ;
- les valeurs seuils de complexations ainsi que les facteurs correctifs associés sont identiques à ceux définis dans la couche du Callovo-Oxfordien.

Les valeurs retenues pour les évaluations sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

d) Le cumul des perturbations

Les règles concernant le cumul des perturbations dans les bétons sont identiques à celles définies pour la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 5.2.2.5 du présent volume sur la base des conclusions du chapitre 2 du présent volume).

5.2.4.3 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche de la partie utile de l'alvéole MA-VL

La zone endommagée mécaniquement est représentée selon les modalités exposées au chapitre 5.2.2 du présent volume et prend en compte (cf. Chapitre 2 du présent volume) :

- l'endommagement mécanique initial lié au creusement des alvéoles selon la contrainte horizontale majeure représenté en situation de référence par une ZFC-0 ;
- le sur-endommagement mécanique lié au foisonnement des alvéoles (ZFC-f) dont l'extension est représentée en fonction d'un taux de vide unique conservatif de 20 % appliqué à l'ensemble des alvéoles. Le foisonnement est représenté dès l'instant initial et possède les mêmes propriétés hydro-dispersives et de rétention que la ZFC-0 ;
- les perturbations alcaline, organique, saline et leur cumul dans la couche du Callovo-Oxfordien endommagée mécaniquement ou non (cf. Chapitre 2 du présent volume) :
  - ✓ de manière pénalisante, le matériau de bourrage injecté à l'extrados des voussoirs est assimilé à la zone de fracturation connectée (ZFC) reminéralisée par la perturbation alcaline.

Les valeurs retenues dans les évaluations sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.4.4 Le dispositif d'obturation des alvéoles MA-VL

Les ouvrages d'obturation mis en place dans les galeries d'accès aux alvéoles MA-VL sont identiques aux ouvrages remblayés des galeries dans l'unité argileuse (UA) présentés au chapitre 5.2.6 du présent volume. Les perturbations chimiques sont traitées de la même manière que dans la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 2 du présent volume).

5.2.5 Les scellements des liaisons surface-fond et des galeries

5.2.5.1 La position des scellements dans l'architecture de stockage illustrative

La position des scellements est définie selon l'architecture à terminaison illustrative considérée pour les évaluations de performance et de sûreté après fermeture (cf. Figure 5-22).

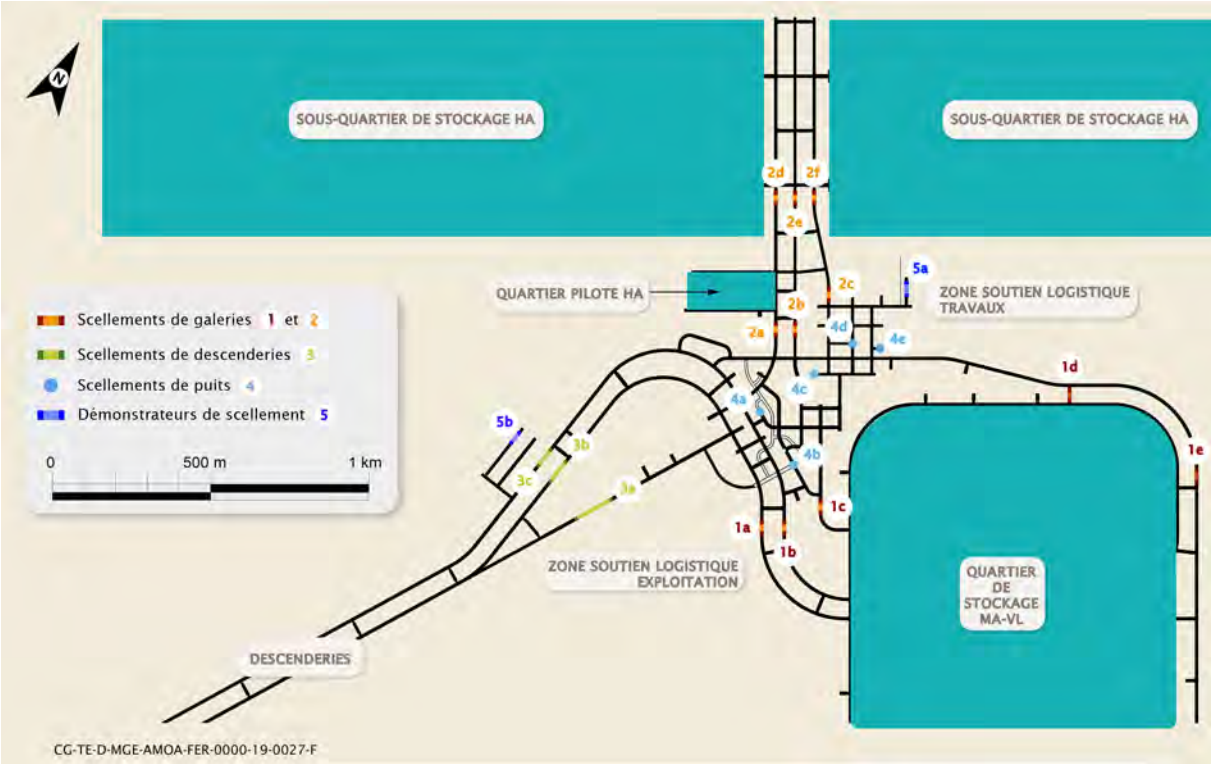


Figure 5-22 Illustration de la position des scellements dans l'architecture de stockage à terminaison illustrative

5.2.5.2 Les scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT)

Les scellements des liaisons surface-fond (LSF) sont constitués d'un noyau central à base d'argile gonflante confiné mécaniquement de part et d'autre. Les scellements des liaisons surface-fond sont mis en place lors de la fermeture du stockage, au toit de la couche du Callovo-Oxfordien dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT), où il ne se développe pas de zone endommagée avec fracturation connectée (ZFC). La tenue mécanique de la roche permet la dépose du revêtement-soutènement, du matériau compressible périphérique et du matériau de bourrage injecté à l'extrados sur toute la longueur du noyau argileux.

La figure 5-23 et la figure 5-24 restituent la conceptualisation hydraulique des scellements des liaisons surface-fond (puits, respectivement descenderies) en situation de référence, conformément à l'analyse présentée au chapitre 2 du présent volume et à la démarche de choix des valeurs des paramètres présentée au chapitre 1 du présent volume.

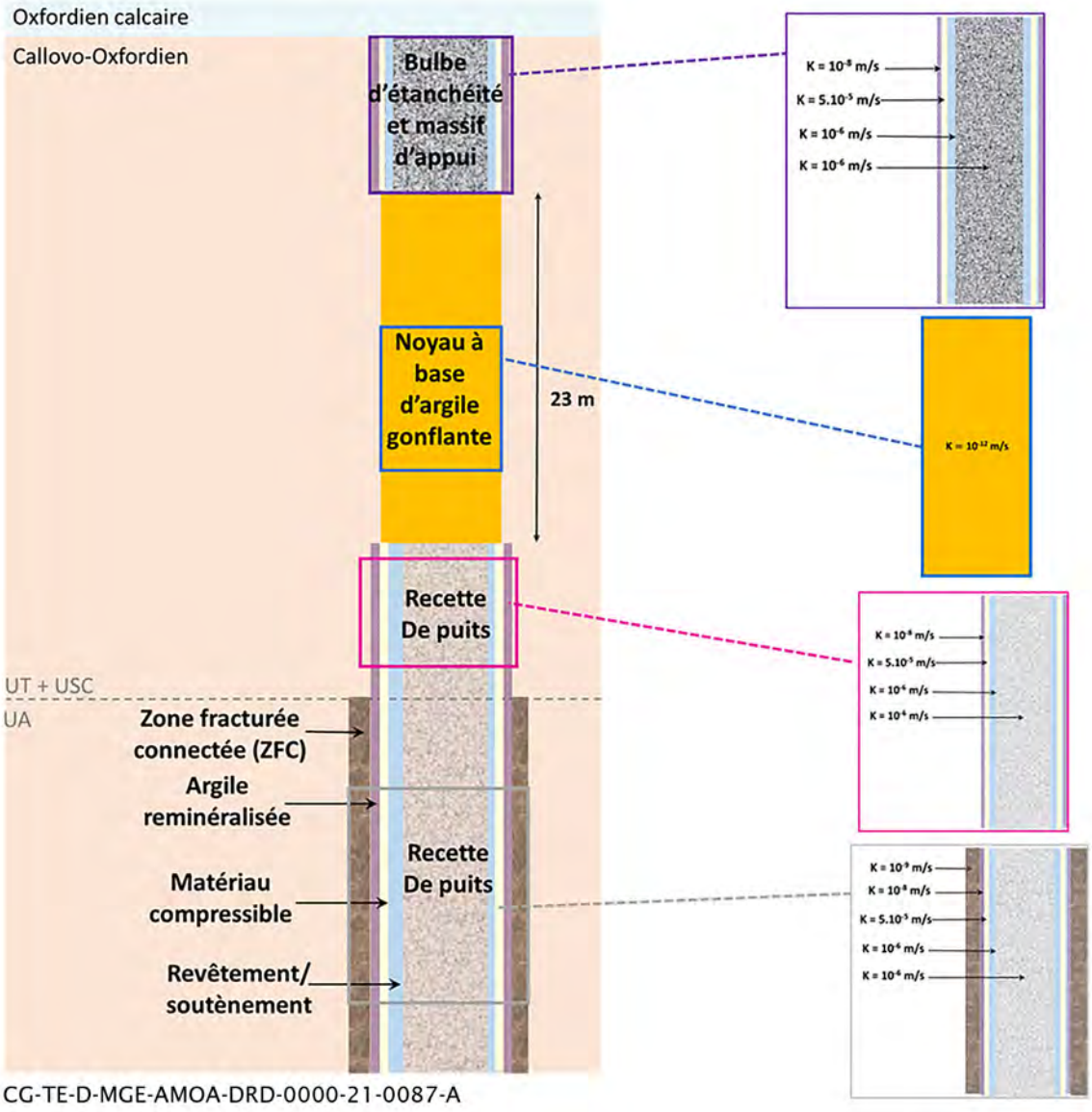
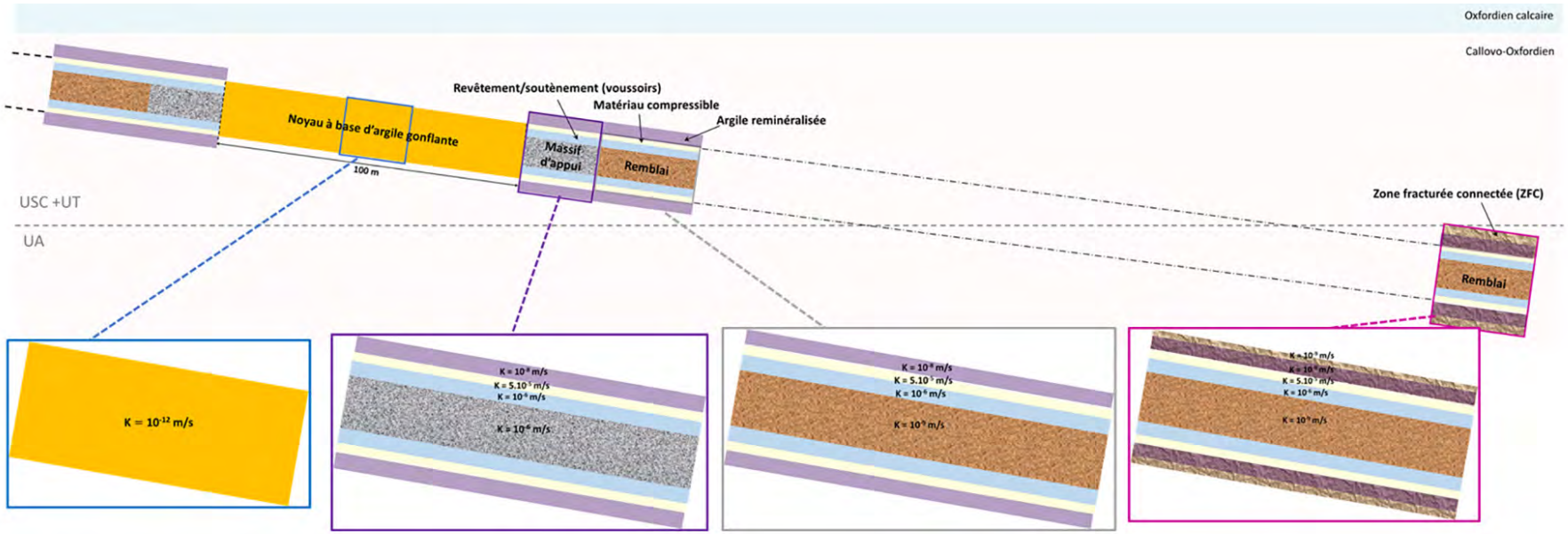


Figure 5-23 *Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un ouvrage de fermeture de liaison surface-fond (puits) en situation de référence*



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0088-A

Figure 5-24 Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un ouvrage de fermeture de liaison surface-fond (descenderie) en situation de référence

5.2.5.2.1 Le noyau argileux

Les scellements des liaisons surface-fond sont constitués d'un noyau central à base d'argilite gonflante représenté selon les principes suivants en situation de référence du SEN (cf. Chapitre 2 du présent volume) :

- la longueur du noyau argileux des puits (comprise entre environ 25 mètres et 40 mètres suivant le puits considéré) et des descenderies (comprise entre environ 50 mètres et 120 mètres suivant la descenderie considérée) est prise à la valeur conservative issue des options de conception définis à ce stade ;
- des propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique de référence définis sur la base des connaissances acquises sur les matériaux à base de bentonite en cohérence avec la démarche (cf. Chapitre 1 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

En situation de référence, la zone du noyau argileux reminéralisée par la perturbation alcaline est assimilée aux éléments en béton dont est issue la perturbation. La zone influencée du noyau argileux est représentée selon l'extension définie par modélisation en appliquant un facteur correctif à la sorption des alcalins et alcalino-terreux (62).

Les valeurs de paramètres retenues sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.5.2.2 Le dispositif de confinement mécanique

Le noyau argileux est confiné de part et d'autre par un dispositif de confinement mécanique :

- pour les scellements de puits, le confinement mécanique est assuré par la recette de fond de puits remplie de béton et un massif d'appui en béton en partie supérieure inclus dans un bulbe d'étanchéité au toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- pour les scellements de descenderies, le confinement mécanique est assuré par deux massifs d'appui en béton.

Les massifs d'appui, eu égard à l'absence d'exigence vis-à-vis de ses propriétés intrinsèques, sont représentés en cohérence avec les conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume) avec une conductivité hydraulique équivalente à celle d'un sable et des propriétés de transport conservatives ($Dp = D_0(HTO)$). Aucune propriété de rétention chimique n'est retenue.

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.5.3 Les scellements de galeries dans l'unité argileuse (UA)

Les scellements des ouvrages des galeries dans l'unité argileuse (UA) sont constitués d'un noyau central à base d'argile gonflante confiné mécaniquement de part et d'autre. L'interface entre le noyau de scellement et la couche du Callovo-Oxfordien est caractérisée par la dépose partielle des voussoirs (ou revêtement), remplis par le même matériau à base d'argile gonflante.

La figure 5-25 détaille la conceptualisation hydraulique des scellements et remblais de galerie en situation de référence conformément à l'analyse présentée au chapitre 2 du présent volume et à la démarche de choix des valeurs des paramètres présentée au chapitre 1 du présent volume.

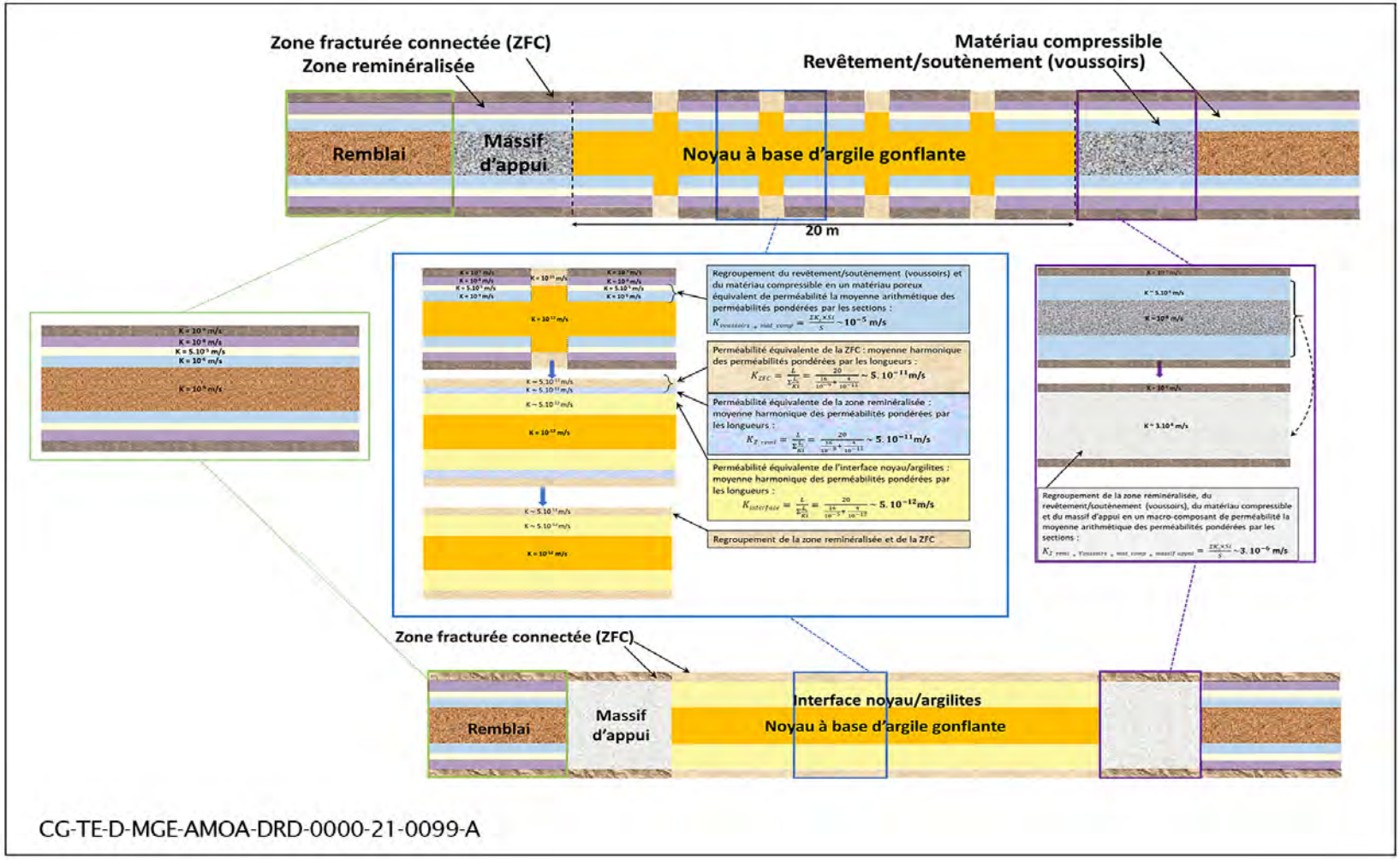


Figure 5-25 Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique des scellements et des remblais de galerie en situation de référence

5.2.5.3.1 Le noyau argileux

Comme indiqué au chapitre 2 du présent volume, les scellements des galeries sont constitués d'un noyau central à base d'argilite gonflante représenté selon les principes suivants en situation de référence du SEN :

- une longueur de noyau de l'ordre de 20 mètres nonobstant les dispositions conservatoires permettant d'adapter cette longueur ;
- des propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique « de référence » (62) définies sur la base des connaissances acquises sur les matériaux à base de bentonite.

En situation de référence, la zone du noyau argileux reminéralisée par la perturbation alcaline est assimilée aux éléments en béton dont est issue la perturbation. La zone influencée du noyau argileux est également représentée selon l'extension définie par modélisation en appliquant un facteur correctif à la sorption des alcalins et alcalino-terreux (62).

Les valeurs retenues pour les évaluations sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.5.3.2 Le linéaire de dépose du revêtement-soutènement

Le long du noyau de scellement, le linéaire de dépose est caractérisé à ce stade par plusieurs zones de dépose des voussoirs (ou revêtement-soutènement), séparées par des zones où les voussoirs sont laissés en place. Ces zones sont remplies par un matériau à base d'argile gonflante identique à celui du noyau argileux, afin d'avoir un bon contact avec la couche du Callovo-Oxfordien.

En cohérence avec les conclusions de l'analyse des risques et incertitudes et la démarche de choix des paramètres (cf. Chapitres 1 et 2 du présent volume), le linéaire de dépose est représenté comme un matériau poreux homogène, dont la conductivité hydraulique équivalente correspond à la moyenne harmonique des conductivités hydrauliques des alternances noyau/revêtement (cf. Figure 5-26), estimée en situation de référence à 5×10^{-12} m.s^{-1}, avec des propriétés de transport conservatives ($Dp = D_0(HTO)$) et sans propriété de rétention chimique par sorption ou par précipitation.

Les valeurs retenues pour les évaluations sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

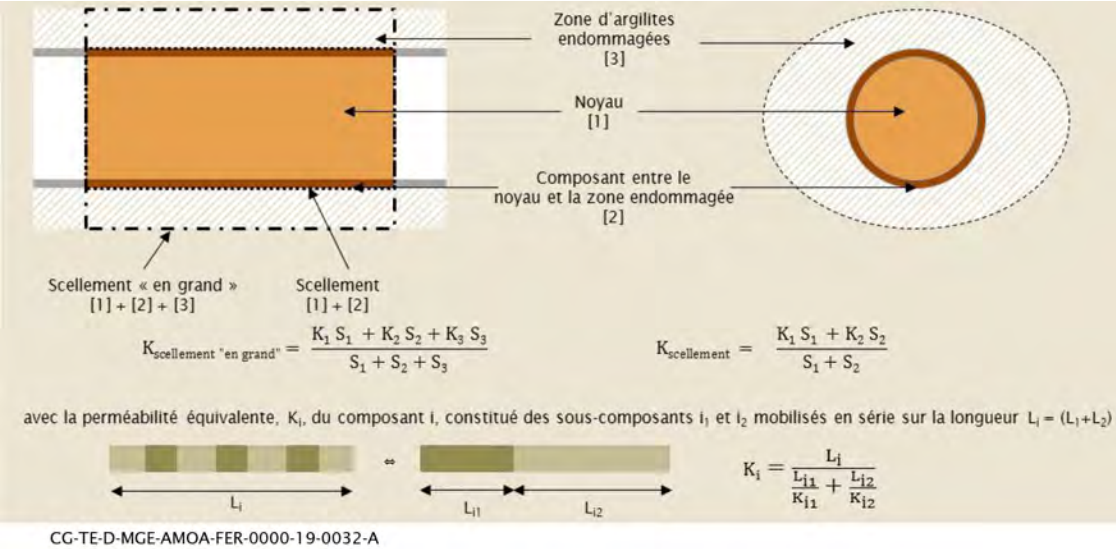


Figure 5-26 *Schéma illustratif de la conceptualisation du linéaire de dépose ([2] sur le schéma) et de la ZFC ([3] sur le schéma) au droit du scellement des galeries en situation de référence du SEN*

5.2.5.3.3 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des scellements des galeries

Comme mentionné au chapitre 2 du présent volume, la zone endommagée mécaniquement est représentée selon les modalités exposées au chapitre 5.2.2.2 du présent volume et prend en compte :

- l'orientation de l'ensemble des scellements de galeries selon la contrainte horizontale majeure ;
- la ZFC en contact direct avec le noyau argileux avec une cicatrisation hydraulique efficace en lien avec le bon contact hydromécanique entre le noyau et les argilites endommagées ;
- la ZFC localisée au droit des voussoirs (ou revêtements) laissés en place caractérisée par une cicatrisation hydraulique efficace dégradée et dont une portion est impactée par la perturbation alcaline issue des voussoirs (cf. Chapitre 5.2.2.4 du présent volume) :
  - ✓ de manière conservative, le matériau de bourrage injecté à l'extrados des voussoirs est assimilé à la zone de fracturation connectée (ZFC) reminéralisée par la perturbation alcaline.

Les valeurs retenues pour les évaluations sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.5.3.4 Le dispositif de confinement mécanique

De manière conforme aux conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), le dispositif de confinement mécanique des scellements de galeries est représenté de manière explicite par deux massifs d'appui en béton « usuel » de part et d'autre du noyau argileux.

Les massifs d'appui, eu égard à l'absence d'exigence vis-à-vis de leurs propriétés intrinsèques, sont représentés avec une conductivité hydraulique équivalente à celle d'un sable et des propriétés de transport prises de manière conservative ($Dp = D_0(HTO)$) en cohérence avec les conclusions de l'analyse des risques et incertitudes et la démarche de choix des paramètres (cf. Chapitres 1 et 2 du présent volume). Aucune propriété de rétention chimique n'est retenue.

Les valeurs retenues pour les évaluations sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.6 Les ouvrages remblayés

Les ouvrages remblayés des descenderies et des galeries comprennent :

- le remblai à base d'argilites remaniées ;
- le soutènement composé de voussoirs et d'un matériau compressible périphérique ;
- le matériau compressible de bourrage injecté à l'extrados de ceux-ci. De manière pénalisante, il est assimilé à la zone de fracturation connectée (ZFC) reminéralisée par la perturbation alcaline.

La représentation conceptuelle des ouvrages remblayés des descenderies et des galeries est présentée sur les figure 5-24 et figure 5-25 respectivement.

5.2.6.1 Le remblai

Le remblai est considéré comme constitué d'argilites excavées et reconditionnées, remplissant l'intégralité des galeries à l'intrados entre les voussoirs et le radier.

Comme indiqué au chapitre 2 du présent volume, le remblai est représenté comme un milieu poreux, homogène et sans vide apical. En situation de référence du SEN, il est retenu (62) :

- une conductivité hydraulique définie au meilleur de la connaissance sur les matériaux à base d'argilites remaniées ;

- des propriétés de transport diffusif conservatives (porosité assimilée à un sable et Dp = D_0(HTO)) ;
- aucunes propriétés de rétention chimique par sorption ou précipitation.

La zone du remblai reminéralisée par la perturbation alcaline au contact des bétons (radier, voussoirs), dont l'extension est évaluée par simulation (quelques décimètres) est représentée avec les propriétés équivalentes à celles des éléments en béton dont est issue la perturbation. La zone influencée n'est pas représentée car aucune propriété de sorption n'est valorisée dans les remblais.

Les valeurs retenues pour les évaluations sont présentées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.6.2 Le revêtement-soutènement

Conformément aux conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), les voussoirs sont représentés de manière explicite avec des propriétés hydrauliques assimilées à celles d'un sable, des propriétés de transport prises de manière conservative (Dp = D_0(HTO)) et aucune propriété de rétention chimique (62).

Le matériau compressible périphérique aux voussoirs est représenté avec des propriétés hydrauliques et de transport pénalisantes définies par modélisation de façon à maximiser le flux des solutés selon la voie de transfert « ouvrage » (62). Il n'est pas pris en compte de rétention chimique par sorption ou précipitation dans ce matériau.

Les valeurs retenues pour les évaluations sont présentées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.6.3 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages remblayés

Comme indiqué au chapitre 2 du présent volume, la zone endommagée mécaniquement au droit des ouvrages remblayés (galeries dans l'UA et liaisons surface-fond dans l'USC/UT) est représentée selon les modalités exposées au chapitre 5.2.2.2 du présent volume et prend en compte (62) :

- la perturbation alcaline issue des composants en béton (voussoirs, radier) selon les modalités définies au chapitre 5.2.2.4 du présent volume ;
- les différentes galeries étant orientées selon la contrainte majeure ou la contrainte mineure, il est choisi de conceptualiser pour l'ensemble des galeries, l'orientation correspondant à la plus grande surface endommagée (*i.e.* σ_h).

Le détail des valeurs retenues pour les évaluations est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.2.7 Les formations encaissantes

5.2.7.1 La description des formations encaissantes

La couche du Callovo-Oxfordien est encadrée par les formations géologiques suivantes (cf. Figure 5-27) (62) :

- dans sa partie supérieure :
  - ✓ les Calcaires du Tithonien (dits Calcaires du Barrois), affleurant sur toute la zone ;
  - ✓ les marnes du Kimméridgien ;
  - ✓ les Calcaires de l'Oxfordien intégrant les niveaux aquifères calcaires supérieurs, les marnes de la série grise et les niveaux aquifères calcaire inférieurs de l'Oxfordien ;

- et dans sa partie inférieure :
  - ✓ la formation du Dogger (Dalle nacrée, Bathonien et Bajocien) ;
  - ✓ les marnes et argiles schisteuses du Lias ;
  - ✓ d'autres formations sous-jacentes (distinguer les Marnes de Longwy).

Les formations encaissantes n'ont pas de fonctions de sûreté après fermeture. Elles sont toutefois représentées jusqu'aux exutoires afin de permettre la quantification des incidences potentielles sur l'homme (cf. Chapitre 4 du présent volume et figure 5-28).

Conformément aux conclusions de l'analyse des risques et incertitudes et à la démarche de choix des paramètres (cf. Chapitres 1 et 2 du présent volume), les principales unités géologiques de part et d'autre de la couche du Callovo-Oxfordien sont représentées selon leur caractéristiques géométriques (épaisseur), minéralogiques (niveaux marneux, niveaux calcaires) et hydrauliques (présence d'horizons poreux). Les formations C3a et C3b de l'Argovien supérieur (premier niveau de l'Oxfordien calcaire) ne sont pas représentées.

En situation de référence, les propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique des formations encaissantes sont définies au meilleur des connaissances (cf. Figure 5-28), c'est-à-dire :

- dans les niveaux calcaires :
  - ✓ la conductivité hydraulique du modèle hydrogéologique ;
  - ✓ des propriétés de transport diffusif « *best-estimate* » ;
  - ✓ aucune propriété de rétention chimique par sorption ou par précipitation n'est prise en compte ;
- dans les niveaux marneux :
  - ✓ la conductivité hydraulique du modèle hydrogéologique ;
  - ✓ des propriétés de transport diffusif « *best-estimate* » ;
  - ✓ des propriétés de rétention chimique par sorption « *best-estimate* » ;
  - ✓ la rétention par sorption est valorisée dans les niveaux marneux en situation de référence *via* l'application d'un facteur correctif sur les propriétés de sorption de la couche du Callovo-Oxfordien.

Le détail des valeurs retenues est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

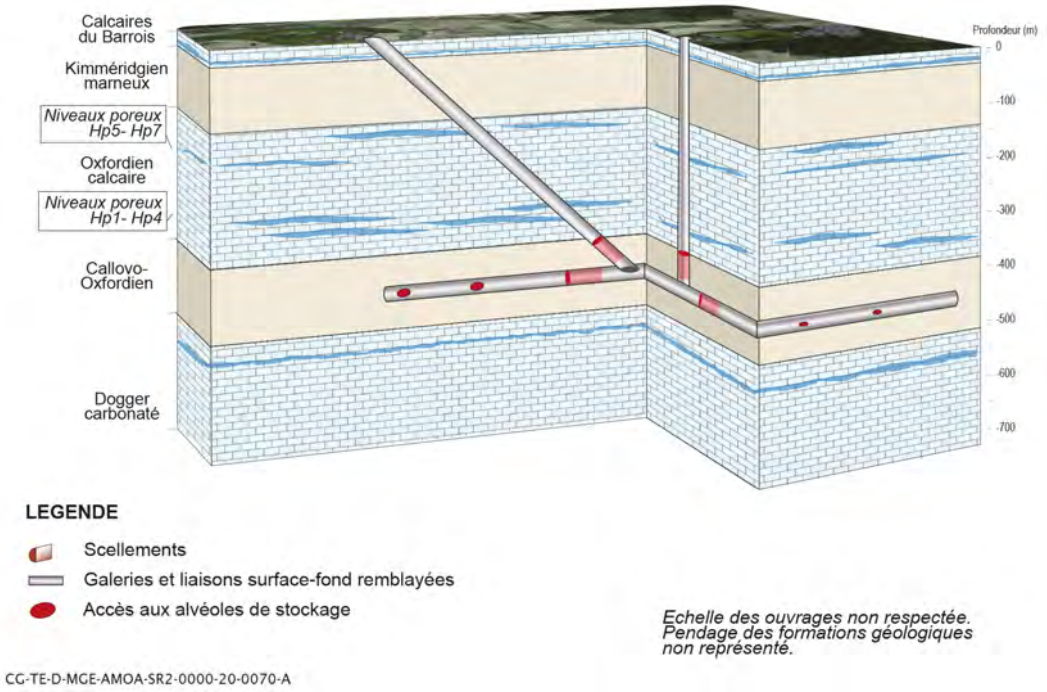


Figure 5-27 *Représentation schématique de la couche du Callovo-Oxfordien et des encaissants supérieurs et inférieurs*

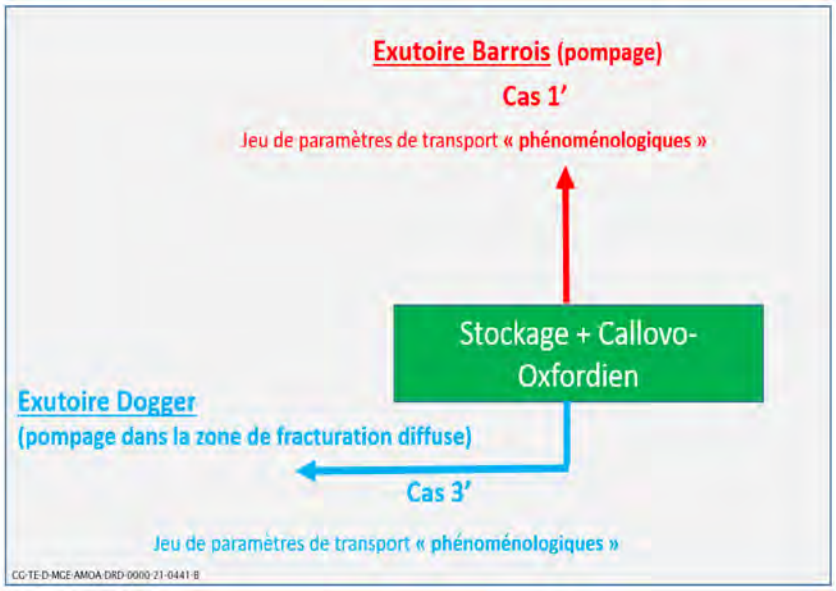


Figure 5-28 *Illustration schématique des cas d'évaluation des transferts des solutés vers les exutoires retenus dans les formations encaissantes en situation de référence du SEN*

5.2.7.2 La conceptualisation des formations encaissantes pour l'évaluation de performance et de sûreté

La conceptualisation des formations encaissantes repose sur la construction d'un modèle d'écoulement et de transfert dédié, destiné à simuler la migration des solutés (radionucléides et substances toxiques chimiques), depuis les ouvrages souterrains de l'installation souterraine de Cigéo jusqu'aux exutoires potentiels (naturels et/ou artificiels), et à travers les différentes voies de transfert du milieu géologique multicouches, incluant la couche du Callovo-Oxfordien, et les ouvrages de stockage.

Aussi, la conceptualisation physique et numérique des encaissants repose sur (cf. Figure 5-29) :

- une extension du modèle qui comprend *a minima* les exutoires potentiels (naturels ou artificiels) ;
- une reproduction aussi fidèle que possible (par rapport au modèle hydrogéologique) des trajectoires hydrauliques, des temps de transfert associés et des quantités empruntant chaque voie de transfert dans les différentes formations géologiques, ainsi que leur évolution dans le temps. Le temps de transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien depuis les ouvrages de stockage peut atteindre jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années, ce qui fait que les solutés arrivant dans les formations encaissantes sus et sous-jacentes sont soumis à l'influence de conditions hydrogéologiques futures ;
- la prise en compte du transport de solutés en convection/diffusion et dispersion cinématique dans les différentes formations géologiques ; ce point renvoie à la discrétisation spatio-temporelle du modèle ;
- la prise en compte d'exutoires identifiés (naturels et/ou artificiels) qui conditionnent l'extension latérale du modèle ; ce point est effectué en lien avec les ressources en eau disponibles et la définition des groupes de référence hypothétiques du compartiment biosphère ;
- la prise en compte des ouvrages de stockage au sein de la couche du Callovo-Oxfordien, avec un niveau de simplification en lien avec les voies de transfert.

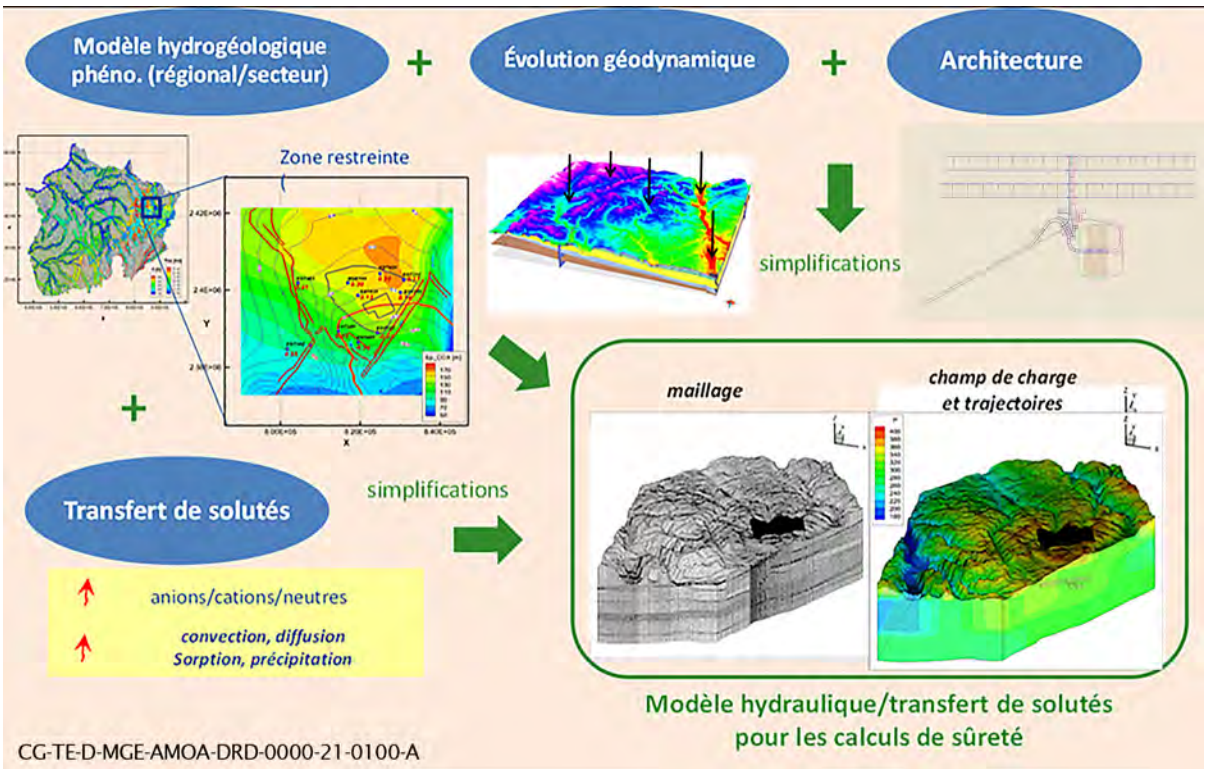


Figure 5-29 Principe de conceptualisation du modèle hydrogéologique pour l'évaluation de performance et de sûreté

L'évolution des écoulements et du transport convectif dans les formations aquifères, induite par la géodynamique au cours du prochain million d'années est évaluée à travers l'analyse des champs de vitesse transitoire associés aux trajectoires des panaches résultant des particules relâchées dans les aquifères.

Pour la situation de référence du SEN, il est retenu un modèle géodynamique considéré comme plus réaliste et dit « phénoménologique » qui repose sur le principe de non-équilibre entre l'amplitude de la surrection tectonique et la profondeur d'érosion par incision des vallées et sur une base de données de mesures d'altitude et d'âge de plus de 1 500 terrasses localisées en 400 points le long des rivières du bassin de Paris. Le taux de soulèvement tectonique « *best-estimate* » est d'environ 25 mètres par million d'années dans la zone du secteur et de moins de 40 mètres par million d'années dans la partie la plus active du bassin :

- dans le cas d'une évolution géodynamique « phénoménologique », l'aquifère de l'Oxfordien sous-jacent restera confiné avec une couche de marnes plutôt mince, dont l'épaisseur pourrait être localement d'environ dix mètres. Il n'y a donc pas d'affleurement de l'Oxfordien (cf. Partie gauche de la figure 5-49 présentée au chapitre 5.3.7.2 du présent volume pour la situation enveloppe).

5.2.7.2.1 Les écoulements dans l'Oxfordien

Quels que soient les instants de relâchement dans l'aquifère au droit de la ZIOS, les trajectoires convectives de solutés émis à différents instants dans l'Oxfordien sont dirigées vers le nord-ouest, avec des vitesses de l'ordre de 4 km tous les 100 000 ans. Les vitesses moyennes de transfert sont assez peu influencées par l'évolution géodynamique interne et externe.

Au droit de la ZIOS, les horizons poreux de l'Oxfordien sont peu productifs pour l'alimentation en eau des humains et des animaux.

5.2.7.2.2 Les écoulements dans le Dogger

Quels que soient les instants de relâchement dans l'aquifère au droit de la ZIOS, les trajectoires convectives de solutés émis dans le Dogger sont d'abord dirigées vers le nord-ouest, puis déviées vers le sud lorsqu'elles atteignent la faille de la Marne. Elles indiquent deux exutoires naturels localisés au sud de la ZIOS : la vallée de la Marne et celle du Rognon. Les vitesses moyennes varient entre 9 km et 16 km tous les 100 000 ans.

Au droit de la ZIOS, le Dogger est peu productif et ses eaux présentent une salinité qui les rend non potables pour l'alimentation en eau des humains et des animaux.

5.2.8 La conceptualisation des exutoires

5.2.8.1 Le rappel des exutoires retenus pour la situation de référence

Pour mémoire, les exutoires retenus pour la situation de référence sont (cf. Chapitre 4 du présent volume et document « Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage » (57)) :

- un exutoire de pompage dans les calcaires du Barrois ;
- un exutoire de pompage dans le Dogger au niveau de la Zone de Fracturation Diffuse (ZFD).

5.2.8.2 La méthode d'évaluation de la concentration en solutés aux exutoires

5.2.8.2.1 L'exutoire de pompage dans les calcaires du Barrois

Le pompage dans les calcaires du Barrois constitue un exutoire pour les solutés (radionucléides et substances toxiques chimiques) ayant migré verticalement à travers les formations encaissantes sus-jacentes depuis le stockage (cf. Chapitre 2 du présent volume). Du fait de l'hétérogénéité de la formation des calcaires du Barrois, la concentration en solutés pompée correspond au ratio entre le flux total de solutés entrant dans la formation et le débit de pompage du forage de l'ordre de 150 $L.mn^{-1}$, correspondant à des valeurs basses de débit pompable mesuré dans le Barrois (cf. Chapitre 4 du présent volume).

5.2.8.2.2 L'exutoire de pompage dans le Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse

En lien avec les éléments indiqués au chapitre 2 du présent volume, il est considéré de manière conservative que la totalité des trajectoires dans le Dogger est interceptée par la zone de fracturation diffuse « ZFD » (cf. Figure 5-30).

L'évaluation de la concentration en solutés à l'exutoire de pompage dans le Dogger est effectuée en considérant une « ligne d'exutoire », d'extension identique à celle des trajectoires hydrauliques et panaches convectifs de solutés (cf. La ligne épaisse en rouge sur la figure 5-30, positionnée en amont hydraulique de la ZFD, et captant de manière conservative la totalité du flux de solutés transitant dans cette zone.

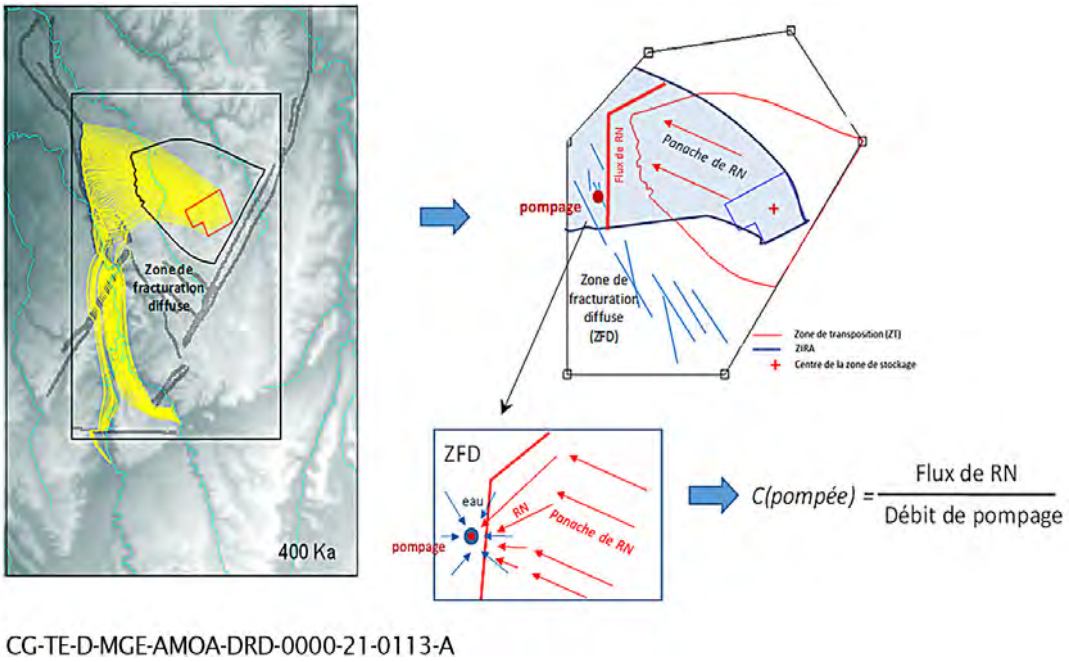
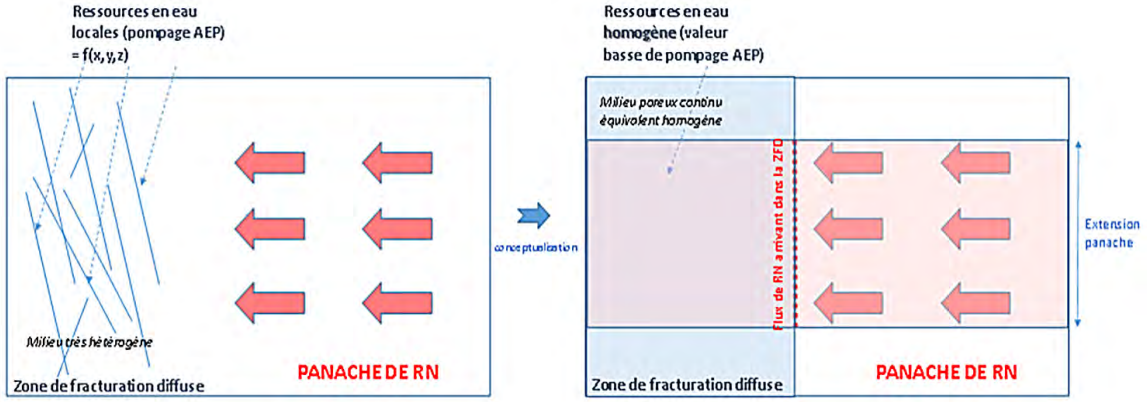


Figure 5-30 Méthode d'évaluation de la concentration pompée aux exutoires de type pompage dans la ZFD

Ce choix est fondé sur les considérations suivantes (cf. Figure 5-31) :

- la représentation hydrogéologique détaillée d'un milieu présentant des fractures et donc localement de forts contrastes de propriétés hydrauliques (transmissivités des failles *versus* celles des milieux poreux non/peu fracturés entre les failles) est difficile à appréhender (et à maitriser), tant en termes de caractérisation que de schémas conceptuel et numérique. Elle comporte de ce fait de nombreuses incertitudes. Aussi, il est fait le choix de représenter la zone de fracturation diffuse comme un milieu poreux continu équivalent, de plus forte perméabilité que celle de la formation en amont hydraulique de la ZFD ;
- le fort contraste de perméabilité entre la ZFD et la zone amont, associé aux hétérogénéités locales de dilution, conduit à des forts contrastes de concentration qu'il est difficile d'appréhender. En effet, la difficulté réside dans le choix de la discrétisation spatiale (taille de la maille) permettant à la fois d'identifier une « maille » de concentration maximale et de vérifier la compatibilité des conditions locales de dilution avec une ressource en eau locale suffisante et pérenne pour alimenter le groupe de référence hypothétique. Une « ligne d'exutoire » (en pointillé rouge sur la figure 5-31) calée sur une surface représentant l'extension latérale du panache de solutés (de l'ordre de 5 km) et de la hauteur de la formation géologique concernée par le panache de solutés (de l'ordre de 100 mètres) à partir de laquelle le flux de solutés arrivant à l'exutoire dans la ZFD est quantifié, permet de s'affranchir de cette difficulté ;
- les concentrations de solutés dans le panache en amont hydraulique de la ZFD sont homogènes.

Sur ces bases, la conversion du flux de solutés en concentration dans l'eau pompée est effectuée au moyen d'une dilution correspondant au débit d'eau pompable par le forage. Il est fait le choix de retenir, comme débit de pompage, et donc de dilution, la valeur basse de débit d'eau pompable tel qu'observé dans des captages d'alimentation en eau potable (AEP) dans la ZFD, soit de l'ordre de 100 $L.mn^{-1}$ (cf. Figure 5-30 et figure 5-31), et compatible avec les besoins en eau d'un groupe de référence hypothétique.



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0114-A

Figure 5-31 Conceptualisation de l'exutoire de la zone de fracturation diffuse dans le Dogger

5.2.9 Les valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert des solutés

Les valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert de solutés, ainsi que les valeurs des paramètres de rétention chimique par sorption et précipitation, retenues pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79 (principaux radionucléides mobiles), sont indiquées respectivement dans le tableau 5-4 et le Tableau 5-5. Concernant les propriétés de rétention du sélénium (en particulier de la précipitation chimique), « Se79 (VI) » désigne le degré d'oxydation le plus élevé (+VI) du sélénium (ne bénéficiant d'aucune limitation par précipitation), et « Se79 (autres) » désigne l'ensemble des autres degrés d'oxydation du sélénium qui peuvent bénéficier de la précipitation, en particulier dans la couche du Callovo-Oxfordien.

Le détail de l'ensemble des valeurs de paramètres prises en compte pour la situation de référence (intégrant également les autres éléments chimiques) est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

Tableau 5-4 *Situation de référence – valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert de solutés retenues pour les trois anions mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79)*

	Perméabilité K ($m.s^{-1}$)	Coefficient de diffusion effectif De ($m^2.s^{-1}$)			Porosité accessible à la diffusion ω (-)
		^{129}I	^{36}Cl	^{79}Se	
Callovo-Oxfordien sain	Kv = 7.10^{-14} Kh = 2.10^{-13}	3.10^{-12}	5.10^{-12}	$2,5.10^{-12}$	0,07
Zone fracturée connectée (ZFC)	**Galeries/LSF (UA)/Alvéoles MA-VL**				
	10^{-9}	6.10^{-12}	10^{-11}	5.10^{-12}	0,07
	Alvéoles HA				
	10^{-9}	6.10^{-12}	10^{-11}	5.10^{-12}	0,07
	Scellements de fond (galeries)				
	5.10^{-11}	6.10^{-12}	10^{-11}	5.10^{-12}	0,07
	Scellements de puits et descenderies (*)				
	-	-	-	-	-
ZFC foisonnée (alv. MA-VL)	10^{-9}	6.10^{-12}	10^{-11}	5.10^{-12}	0,07
ZFC reminéralisée (1 m)	10^{-8}	$1,5.10^{-11}$	$2,5.10^{-11}$	$1,25.10^{-11}$	0,35
Remblai (galeries, desc.)	10^{-9}	$6,9.10^{-10}$			0,3
Béton revêtement/soutènement (voussoirs)/remplissage/massifs d'appui	10^{-6}	$8,05.10^{-10}$			0,35
Interface noyau/argilites au droit des scellements	**Scellements de fond (galeries)**				
	5.10^{-12}	$8,05.10^{-10}$			0,35
	Scellements de puits et descenderies (**)				
	10^{-12}	5.10^{-12}	$2,5.10^{-12}$		0,05
Noyau de scellement	10^{-12}	5.10^{-12}	$2,5.10^{-12}$		0,05
Tête d'alvéole HA	10^{-6}	$9,2.10^{-10}$			0,4
Jeux inter-colis/vides apicaux	10^{-4}	$2,310^{-9}$			1
Colis de stockage/colis primaire	10^{-6}	$4,6.10^{-10}$			0,2

(*) Aucune zone fracturée connectée n'est retenue dans l'USC (+ UT)

(**) Au droit des ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond (LSF), il est considéré une dépose totale du revêtement-soutènement (valeurs de paramètre identiques au noyau argileux)

Tableau 5-5 *Situation de référence – valeurs des paramètres de rétention chimique (sorption, précipitation) retenues pour les trois anions mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79)*

	Coefficient de partage solide/solution Kd ($m^3.kg^{-1}$)				Limite de solubilité Csat ($mol.L^{-1}$)			
	^{129}I	^{36}Cl	^{79}Se (VI)	^{79}Se (autres)	^{129}I	^{36}Cl	^{79}Se (VI)	^{79}Se (autres)
Callovo-Oxfordien sain	0				infinie			2.10^{-9}
Zone fracturée connectée (ZFC)	0				infinie			2.10^{-9}
Béton de revêtement/soutènement (voussoirs) des alvéoles MA-VL	10-3	10-3	3.10-3	3.10-3	infinie			$1,6.10^{-4}$
Noyau de scellement	0			10-3	infinie			2.10^{-9}

5.3 La description et la conceptualisation de la situation enveloppe

Les données utilisées pour le traitement de la situation enveloppe du SEN et les hypothèses associées sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.1 La position du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien

5.3.1.1 La position verticale du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien

Comme présenté au chapitre 2 du présent volume, le deuxième mode de représentation, retenu en situation enveloppe du SEN, vise à positionner le stockage pour préserver une épaisseur de garde de Callovo-Oxfordien sain égale au minimum spécifié dans les exigences applicables au centre de stockage Cigéo, soit 50 mètres.

Le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien sont respectivement assimilés aux surfaces SNC (surface de non-conformité) et LS0 (limite de séquence 0). La couche du Callovo-Oxfordien est représentée avec son épaisseur mesurée sur la ZIOS (*i.e.* Variant de 142 mètres à 162 mètres du sud-ouest vers le nord-est). Les quartiers de stockage HA et MA-VL sont positionnés de sorte à ménager :

- soit une épaisseur de garde saine égale à 50 mètres dans la partie supérieure de la couche du Callovo-Oxfordien. Les alvéoles HA sont alors représentés dans un plan différent de celui des alvéoles MA-VL.

  L'épaisseur de garde de la couche du Callovo-Oxfordien en partie inférieure est déduite de l'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien, en soustrayant l'extension verticale maximale de la zone d'argilites endommagées en voûte et en radier des alvéoles de stockage (cf. Figure 5-32) ;

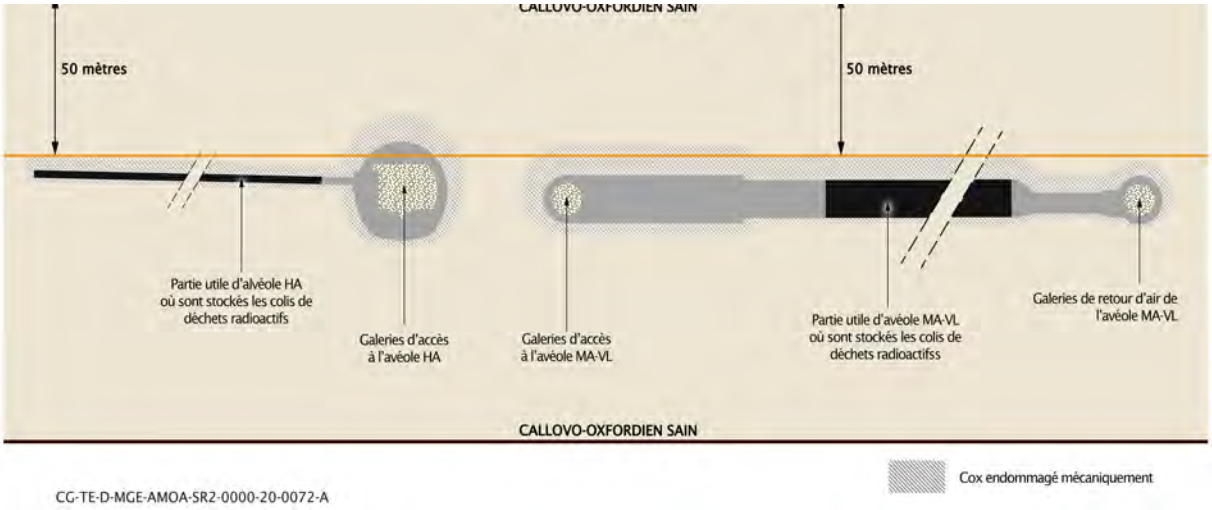


Figure 5-32 *Illustration schématique du positionnement des alvéoles de stockage HA et MA-VL dans la couche du Callovo-Oxfordien, en situation enveloppe du SEN (prise en compte de l'épaisseur de garde minimale fixée par les exigences en partie supérieure (50 mètres))*

- soit une épaisseur de garde saine égale à 50 mètres dans la partie inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien ;

  L'épaisseur de garde de la couche du Callovo-Oxfordien en partie supérieure est déduite de l'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien, en soustrayant l'extension verticale maximale de la zone d'argilites endommagées en voûte et en radier des alvéoles de stockage (cf. Figure 5-33).

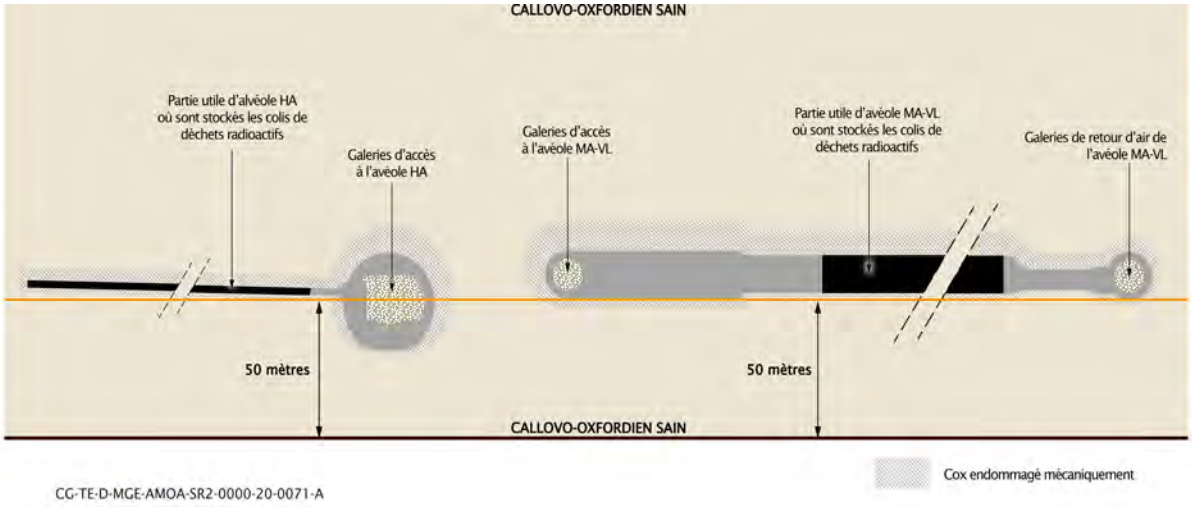


Figure 5-33 *Illustration schématique du positionnement des alvéoles de stockage HA et MA-VL dans la couche du Callovo-Oxfordien, en situation enveloppe du SEN (prise en compte de l'épaisseur de garde minimale fixée par les exigences en partie inférieure (50 mètres))*

Ainsi, d'un point de vue conceptuel, le positionnement vertical des ouvrages souterrains de l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo au sein du Callovo-Oxfordien en situation enveloppe est schématiquement représenté sur la figure 5-34 :

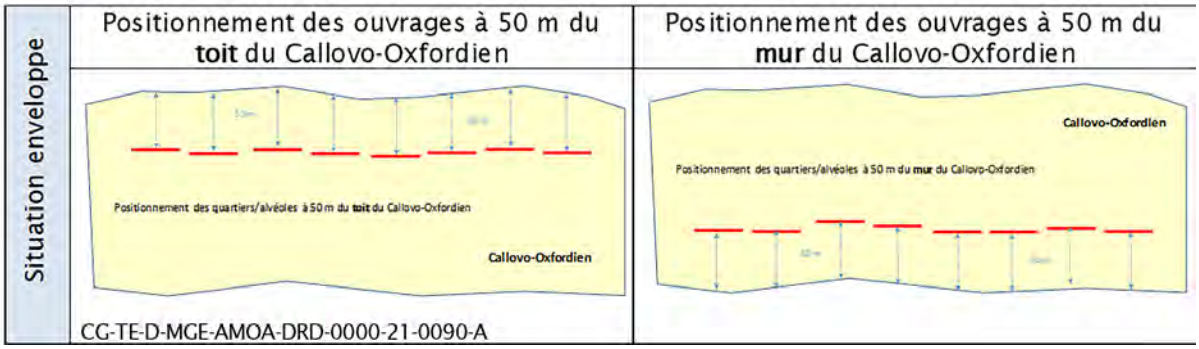


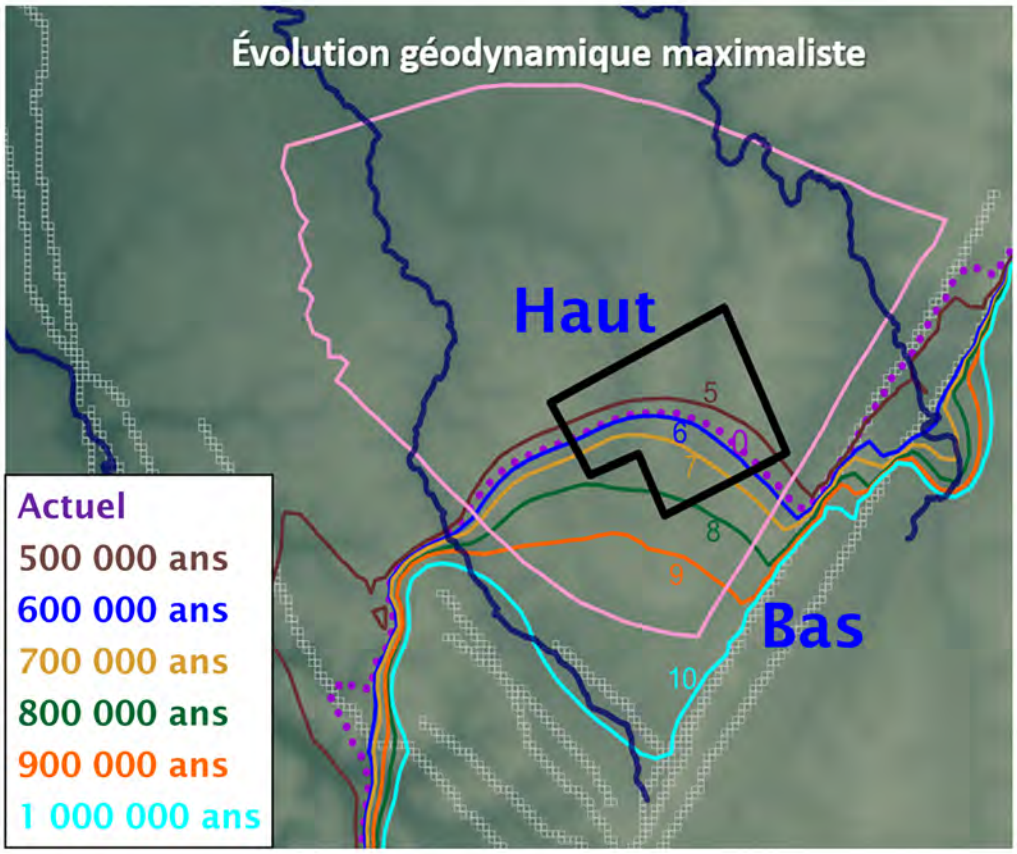
Figure 5-34 *Positionnement vertical des ouvrages souterrains de l'installation souterraine de Cigéo au sein de la couche du Callovo-Oxfordien pour la situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien (à gauche) ou à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien (à droite))*

5.3.1.2 Les gradients de charge hydrauliques verticaux dans la couche du Callovo-Oxfordien associés

Pour mémoire, la position à l'actuel de la limite séparant les écoulements descendants des écoulements ascendants dite « ligne d'inversion du gradient vertical de charge » est affectée par l'évolution géodynamique.

Le scénario d'évolution maximaliste (applicable à la situation enveloppe ; cf. Chapitre 2 du présent volume) est caractérisé par un déplacement de la ligne d'inversion vers le sud-ouest, avec une position relativement stable jusqu'à 600 000 ans. La mise à l'affleurement de l'Oxfordien dans la vallée de l'Ornain provoque une perte de charge hydraulique de ce dernier et conduit à augmenter le gradient de charge ascendant vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien. Aussi, la ligne d'inversion du gradient vertical de charge se déplace vers le sud, et à 800 000 ans l'ensemble de la ZIOS est sous un écoulement ascendant au sein du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 5-35).

Conformément à la démarche et aux conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitres 1 et 2 du présent volume), pour les évaluations de la situation enveloppe, il est fait le choix de retenir l'état de l'évolution du gradient de charge hydraulique à un million d'années, et en considérant de manière uniforme le gradient de charge maximal appliqué à toute la ZIOS (0,21 $m.m^{-1}$).



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0091-A

Figure 5-35 *Gradients de charge ascendants verticaux dans la couche du Callovo-Oxfordien pour le scénario d'évolution géodynamique maximaliste applicable pour la situation enveloppe*

Pour chacune des deux configurations décrites au chapitre précédent, une différence de charge hydraulique maximale entre le mur et le toit de la couche du Callovo-Oxfordien, correspondant à des flux hydrauliques ascendants (configuration avec implantation du stockage en conservant une garde saine de 50 mètres avec le toit du Callovo-Oxfordien) ou descendants (configuration avec implantation du stockage en conservant une garde saine de 50 mètres avec le mur du Callovo-Oxfordien), est retenue sur la base du modèle hydrogéologique avec évolution géomorphologique maximaliste. Le gradient de charge hydraulique est représenté de manière uniforme et constante dans le temps sur la ZIOS, d'intensité 0,21 $m.m^{-1}$ vers l'Oxfordien pour la première configuration et d'intensité 0,06 $m.m^{-1}$ vers le Dogger pour la deuxième configuration.

Dans l'encaissant supérieur (Oxfordien), il est pris en compte, en situation enveloppe, un gradient de charge horizontal d'intensité 4×10^{-3} $m.m^{-1}$ (prenant en compte un moteur hydraulique enveloppe) globalement orienté vers le nord et appliqué de manière uniforme et pérenne sur le million d'années.

La figure 5-36 illustre la combinatoire des gradients de charge hydraulique vertical (dans la couche du Callovo-Oxfordien) et horizontal (dans l'Oxfordien) considérés pour la situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit ou du mur du Callovo-Oxfordien).

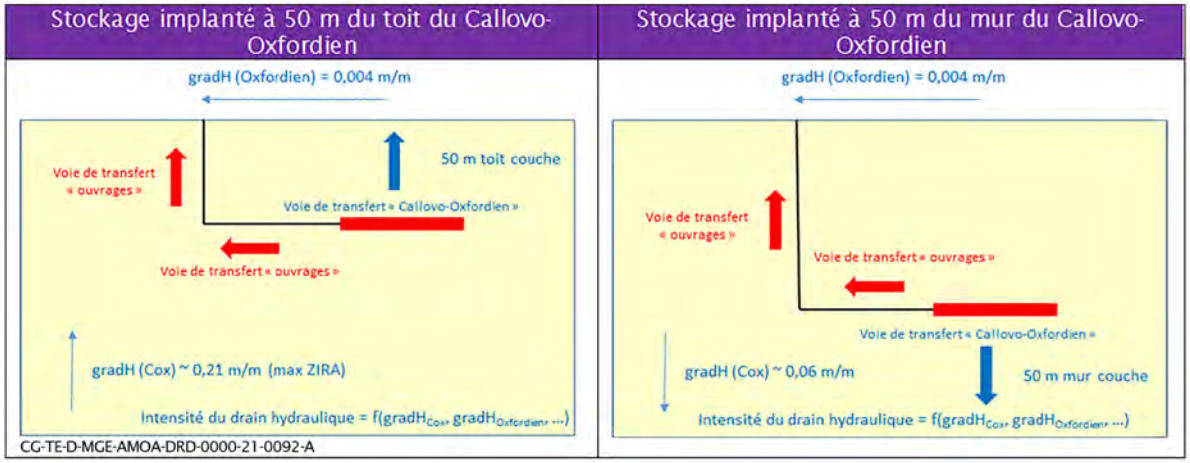


Figure 5-36 *Combinatoire des gradients de charge hydraulique (vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien et horizontal dans l'Oxfordien) retenue pour la situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien (à gauche) ou à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien (à droite))*

5.3.2 La couche du Callovo-Oxfordien

5.3.2.1 La couche du Callovo-Oxfordien saine

Les principales caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien se basent sur les connaissances disponibles et l'analyse des risques et des incertitudes présentées au chapitre 2 du présent volume. En cohérence avec la démarche de choix des valeurs de paramètres en situation enveloppe (cf. Chapitre 1 du présent volume), les valeurs retenues pour représenter le Callovo-Oxfordien sont définies de manière conservative.

De manière identique à la situation de référence, la couche du Callovo-Oxfordien est représentée sous la forme d'une couche homogène latéralement et verticalement et exempte de fractures.

En situation enveloppe du SEN, les valeurs des paramètres hydrauliques, de transfert et de rétention chimique sont définies de manière conservative sur la base des connaissances et des gammes de valeurs disponibles (62). Les valeurs de dispersivités longitudinales et verticales sont les mêmes valeurs conventionnelles que celles considérées en situation de référence du SEN.

En cohérence avec la démarche de choix des paramètres en situation enveloppe (cf. Chapitre 1 du présent volume), et en tenant compte d'une anisotropie de la conductivité hydraulique d'un facteur 3 entre les deux directions (horizontale et verticale), les valeurs de conductivité hydraulique retenues pour le Callovo-Oxfordien sain sont de 1×10^{-13} m.s^{-1} dans la direction verticale et 3×10^{-13} m.s^{-1} dans la direction horizontale. Les valeurs du coefficient de diffusion et des paramètres de rétention chimique (coefficient de partage, limite de solubilité) sont des valeurs conservatives :

- les valeur du coefficient de partage et de limite de solubilité considérées sont respectivement les valeurs minimales (Kd_{min}) et maximales ($Csat_{max}$) indiquées dans le référentiel de comportement des radionucléides et substances toxiques chimiques (62), définies pour chaque élément chimique ;
- pour ce qui concerne la diffusion des anions, compte tenu du niveau de connaissance disponible (notamment sur la variabilité spatiale), la valeur du coefficient de diffusion effectif des anions retenue dans la couche du Callovo-Oxfordien dépend du radionucléide et est égale à deux fois la valeur moyenne de ce coefficient prise en situation de référence ; pour ce qui concerne les neutres ou cations, la valeur du coefficient de diffusion effectif retenue dans la couche du Callovo-Oxfordien est la valeur moyenne obtenue pour le traceur (HTO ou Cs selon l'état ionique des formes neutres ou cationiques) majorée de 30 % afin de prendre en compte les incertitudes de mesures (32).

Les valeurs des paramètres hydraulique et de transfert de solutés, ainsi que les valeurs de rétention chimique par sorption et précipitation, retenues pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79 (principaux radionucléides mobiles), sont indiquées respectivement dans le tableau 5-7 et le tableau 5-8 du chapitre 5.3.9 du présent volume (à la fin du chapitre 5.3 du présent volume décrivant la situation enveloppe).

5.3.2.2 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains

5.3.2.2.1 La représentation de l'endommagement mécanique de la couche du Callovo Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains et son extension

Comme définis lors de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), l'endommagement mécanique des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien est conceptualisé par une zone fracturée connectée (ZFC) et une zone à fracturation discrète (ZFD).

L'endommagement mécanique est représenté de manière continue le long des ouvrages, hormis au droit des zones de dépose du revêtement-soutènement (*i.e.* Au niveau des scellements), sur toute la durée des évaluations.

Leur représentation en situation enveloppe du SEN (cf. Figure 5-37) prend en compte (cf. Chapitre 2 du présent volume et du document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)) :

- la différence de comportement selon l'unité (UA, USC/UT) de la couche du Callovo-Oxfordien (*i.e.* Absence de ZFC dans l'USC et l'UT) ;
- la ZFD dans l'UA est représentée de manière explicite comme une zone hydrauliquement moins performante que la couche du Callovo-Oxfordien ;
- afin de prendre en compte les incertitudes résiduelles sur l'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien dans l'USC/UT, une ZFD est représentée le long des ouvrages dans l'USC/UT ;
- la géométrie et la proportionnalité de l'extension de l'endommagement par rapport au diamètre et à l'orientation de l'ouvrage excavé selon la contrainte principale majeure ou mineure (extension maximale) ;
- la géométrie et la proportionnalité de l'extension de la ZFC-f par rapport au taux de vide des alvéoles et au foisonnement des argilites sur le long terme selon une approche maximisant l'extension du foisonnement (cf. Figure 5-37).

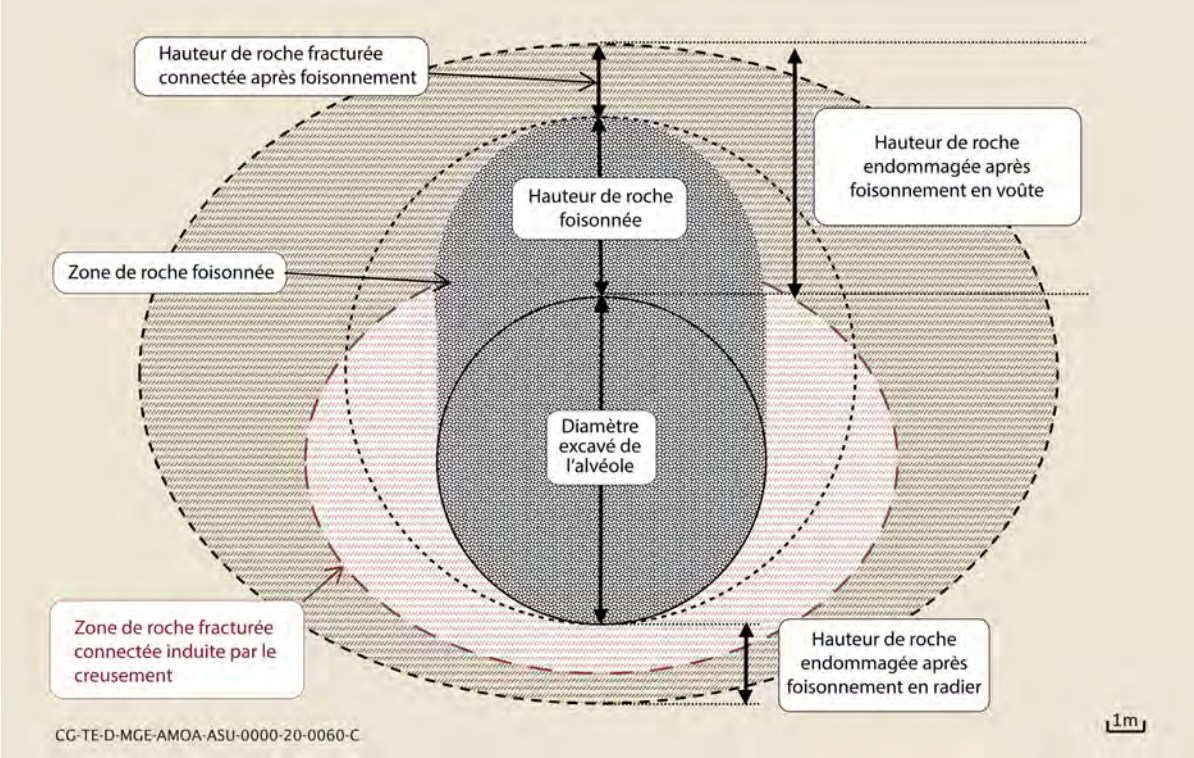


Figure 5-37 *Représentation illustrative de la conceptualisation du foisonnement en situation enveloppe du SEN au droit de la partie utile des alvéoles de stockage MA-VL*

Par simplification, les zones de fracturation initiales liées au creusement (ZFC-0 et ZFD) sont représentées par des cercles de surface équivalente à celles des ellipses représentant l'endommagement (cf. Figure 5-38). Également, les différentes galeries étant orientées selon la contrainte majeure ou la contrainte mineure, il est choisi pour l'ensemble des galeries l'orientation correspondant à la plus grande surface (*i.e.* σ_h).

La représentation conceptuelle de la ZFC-f liée au foisonnement des alvéoles de stockage HA et MA-VL est respectivement détaillée aux chapitres 5.3.3 et 5.3.4 du présent volume.

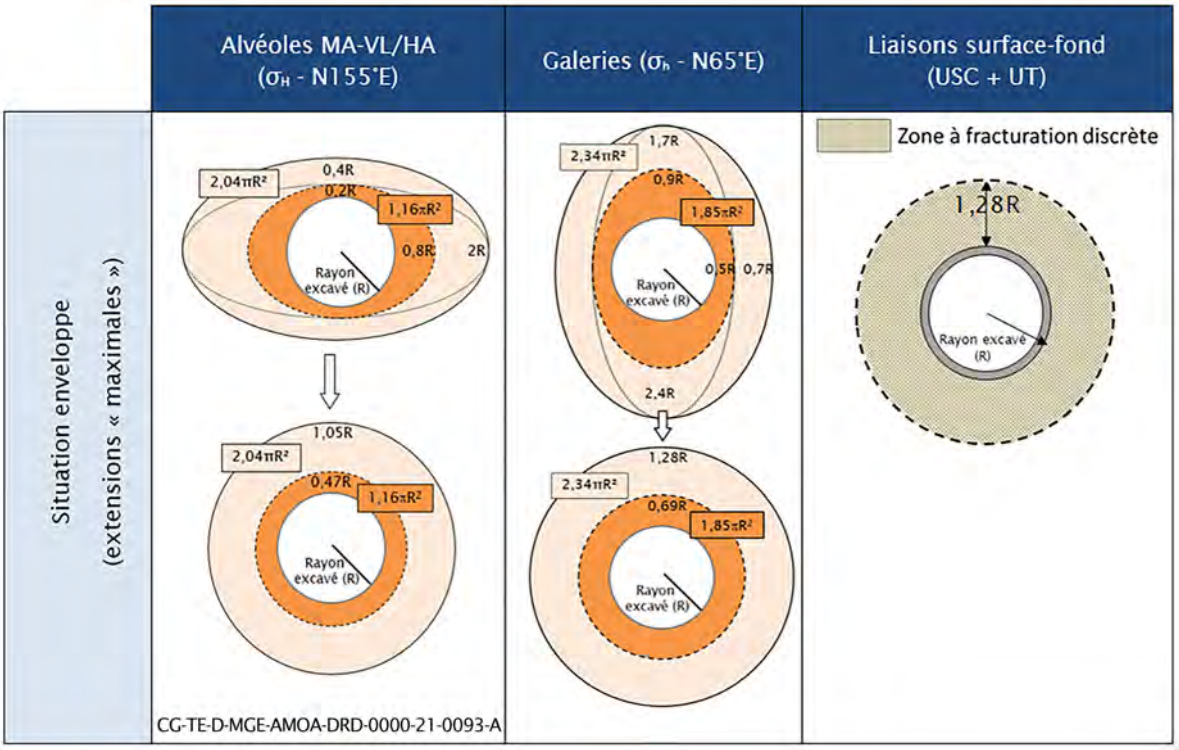


Figure 5-38 *Schéma de conceptualisation de l'endommagement mécanique (zones de fracturation connectée et à fracturation discrète) en situation enveloppe*

5.3.2.2.2 Les propriétés hydro-dispersives et de rétention chimique de la partie de la couche du Callovo-Oxfordien endommagée en champ proche des ouvrages souterrains

Conformément à l'analyse présentée au chapitre 2 du présent volume et à la démarche de choix des paramètres en situation enveloppe (cf. Chapitre 1 du présent volume), les propriétés de la ZFC-0 et de la ZFD sont définies de la manière suivante en situation enveloppe du SEN (62) :

- la zone fracturée connectée (ZFC-0) :
  - ✓ les paramètres hydrauliques sont définis de manière conservative sur la base des connaissances et des gammes de valeurs disponibles ;
  - ✓ des facteurs correctifs sont appliqués aux valeurs du coefficient de diffusion de la couche du Callovo-Oxfordien non endommagée mécaniquement ;
  - ✓ les paramètres de solubilité et de sorption sont identiques à ceux de la couche du Callovo-Oxfordien non endommagée mécaniquement ;
- la zone de fracturation diffuse (ZFD) :
  - ✓ elle présente une valeur de conductivité hydraulique conservative, issue des mesures au Laboratoire souterrain de Meuse-Haute/Marne après excavation : 10^{-11} m.s^{-1} dans l'USC/UT et 10^{-10} m.s^{-1} dans l'UA :
    - la valeur de conductivité hydraulique de la ZFD dans l'USC/UT est de 10^{-11} m.s^{-1}. Cette dernière est différente de celle définie dans l'UA (10^{-10} m.s^{-1}) car représentative du fait qu'il n'est pas observé d'endommagement mécanique au droit des ouvrages dans l'USC/UT ;
    - son extension dans l'USC/UT est supposée identique à celle définie dans l'UA selon le modèle conceptuel ;
  - ✓ les valeurs des paramètres de diffusion et de rétention chimique dans la ZFD sont identiques à celles de la couche du Callovo-Oxfordien non endommagée mécaniquement.

La zone de sur-endommagement (ZFC-f) liée au foisonnement des argilites au droit des alvéoles HA et MA-VL est représentée avec les mêmes valeurs de paramètres hydro-dispersifs et de rétention chimique que la ZFC-0 hors perturbation chimique.

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.2.3 Le transitoire thermique

Comme indiqué au chapitre 2 du présent volume, le transitoire thermique est représenté en situation enveloppe de manière identique à la situation de référence du SEN. Les facteurs correctifs considérés sont identiques à ceux de la situation de référence du SEN (cf. Chapitre 5.2.2.3 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)).

5.3.2.4 La perturbation alcaline de la couche du Callovo-Oxfordien

Comme défini au chapitre 2 du présent volume, la perturbation alcaline est représentée *via* une zone reminéralisée et une zone influencée.

Sa représentation en situation enveloppe intègre les points suivants par rapport à la situation de référence (cf. Chapitre 2 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)) :

- de manière pénalisante, la zone reminéralisée est représentée par des caractéristiques hydrauliques assimilées à celles d'un sable. Aucune propriété de transport ou de rétention chimique n'est prise en compte dans cette zone ;
- la zone influencée est représentée de manière identique et avec les mêmes facteurs correctifs qu'en situation de référence du SEN.

5.3.2.5 Les perturbations chimiques issues des déchets MA-VL

Comme défini au chapitre 2 du présent volume, les perturbations chimiques (saline, organique et le cumul des perturbations chimiques) issues des déchets MA-VL sont représentées en situation enveloppe du SEN à travers l'application des mêmes extensions (maximales et dès l'instant initial) et des mêmes facteurs correctifs dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien que ceux définis au chapitre 5.2.2.5 du présent volume et dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.3 Les alvéoles de stockage HA

En situation enveloppe du SEN, à l'exception de la prise en compte de la ZFD, les composants représentés sont les mêmes que ceux représentés en situation de référence du SEN.

Ainsi, comme en situation de référence, il est considéré dans la conceptualisation de l'alvéole HA (i) la tête de l'alvéole explicitement représentée de façon conservative par un matériau poreux continu homogène, (ii) la partie utile, (iii) les zones de fracturation sur toute la longueur de l'alvéole (ZFC-0 et ZFD), ainsi que (iv) la zone de foisonnement (ZFC-f).

Conformément à la démarche de choix des valeurs de paramètres pour la situation enveloppe du SEN et aux conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitres 1 et 2 du présent volume), les taux de vide retenus pour l'évaluation de la hauteur de foisonnement (surextension au-delà de la voûte des alvéoles) sont les suivants (cf. Figure 5-39) :

- 12 % pour les alvéoles du quartier pilote HA ;
- 35 % pour les alvéoles du quartier de stockage HA.

De même qu'en situation de référence, le chemisage et le matériau de remplissage à l'extrados du chemisage ne sont pas explicitement représentés. On considère que le matériau à l'extrados du chemisage est intégré à la partie utile de l'alvéole (cf. Figure 5-39).

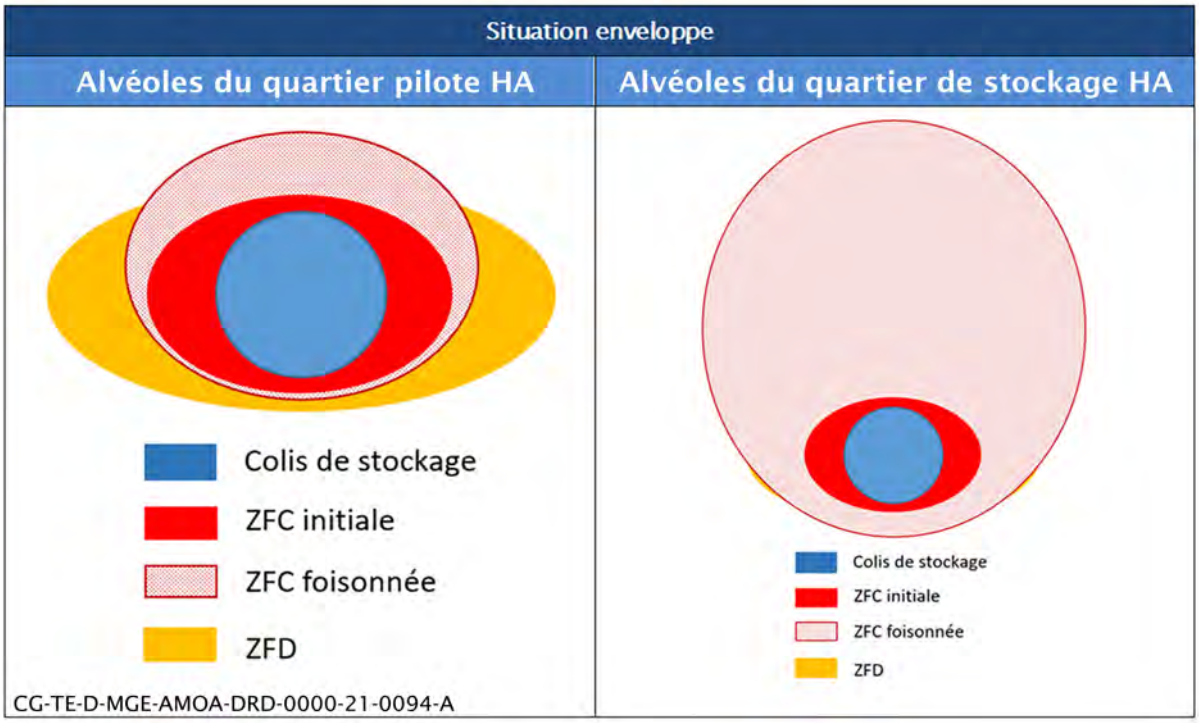


Figure 5-39 *Principes de représentation de la partie utile des alvéoles HA en situation enveloppe*

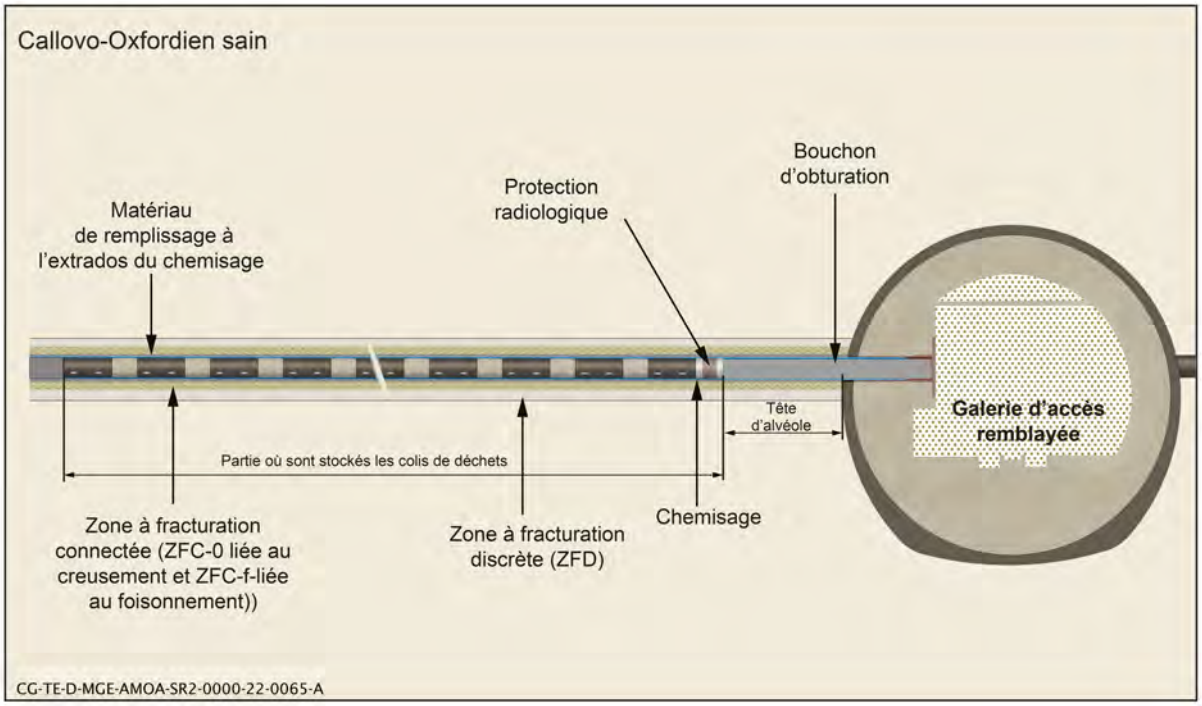


Figure 5-40 *Représentation schématique des alvéoles HA de stockage de colis de déchets HA en situation enveloppe du SEN*

5.3.3.1 Les colis HA stockés

5.3.3.1.1 La spéciation du sélénium dans les déchets HA

En situation enveloppe du SEN, il est fait l'hypothèse sur la base des connaissances (cf. Chapitres 2 et 5.2.3.1.1 du présent volume), d'une fraction de 20 % de sélénium sous la forme Se(+VI) pour l'ensemble des déchets vitrifiés (62).

5.3.3.1.2 Le conteneur de stockage HA

Conformément aux conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), il est fait le choix en situation enveloppe du SEN de considérer la durée minimale d'étanchéité des conteneurs de stockage HA, permettant de respecter les exigences[54].

La durée d'étanchéité minimale après mise en stockage est pilotée par l'exigence de décroissance des radionucléides à vie courte entre la mise en stockage et le contact entre la matrice vitrifiée et l'eau, ce qui correspond à une durée d'étanchéité d'environ (cf. Figure 5-41) (62) :

- 400 ans pour les colis HA0 stockés dans le quartier pilote HA ;
- 350 ans pour les colis HA0 et MA-VL 6 vitrifiés co-stockés en intercalaire dans le quartier de stockage HA ;
- 500 ans pour les colis HA1 et HA2 stockés dans le quartier de stockage HA.

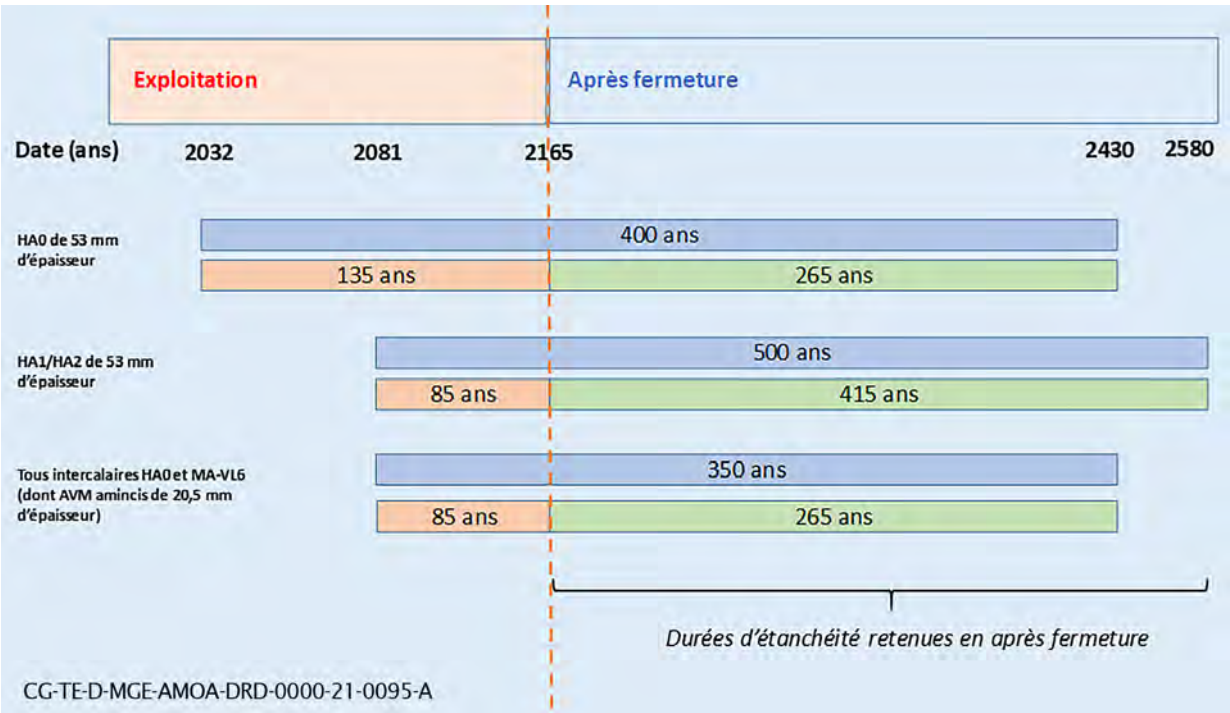


Figure 5-41 Durées d'étanchéité des conteneurs de stockage HA retenues en situation enveloppe

[54] Les valeurs retenues pour la durée d'étanchéité des conteneurs de stockage correspondant au comportement phénoménologique des conteneurs (hors prise en compte du transitoire hydraulique-gaz) dans le temps tels que conçus et sur la base de la connaissance scientifique et technologique relèvent de la situation de référence du SEN. Les valeurs pour la situation enveloppe du SEN relèvent des exigences applicables à l'installation de stockage Cigéo pour l'après-fermeture.

5.3.3.1.3 Le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques

Le choix des modèles de relâchement et des paramètres associés pour les colis de déchets en situation enveloppe du SEN est détaillé dans l'analyse conduite au chapitre 2 du présent volume. Les valeurs de paramètres des modèles sont présentés dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62). Selon les familles de déchets, sont retenus en situation enveloppe du SEN :

- un régime d'altération en vitesse initiale « V_0.S » ;
- un modèle de type « labile » pour certaines familles présentant une faible résistance à la lixiviation ou pour lesquelles les données disponibles (composition du verre, surface accessible à l'eau) ne permettent pas de paramétrer un modèle.

Le tableau 5-6 synthétise les modèles de relâchement retenus, par famille élémentaire de colis de déchets, pour la situation enveloppe.

Tableau 5-6 Modèles de relâchement retenus pour la quantification des termes sources verre (quartiers de stockage HA) en situation enveloppe

Filière déchets - Quartier stockage	Famille élémentaire de déchets et type de conteneur		Durée de vie du conteneur en phase après fermeture (ans)	Modèle de relâchement (situation enveloppe)
Déchets HA0 – Quartier pilote HA	COG_0150		265	V_0.S
	COG_0160			Labile
	COG_0870 (non vitrifiés)			Labile
Déchets HA0 (intercalaires) – Quartier de stockage HA	Piver	CEA_0200	415	V_0.S
		CEA_1190		Labile
	AVM amincis (20,5 mm)	CEA_1500 (non vitrifiés)	265	Labile
		CEA_0350		V_0.S
		CEA_1070A CEA_1070B		
		CEA_1080-S'21		V_0.S
		CEA_1080-SAN-60-15-22		
		CEA_1080-SAN-55-20-20-DS		
		CEA_1080-SAN-55-20-20		V_0.S
		CEA_1080-SPNM'		Labile
Déchets MA-VL6 (intercalaires) – Quartier de stockage HA		CEA_1120A CEA_1120B		V_0.S
	CEA_0340		415	V_0.S
	COG_0470			

	COG_0475		Labile
Déchets HA1 & HA2 – Quartier de stockage HA	COG_0140 (HA1)		V_0.S
	COG_0200/85 ans (HA2) COG_0200/70 ans (HA2)		
	COG_0800 (HA1)		
	COG_0810A (assimilé COG_0140)		
	COG_0820A (assimilé COG_0140)		
	COG_0830 (assimilé COG_0200/70)		
	COG_0880 (assimilé COG_0140)		
	COG_0890 (assimilé COG_0140)		
	COG_0900 (assimilé COG_0140)		
	COG_0810B (HA1)		Labile
	COG_0820B (HA1)		
	COG_0850 (HA1) (non vitrifiés)		

5.3.3.2 La partie utile de l'alvéole HA

Comme pour la situation de référence du SEN (cf. Chapitre 5.2.3.2 du présent volume), la partie utile de l'alvéole HA (colis de stockage, jeux inter-colis et chemisage) est représenté comme un milieu poreux continu homogène, entièrement saturé dès l'instant initial, et dont les propriétés hydrauliques et de transport sont prises pénalisantes (62). Il n'est pas pris en compte de rétention chimique par sorption ou par précipitation au sein de l'alvéole HA (cf. Chapitre 2 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)).

Cette représentation est maintenue sur toute la durée de l'évaluation (62).

5.3.3.3 Le dispositif de fermeture de l'alvéole HA

Comme pour la situation de référence du SEN, eu égard à l'absence d'exigence de performance hydraulique du matériau mis en place en tête d'alvéole HA, le bouchon de fermeture de la tête d'alvéole HA est représenté de manière pénalisante, c'est-à-dire par un matériau poreux homogène de conductivité hydraulique équivalente à celle d'un sable, des propriétés de transport minimales et aucune propriété de rétention chimique (cf. Chapitre 2 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)).

5.3.3.4 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien au droit de la partie utile de l'alvéole HA

Conformément aux conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), la zone endommagée mécaniquement est représentée selon les modalités exposées au chapitre 5.3.2.2 du présent volume et prend en compte (cf. Figure 5-42) :

- l'endommagement mécanique initial lié au creusement des alvéoles selon la contrainte horizontale majeure représentés en situation enveloppe par une ZFC-0 et une ZFD :
  - ✓ de manière conservative, la perturbation liée à l'infiltration du matériau de remplissage est représentée en situation enveloppe du SEN sur toute l'épaisseur de la ZFC-0. La ZFC-0 est donc représentée avec des propriétés hydrauliques pénalisantes (assimilée à celle d'un sable), des propriétés de transport conservatives (Dp = D_0(HTO)), sans rétention chimique ;
- le sur-endommagement mécanique lié au foisonnement des alvéoles (ZFC-f) dont l'extension est représentée selon une approche pénalisante et avec un taux de vide unique de 12 % pour les alvéoles du quartier pilote HA et de 35 % pour les alvéoles du quartier de stockage HA. Le foisonnement est représenté dès l'instant initial et possède les propriétés hydro-dispersives et de rétention chimique d'une ZFC hors perturbation chimique (cf. Chapitre 5.3.2.2 du présent volume) ;
- le transitoire thermique issu des déchets HA est représenté en situation enveloppe de manière identique et avec les mêmes facteurs correctifs qu'en situation de référence du SEN (cf. Chapitre 5.2.2.3 du présent volume).

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

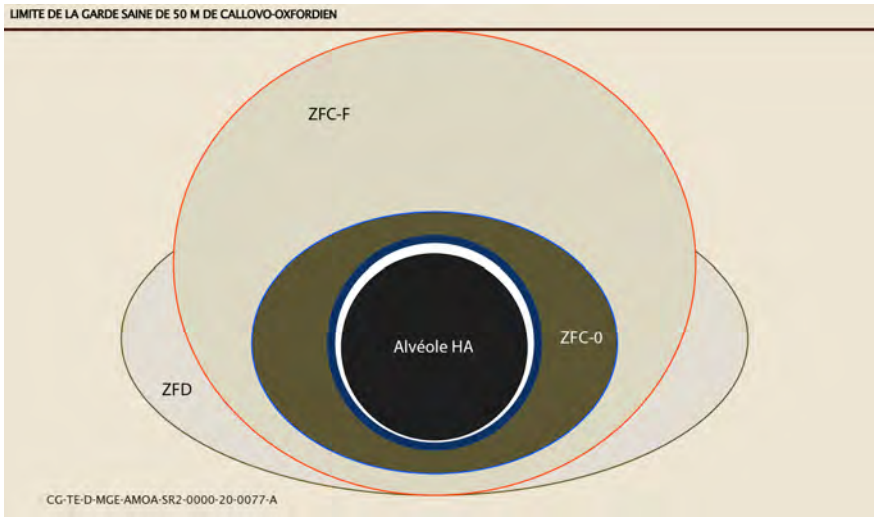


Figure 5-42 *Schéma conceptuel de la zone fracturée connectée au droit de la partie utile d'un alvéole de stockage HA (orienté selon la contrainte principale majeure) en situation enveloppe du SEN (représentation du foisonnement : ZFC-f). Position haute du stockage*

5.3.4 Les alvéoles de stockage MA-VL

Comme indiqué au chapitre 2 du présent volume, à l'exception de la représentation de la ZFD, les composants représentés des alvéoles de stockage MA-VL en situation enveloppe sont les mêmes que ceux représentés en situation de référence du SEN (cf. Chapitre 5.2.4 du présent volume).

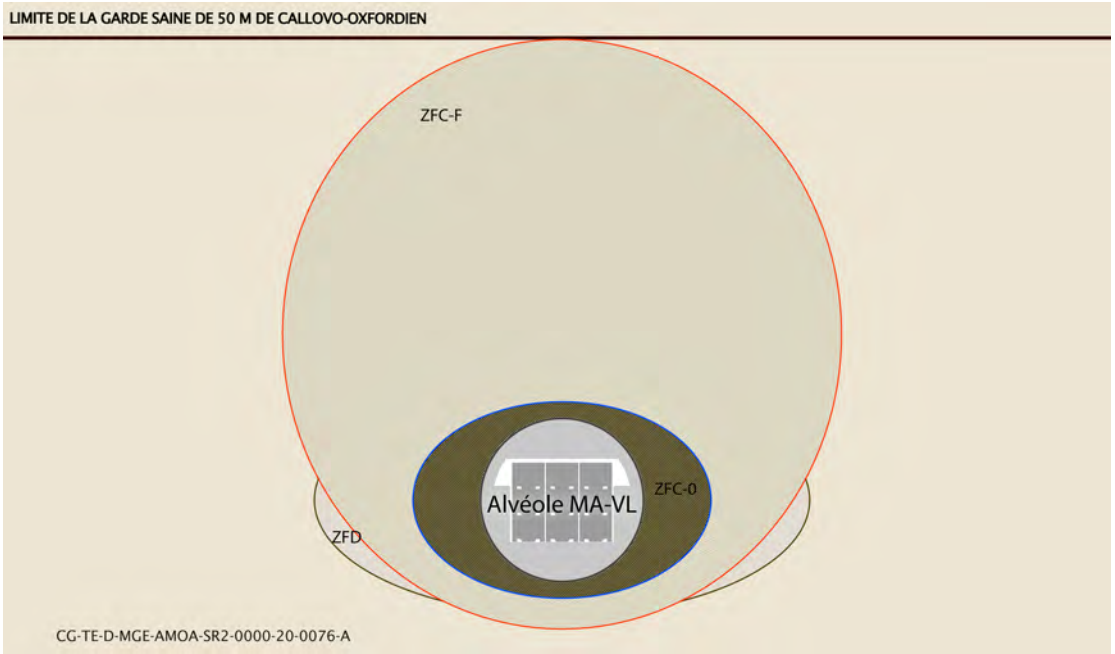


Figure 5-43 *Schéma conceptuel de la zone fracturée connectée au droit de la partie utile d'un alvéole de stockage MA-VL (orienté selon la contrainte principale majeure) et des caractéristiques de transport et de rétention en situation enveloppe du SEN (représentation du foisonnement : ZFC-f). Position haute du stockage*

Conformément aux exigences et aux conclusions du chapitre 2 du présent volume, il est considéré une zone fracturée de sur-endommagement par foisonnement de la roche autour des alvéoles MA-VL en fonction de leur taux de vide. Le taux « maximal » de vide retenu pour l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL est de 25 % en situation enveloppe (cf. Figure 5-44).

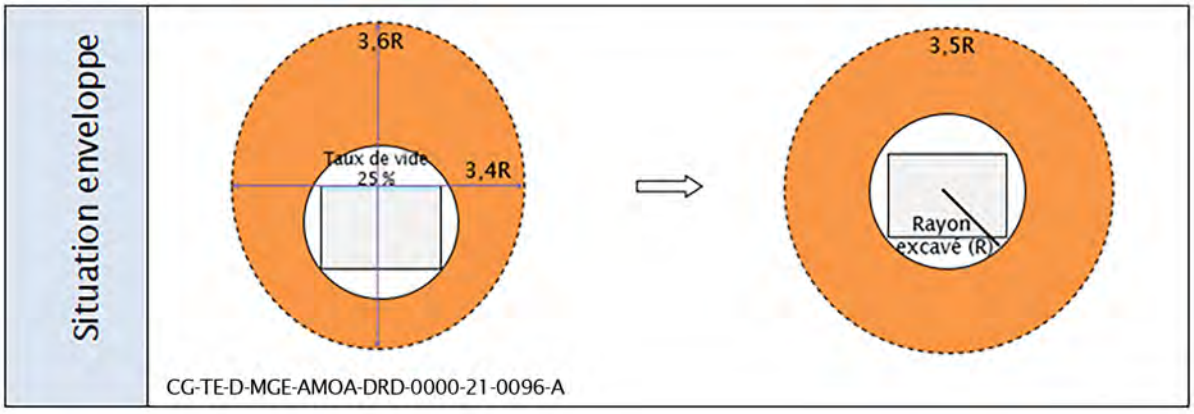


Figure 5-44 *Schéma de conceptualisation de la zone de fracturation connectée surendommagée (zone de foisonnement) au droit de la partie utile des alvéoles MA-VL en situation enveloppe*

Le détail des extensions et des valeurs de paramètres est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.4.1 Les colis MA-VL stockés

5.3.4.1.1 La spéciation du sélénium dans les déchets MA-VL

Comme indiqué au chapitre 2 du présent volume, il est considéré en situation de référence et en situation enveloppe du SEN que 100 % de l'inventaire en sélénium des déchets MA-VL est sous la forme Se(+VI) métastable (62).

5.3.4.1.2 Les modèles de relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques

Selon la nature physico-chimique des familles de déchets et les connaissances acquises (cf. Chapitre 2 du présent volume), la situation enveloppe du SEN retient :

- un modèle fondé sur la solubilité des sels solubles pour certains déchets salins, bitumés ou non ;
- un modèle de corrosion généralisée des éléments métalliques activés pour certains déchets métalliques ;
- un modèle labile pour les familles auxquelles les modèles ci-dessus ne sont pas applicables.

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.4.2 La partie utile de l'alvéole MA-VL

5.3.4.2.1 La partie utile (hors structure en béton)

Comme pour la situation de référence (cf. Chapitre 5.2.4.2 du présent volume), les colis de déchets constituent un terme source global dépendant du choix des modèles de relâchement (cf. Chapitre 2 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)).

En situation enveloppe du SEN, conformément aux conclusions du chapitre 2 du présent volume, la représentation de la partie utile de l'alvéole MA-VL est identique à celle retenue en situation de référence (cf. Chapitre 5.2.4.2 du présent volume), c'est-à-dire comme un milieu poreux continu homogène, entièrement saturé dès l'instant initial, et dont les propriétés hydrauliques et de transport sont prises pénalisantes.

Cette représentation est maintenue sur toute la durée de l'évaluation et le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.4.2.2 Les structures en béton des alvéoles MA-VL

Sur la base des conclusions du chapitre 2 du présent volume, la représentation des structures en béton en situation enveloppe du SEN diffère de la situation de référence (cf. Chapitre 5.2.4.2 du présent volume) à travers la prise en compte de propriétés de rétention chimique conservatives définies sur la base des gammes de valeurs disponibles. Il est considéré de manière conservative, pour l'ensemble des alvéoles MA-VL, les valeurs de rétention chimique représentatives d'un milieu oxydant (62) :

- les coefficients de distribution (Kd) correspondent à la valeur conservative entre les valeurs les plus faibles de la gamme de valeurs disponibles pour les bétons « sains » ou « altérés ». En l'absence de gamme de valeurs pour un élément donné, la valeur retenue correspond à 1 % de la valeur de référence ;
- les limites de solubilité (C_{sat}) correspondent à la valeur conservative entre les valeurs les plus élevées de la gamme de valeurs disponibles pour les bétons « sains » ou « altérés ». En l'absence de gamme de valeurs pour un élément donné, la valeur retenue correspond à 100 fois la valeur de référence ;

- pour les éléments pour lesquels on ne dispose d'aucune mesure, ni d'analogie, on ne retient pas de rétention chimique (Kd = 0, $C_{sat} = \infty$).

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.4.2.3 Les perturbations chimiques issues des déchets MA-VL dans les bétons de structure MA-VL

Sur la base des conclusions du chapitre 2 du présent volume, la représentation des perturbations chimiques issue des déchets MA-VL en situation enveloppe diffère de la situation de référence (cf. Chapitre 5.2.4.2 du présent volume) uniquement vis-à-vis du point suivant (62) :

- la perturbation oxydante liée aux sels est couverte par la prise en compte dans les bétons MA-VL d'un milieu oxydant pour toutes les alvéoles MA-VL.

5.3.4.3 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche de la partie utile de l'alvéole MA-VL

La zone endommagée mécaniquement est représentée selon les modalités exposées au chapitre 5.3.2.2 du présent volume et prend en compte (cf. Chapitre 2 du présent volume) (62) :

- l'endommagement mécanique initial lié au creusement des alvéoles selon la contrainte horizontale majeure représenté en situation enveloppe par une ZFC-0 et une ZFD ;
- le sur-endommagement mécanique lié au foisonnement des alvéoles (ZFC-f), dont l'extension est représentée selon une approche pénalisante et avec un taux de vide unique de 25 %. Le foisonnement est représenté dès l'instant initial et possède les mêmes propriétés hydro-dispersives et de rétention chimique que la ZFC-0 ;
- les perturbations alcaline, organique, saline, et leur éventuel cumul dans les argilites de la couche du Callovo-Oxfordien endommagé ou non (cf. Chapitres 2 et 5.3.2.5 du présent volume) :
  - ✓ de manière pénalisante, et afin de couvrir les incertitudes sur l'influence des perturbations et leurs cumuls dans la ZFC-0 (perturbations chimiques, injection du matériau de bourrage), il est fait le choix pénalisant de représenter la ZFC-0 avec des propriétés hydrauliques équivalentes à celles d'un sable, des propriétés de transport conservatives ($Dp = D_0(HTO)$), et aucune propriété de rétention chimique sur toute son extension.

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.4.4 Le dispositif d'obturation des alvéoles MA-VL

Conformément aux conclusions du chapitre 2 du présent volume, le dispositif d'obturation des alvéoles MA-VL mis en place dans les galeries d'accès sont représentés de manière identique aux ouvrages remblayés des galeries dans l'UA présentés au chapitre 5.3.6 du présent volume.

Les perturbations chimiques sont traitées de la même manière que dans la couche du Callovo-Oxfordien et le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.5 Les scellements des liaisons surface-fond et des galeries

Conformément aux conclusions du chapitre 2 du présent volume, la représentation des scellements en situation enveloppe du SEN diffère de celle de la situation de référence *via* la prise en compte de la ZFD dans l'UA et l'USC/UT, telle que définie au chapitre 5.3.2.2 du présent volume et le choix des paramètres de transfert, conformément à la démarche présentée au chapitre 1 du présent volume.

Au-delà de ces points d'exception, les composants représentés et la position des scellements dans le stockage sont identiques à ceux de la situation de référence du SEN (cf. Chapitre 5.2.5 du présent volume).

5.3.5.1 Les scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT)

La figure 5-45 et la figure 5-46 détaillent la conceptualisation hydraulique des ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond (puits, respectivement descenderies) en situation enveloppe conformément à l'analyse présentée au chapitre 2 du présent volume et à la démarche de choix des valeurs de paramètres présentée au chapitre 1 du présent volume.

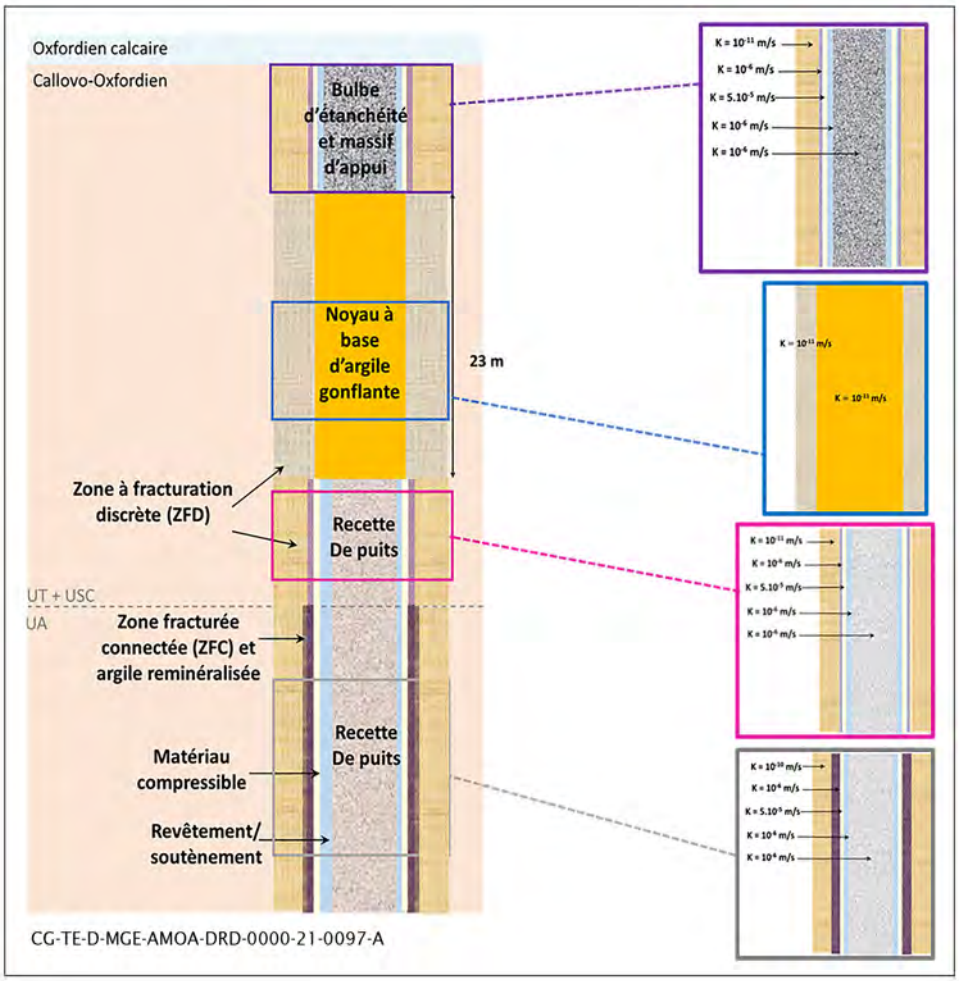


Figure 5-45 Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un ouvrage de fermeture de liaison surface-fond (puits) en situation enveloppe

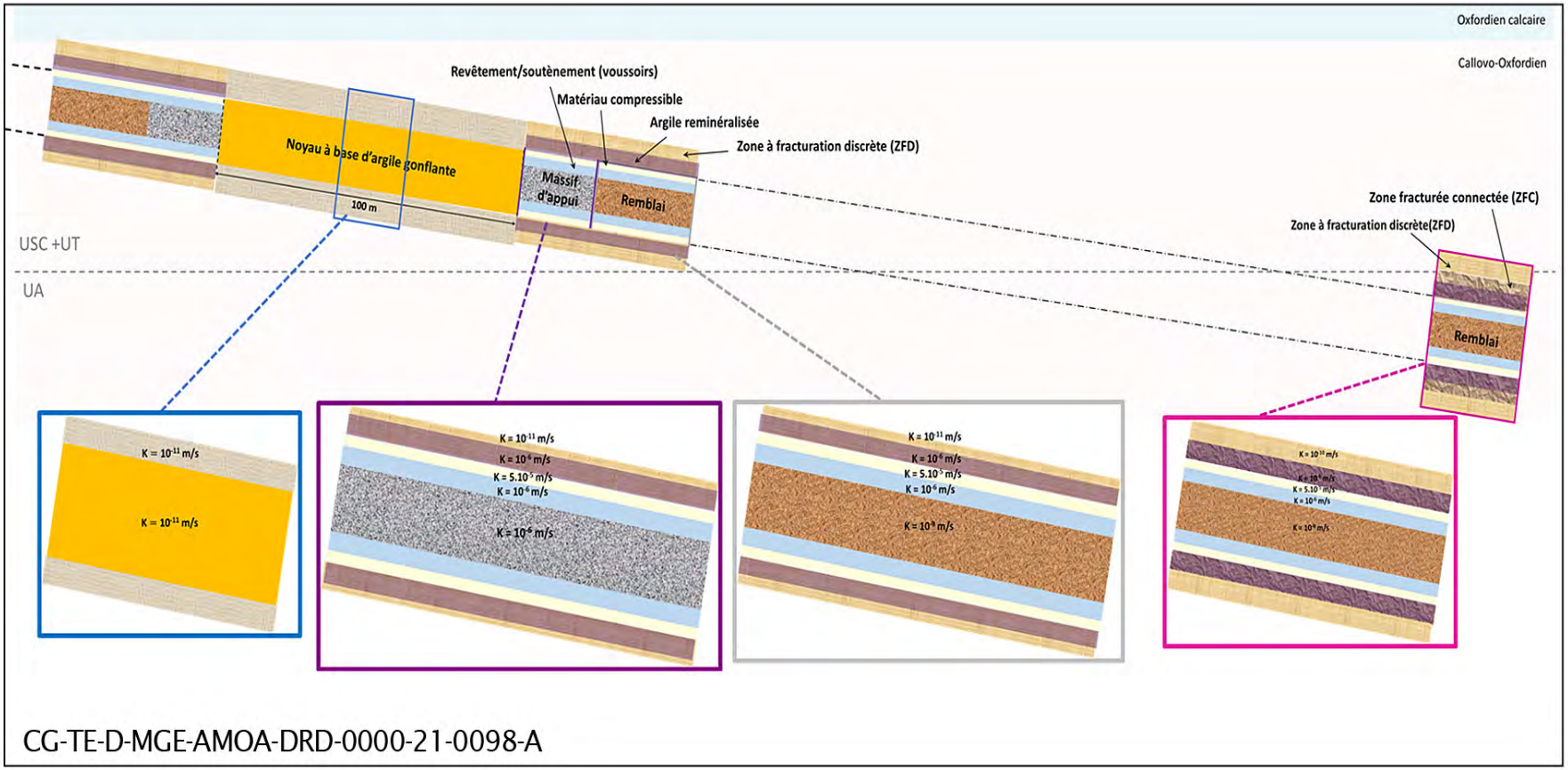


Figure 5-46 *Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un ouvrage de fermeture de liaison surface-fond (descenderie) en situation enveloppe*

5.3.5.1.1 Le noyau argileux

Comme présentée au chapitre 2 du présent volume, la représentation du noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond en situation enveloppe du SEN diffère de celle de la situation de référence (cf. Chapitre 5.2.5.2 du présent volume) à travers la prise en compte de propriétés hydrauliques (K, ω_{cin}), de transport (De, ω_{acc}) et de rétention (Kd, C_{sat}) minimales définies sur la base des fonctions et exigences associées à ce composant, c'est-à-dire (62) :

- une conductivité hydraulique à saturation homogénéisée, prise égale à celle spécifiée dans les exigences (10^{-11} m.s^{-1}) ;
- des propriétés de transport conservatives (Dp = D_0(HTO)) ;
- aucune propriété de rétention chimique par sorption ou par précipitation chimique.

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.5.1.2 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des scellements des liaisons surface-fond

Conformément aux conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 2 du présent volume), une ZFD est représentée au droit des ouvrages réalisés dans l'USC/UT en situation enveloppe du SEN, selon les modalités exposées au chapitre 5.3.2.2 du présent volume. Elle permet de prendre en compte les incertitudes résiduelles sur l'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien dans l'USC/UT.

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.5.1.3 Le dispositif de confinement mécanique

En situation enveloppe du SEN, le dispositif de confinement mécanique des scellements des liaisons surface-fond est représenté de manière identique, et avec les mêmes propriétés hydrauliques et de transport minimales sans rétention chimique, tel que défini en situation de référence du SEN (cf. Chapitres 2 et 5.2.5.2.2 du présent volume).

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.5.2 Les scellements de galeries dans l'unité argileuse (UA)

La figure 5-47 détaille la conceptualisation hydraulique des scellements et remblais de galerie en situation enveloppe conformément à l'analyse présentée au chapitre 2 du présent volume et à la démarche de choix des valeurs de paramètres présentée au chapitre 1 du présent volume.

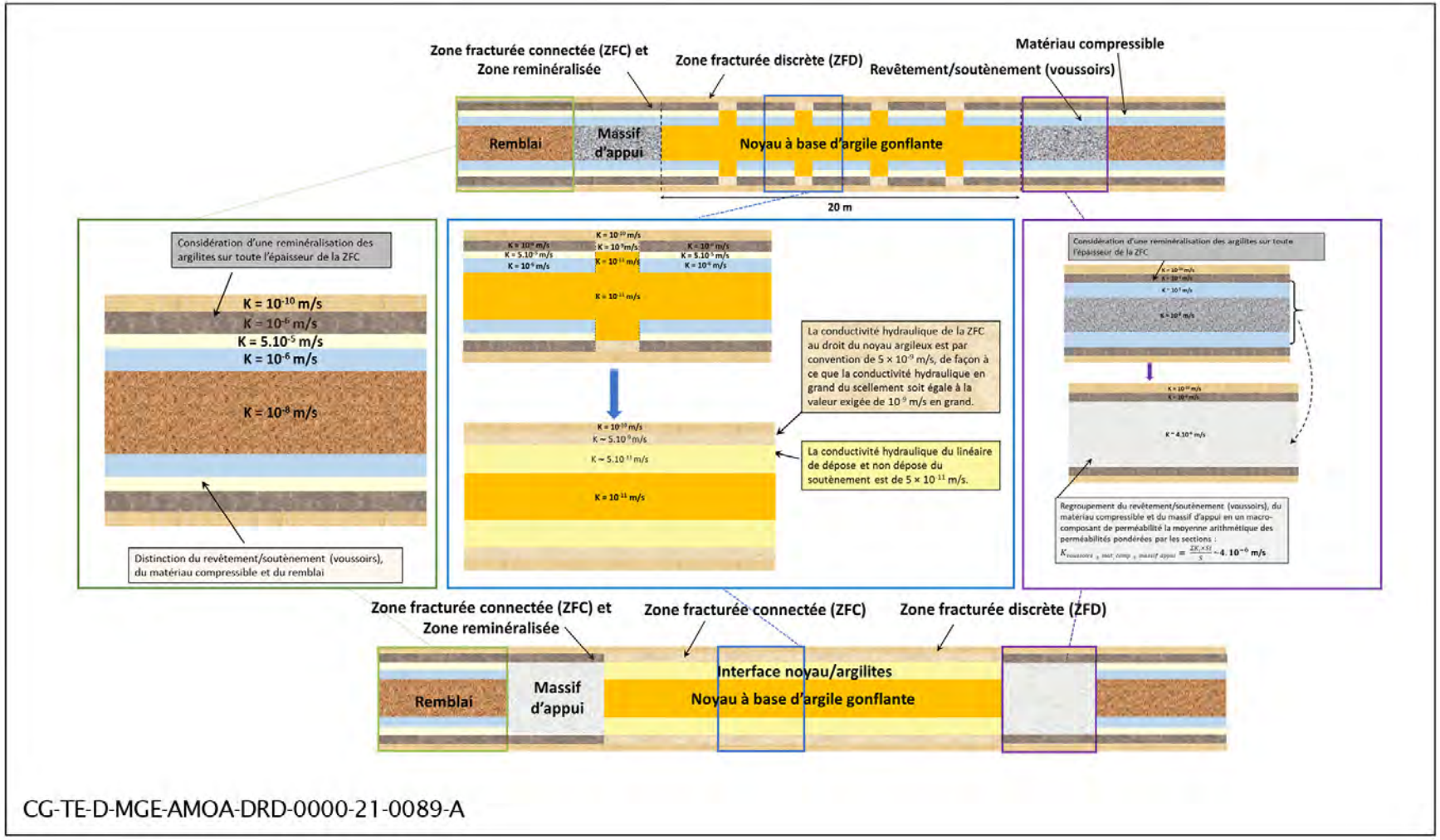


Figure 5-47 Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique des scellements et des remblais de galerie en situation enveloppe

5.3.5.2.1 Le noyau argileux

Comme présenté au chapitre 2 du présent volume, la représentation du noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond en situation enveloppe du SEN diffère de celle de la situation de référence (cf. Chapitre 5.2.5.3 du présent volume) à travers la prise en compte de propriétés hydrauliques (K, ω_{cin}), de transport (De, ω_{acc}) et de rétention (Kd, C_{sat}) minimales, définies sur la base des fonctions et exigences associées à ce composant, en cohérence avec la démarche présentée au chapitre 1 du présent volume, c'est-à-dire :

- une conductivité hydraulique à saturation homogénéisée, prise égale à la valeur minimale spécifiée dans les exigences (10^{-11} m.s^{-1}) ;
- des propriétés de transport conservatives (Dp = D_0(HTO)) ;
- aucune propriété de rétention chimique par sorption ou par précipitation.

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.5.2.2 Le linéaire de dépose du revêtement-soutènement

Le linéaire de dépose est caractérisé par une succession de zones de dépose des voussoirs (revêtement-soutènement), séparées par des zones où les voussoirs sont laissés en place. Ces zones sont remplies par un matériau à base d'argile gonflante identique à celui du noyau argileux, afin d'avoir un bon contact avec la couche du Callovo-Oxfordien. La zone de dépose doit permettre d'obtenir des zones d'interface efficaces hydrauliquement. Comme en situation de référence, l'ensemble de ce linéaire de succession de dépose et non dépose des voussoirs est assimilé à un milieu poreux continu homogène, dont la conductivité hydraulique équivalente correspond à la moyenne harmonique des conductivités hydrauliques des alternances noyau/revêtement (cf. Figure 5-26) estimée en situation enveloppe à 5×10^{-11} m.s^{-1} (cf. Chapitre 2 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)).

Les propriétés de transport sont prises conservatives (Dp = D_0(HTO)) et il n'est pas considéré de rétention chimique dans ce linéaire alliant noyau argileux et revêtement-soutènement laissé en place.

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.5.2.3 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des scellements des galeries

En situation enveloppe du SEN et en cohérence avec les conclusions du chapitre 2 du présent volume, la ZFC au droit du linéaire de dépose est représentée par un milieu poreux continu homogène, dont la conductivité hydraulique est retenue par convention à 5×10^{-9} m.s^{-1}, de façon à ce que la conductivité hydraulique « en grand » du scellement soit égale à la valeur minimale exigée de 10^{-9} m.s^{-1}.

Les propriétés de transport et de rétention chimique de cette zone sont identiques aux propriétés de la ZFC hors perturbation chimique telles que définies au chapitre 5.3.2.2 du présent volume.

La ZFD est représentée selon le modèle conceptuel défini dans l'UA en situation enveloppe du SEN (cf. Chapitre 5.3.2.2 du présent volume).

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.5.2.4 Le dispositif de confinement mécanique

En situation enveloppe du SEN et en cohérence avec les conclusions du chapitre 2 du présent volume, le dispositif de confinement mécanique des scellements de galeries dans l'UA est représenté de manière identique et avec les mêmes propriétés pénalisantes qu'en situation de référence du SEN (cf. Chapitre 5.2.5.3.4 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)).

5.3.6 Les ouvrages remblayés

Comme présenté au chapitre 2 du présent volume, à l'exception de la prise en compte de la ZFD, les composants représentés en situation enveloppe du SEN sont les mêmes que ceux représentés en situation de référence (la représentation conceptuelle des ouvrages remblayés des descenderies dans l'USC/UT et des galeries dans l'UA est présentée sur la figure 5-46 et la figure 5-47).

5.3.6.1 Le remblai

En situation enveloppe du SEN, en cohérence avec les conclusions de l'analyse des risques et incertitudes et la démarche de choix des paramètres (cf. Chapitres 1 et 2 du présent volume), la représentation du remblai diffère de la situation de référence par la prise en compte de propriétés hydrauliques conservatives, c'est-à-dire (62) :

- une conductivité hydraulique conservative définie sur la base des connaissances acquises sur les matériaux à base d'argilites remaniées ;
- des propriétés de transport conservatives (Dp = D_0(HTO)) ;
- aucune propriété de rétention chimique par sorption ou par précipitation.

La zone du remblai reminéralisée par la perturbation alcaline au contact des bétons (radier, voussoirs), dont l'extension est évaluée par simulation (quelques décimètres), est représentée avec les propriétés équivalentes à celles des éléments en béton dont est issue la perturbation.

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.6.2 Le revêtement-soutènement

Comme indiqué au chapitre 2 du présent volume, le revêtement-soutènement est représenté en situation enveloppe du SEN de manière identique à la situation de référence, c'est-à-dire avec (62) :

- des propriétés hydrauliques identiques à celles d'un sable ;
- des propriétés de transport prises de manière conservative (Dp = D_0(HTO)) ;
- aucune propriété de rétention chimique par sorption ou par précipitation.

Le matériau compressible périphérique aux voussoirs est représenté avec des propriétés hydrauliques et de transport pénalisant définies par modélisation de façon à maximiser le flux de solutés par la voie « ouvrage ».

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.6.3 L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages remblayés

Comme présenté au chapitre 2 du présent volume, la zone endommagée mécaniquement au droit des ouvrages remblayés (galeries dans l'UA et liaisons surface-fond dans l'USC/UT) est représentée selon les modalités exposées au chapitre 5.3.2.2 du présent volume.

La perturbation alcaline issue des composants en béton (voussoirs, radier) est prise en compte selon les modalités définies au chapitre 5.3.2.4 du présent volume. Cependant, il est considéré de manière pénalisante en situation enveloppe du SEN, que toute l'épaisseur de la ZFC au droit des galeries remblayées est reminéralisée (propriétés hydrauliques identiques à celles d'un sable, propriétés de transport prises de manière conservative ($Dp = D_0(HTO)$) et aucune rétention chimique).

Comme pour la situation de référence du SEN, la conceptualisation de l'ensemble des galeries considère une zone endommagée dont l'extension correspond à la plus grande surface endommagée (*i.e.* σ_h).

Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.7 Les formations encaissantes

5.3.7.1 La description des formations encaissantes

Comme pour la situation de référence du SEN, les principales unités géologiques de part et d'autre de la couche du Callovo-Oxfordien sont représentées selon leurs caractéristiques géométriques (épaisseur), minéralogiques (niveaux marneux, niveaux calcaires) et hydrauliques (présence d'horizons poreux). Les formations C3a et C3b de l'Argovien supérieur (premier niveau de l'Oxfordien calcaire) ne sont pas représentées (62).

Conformément à la démarche de choix des paramètres et aux conclusions de l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitres 1 et 2 du présent volume), la représentation des formations encaissantes en situation enveloppe du SEN diffère de celle de la situation de référence *via* le choix des valeurs de paramètres hydro-dispersifs et de rétention chimique prises en compte. Les valeurs de paramètres hydro-dispersifs et de rétention chimique sont sélectionnées sur la base des gammes de valeurs disponibles de manière à maximiser les transferts de solutés dans les encaissants vers l'exutoire considéré (cf. « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62) et « Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage » (57)).

Afin de maximiser les transferts des solutés vers les exutoires retenus, il est considéré trois cas d'évaluation (cf. Figure 5-48) :

- pour les formations encaissantes supérieures :
  - ✓ cas 1 : un jeu de paramètres de transport pour maximiser les transferts ascendants verticaux des solutés vers la partie transmissive du Barrois (*i.e.* Vers l'exutoire Barrois) :
    - dans les formations marneuses de l'Oxfordien et du Kimméridgien, des paramètres de diffusion « conservatifs » maximisant les transferts, c'est-à-dire n'ayant pas d'effet d'atténuation de migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques ;
  - ✓ cas 2 : un jeu de paramètres de transport pour maximiser les transferts horizontaux des solutés dans la partie transmissive de l'Oxfordien calcaire, *i.e.* Vers les exutoires de l'Oxfordien calcaire (exutoire artificiel par pompage et exutoire naturel au niveau de la rivière Ornain) :
    - dans les horizons poreux de l'Oxfordien calcaire, une représentation « conservative » maximisant les transferts vers les exutoires ;

- pour les formations encaissantes inférieures :
  - ✓ cas 3 : un jeu de paramètres de transport pour maximiser les transferts horizontaux des solutés dans la partie transmissive du Dogger vers l'exutoire dans la zone de fracturation diffuse :
    - dans l'horizon poreux du Bathonien/Bajocien et de la Dalle nacrée, des paramètres de transfert « conservatifs » maximisant les transferts vers l'exutoire.

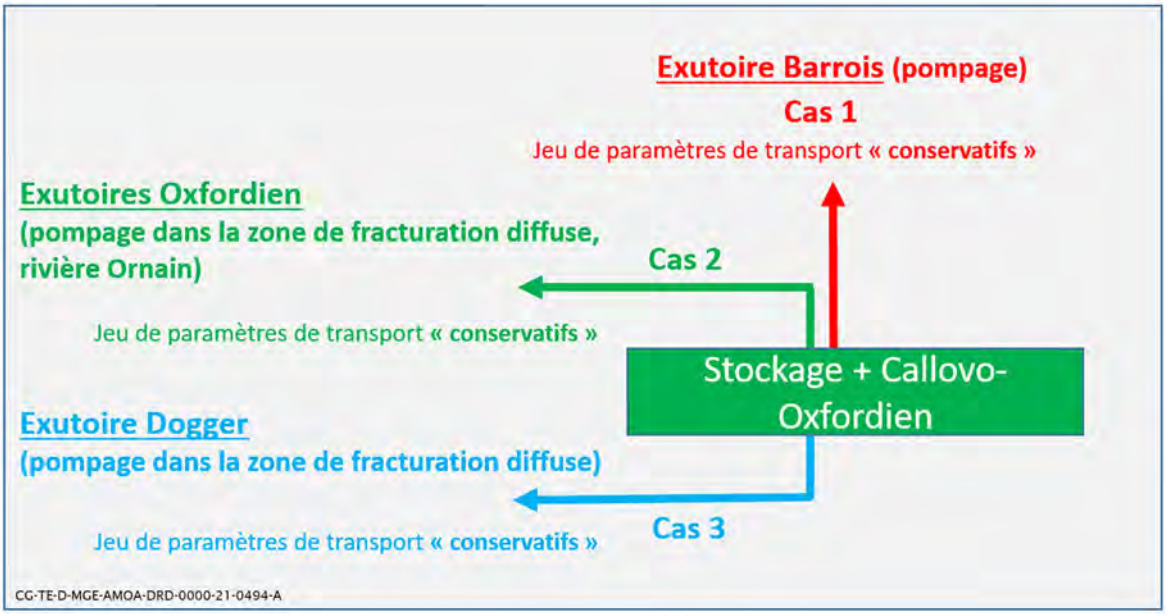


Figure 5-48 *Illustration schématique des cas d'évaluation visant à maximiser les transferts des solutés vers les exutoires retenus dans les formations encaissantes en situation enveloppe du SEN*

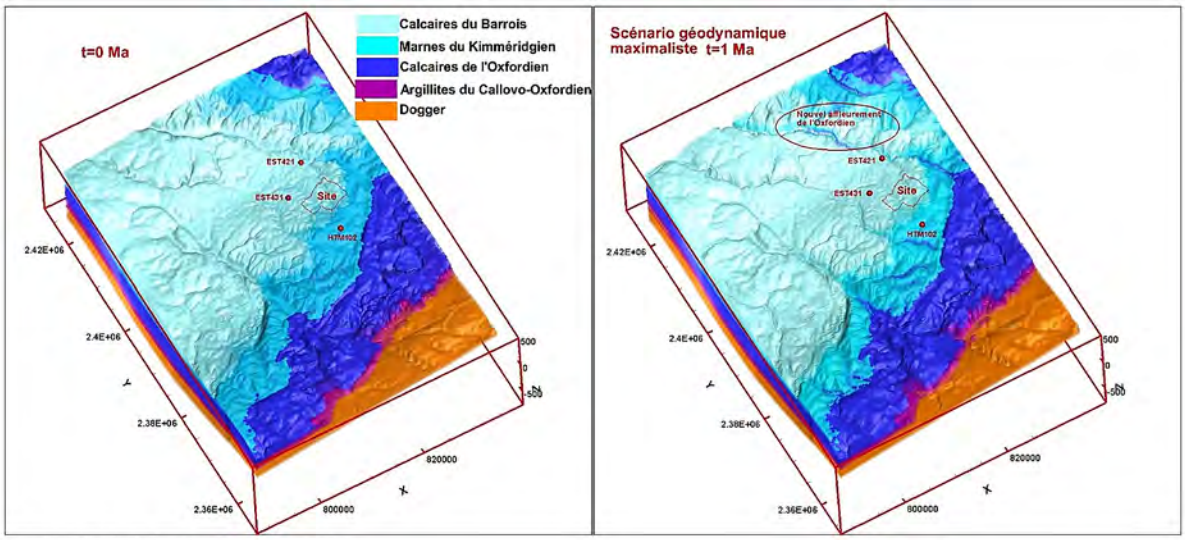
Le détail des valeurs de paramètres prises en compte est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

5.3.7.2 La conceptualisation des formations encaissantes pour l'évaluation de performance et de sûreté

Sur le même principe que pour la situation de référence du SEN (cf. Chapitre 5.2.7.2 du présent volume), la conceptualisation des formations encaissantes repose sur la construction d'un modèle d'écoulement et de transfert dédié, destiné à simuler la migration des solutés depuis les ouvrages souterrains de l'installation souterraine de Cigéo jusqu'aux exutoires potentiels.

Pour la situation enveloppe du SEN, il est considéré un modèle géodynamique conservatif dit « maximaliste » considérant un équilibre entre érosion tectonique et érosion par incision des vallées. Du fait de la rareté des données de mesures des âges des terrasses, il est difficile de discriminer entre l'incision induite par la surrection et celle cumulée causée par l'abaissement du niveau marin moyen. L'aspect conservatif réside dans l'hypothèse que la vitesse de surrection tectonique est égale à celle de l'érosion. Dans ce modèle, la vitesse moyenne de la surrection est de l'ordre de 65 mètres par million d'années sur le secteur de Meuse/Haute-Marne (zone de transposition) et dépasse 180 mètres par million d'années au centre de la zone la plus active, située 90 km au nord-nord-ouest :

- dans le cas d'une évolution géodynamique maximaliste, au nord du secteur, l'érosion le long de la rivière Ornain (un affluent du Bassin de la Seine) est si importante qu'une partie significative de la couche de marnes du Kimméridgien sera érodée après un million d'années. Dans le cas d'une évolution géodynamique maximaliste, la mise à l'affleurement survient à environ 400 000 ans à 500 000 ans (cf. Partie droite de la figure 5-49).



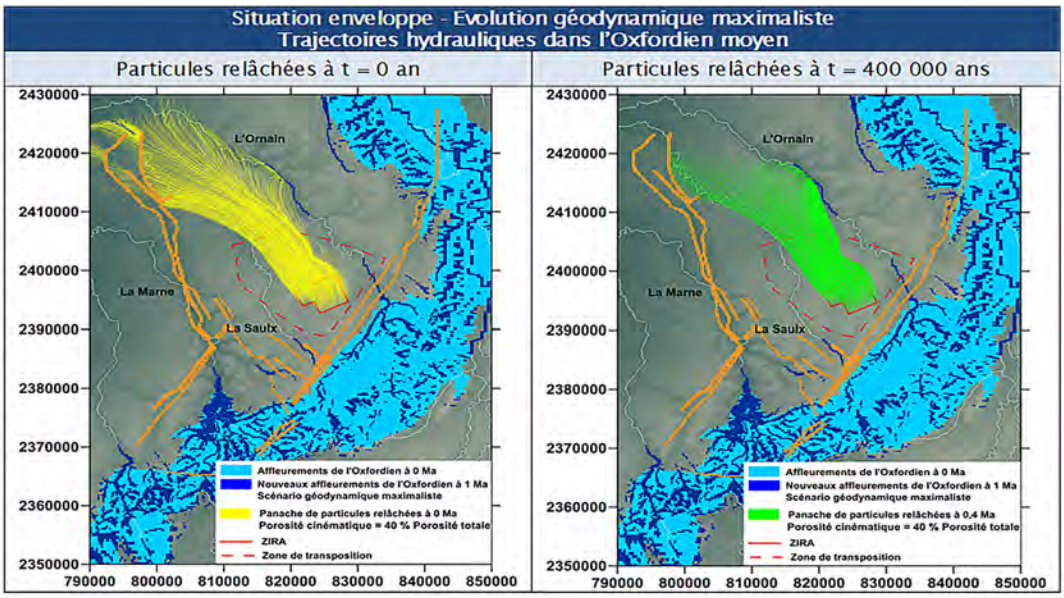
CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-20-5035-A

Figure 5-49 *Évolution géologique et géomorphologique selon un scénario géodynamique maximaliste : bâti géologique 3D à l'actuel (à gauche) et à un million d'années (à droite)*

5.3.7.2.1 Les écoulements dans l'Oxfordien

Comme en situation de référence du SEN, les trajectoires convectives de solutés émis à différents instants dans l'Oxfordien sont dirigées vers le nord-ouest.

Dans le cas du scénario d'évolution géodynamique « maximaliste », la mise à l'affleurement de l'Oxfordien calcaire initialement sous couverture dans la vallée de l'Ornain au nord de la ZIOS vers 400 000 ans à 500 000 ans conduit à augmenter de 20 % les vitesses de pores à proximité de l'affleurement de l'Ornain. Dans ce dernier cas, les temps de premières arrivées des solutés par convection à l'Ornain sont de 500 000 ans à 600 000 ans pour des taux atteignant l'exutoire de 10 % à 50 % selon la date de relâchement des solutés dans l'Oxfordien (cf. Figure 5-50).

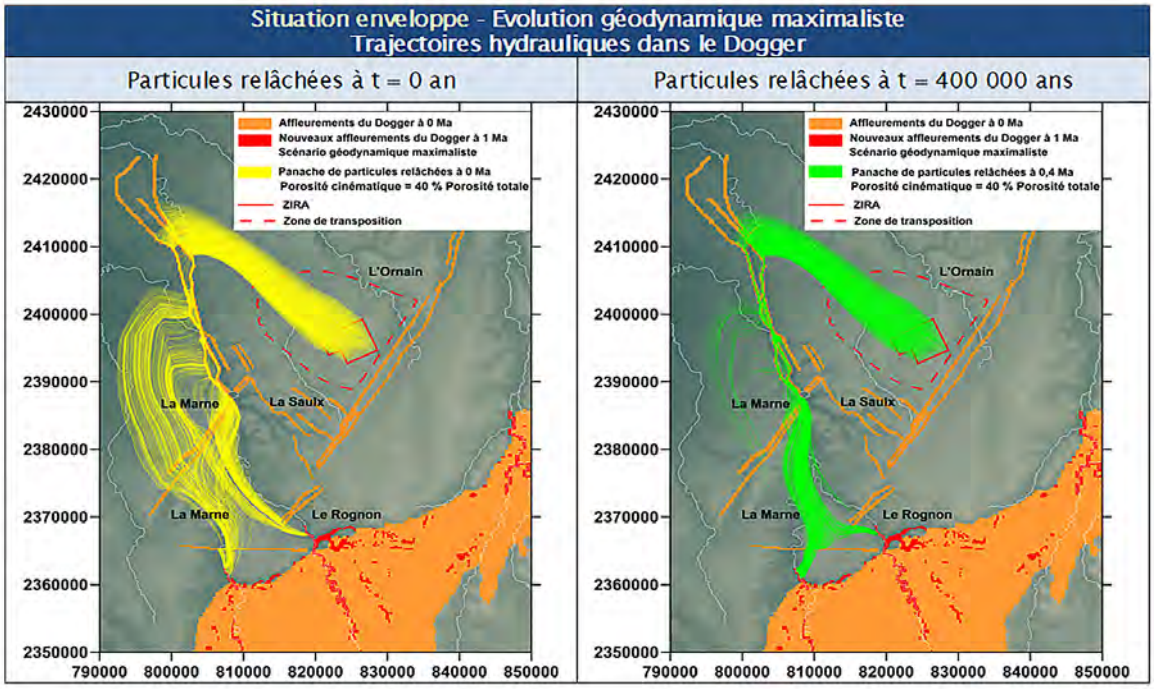


CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0102-A

Figure 5-50 *Trajectoires hydrauliques dans l'Oxfordien moyen selon un scénario d'évolution géodynamique maximaliste en situation enveloppe – particules relâchées à t = 0 (à gauche) et à t = 400 000 ans (à droite)*

5.3.7.2.2 Les écoulements dans le Dogger

Comme en situation de référence du SEN, les trajectoires convectives de solutés émis dans le Dogger sont d'abord dirigées vers le nord-ouest, puis déviées vers le sud lorsqu'elles atteignent la faille de la Marne (cf. Figure 5-51).



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0103-A

Figure 5-51 *Trajectoires hydrauliques dans le Dogger selon un scénario d'évolution géodynamique maximaliste en situation enveloppe – particules relâchées à t = 0 (à gauche) et à t = 400 000 ans (à droite)*

5.3.8 La conceptualisation des exutoires

5.3.8.1 Le rappel des exutoires retenus pour la situation de référence

Pour mémoire, les exutoires retenus en situation enveloppe sont (cf. Chapitre 4 du présent volume et document « Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage » (57)) :

- un exutoire de pompage dans les calcaires du Barrois ;
- un exutoire de pompage dans l'Oxfordien calcaire au niveau de la zone de fracturation diffuse (ZFD) ;
- un exutoire rivière au niveau de l'Ornain ;
- un exutoire de pompage dans le Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse (ZFD).

5.3.8.2 La méthode d'évaluation de la concentration en solutés aux exutoires

5.3.8.2.1 L'exutoire de pompage dans les calcaires du Barrois

La méthode d'évaluation de la concentration en solutés à l'exutoire de pompage dans le Barrois est celle présentée au chapitre 5.2.8.2.2 du présent volume.

5.3.8.2.2 Les exutoires de pompage dans l'Oxfordien calcaire et le Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse

La méthode d'évaluation de la concentration en solutés aux exutoires de pompage dans la zone de fracturation diffuse (Oxfordien calcaire et Dogger) est celle présentée au chapitre 5.2.8.2.2 du présent volume.

5.3.8.2.3 L'exutoire rivière de l'Ornain

La rivière de l'Ornain constitue un exutoire naturel pour les solutés ayant migré dans l'Oxfordien jusqu'à la rivière de l'Ornain, uniquement dans le cas de la situation enveloppe. Compte tenu des incertitudes, on considère que la totalité du panache de solutés atteint la rivière et que la concentration atteignant la rivière correspond au ratio entre le flux total de solutés au niveau de l'Oxfordien (soit à une dizaine de kilomètres au nord-ouest de la ZIOS) et le débit de la rivière, de l'ordre de la centaine de milliers de litres par minutes.

5.3.9 Les valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert des solutés

Les valeurs des paramètres hydraulique et de transfert de solutés, ainsi que les valeurs de rétention chimique par sorption et précipitation, retenues pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79 (principaux radionucléides mobiles), sont indiquées respectivement dans le tableau 5-7 et le tableau 5-8. Concernant les propriétés de rétention du sélénium (en particulier de la précipitation chimique), « Se79 (VI) » désigne le degré d'oxydation le plus élevé (+VI) du sélénium (ne bénéficiant d'aucune limitation par précipitation), et « Se79 (autres) » désigne l'ensemble des autres degrés d'oxydation du sélénium qui peuvent bénéficier de la précipitation, en particulier dans la couche du Callovo-Oxfordien.

Le détail de l'ensemble des valeurs de paramètres prises en compte pour la situation enveloppe est présenté dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

Tableau 5-7 Situation enveloppe - valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert de solutés retenues pour les trois anions mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79)

	Perméabilité K ($m.s^{-1}$)	Coefficient de diffusion effectif De ($m^2.s^{-1}$)			Porosité accessible à la diffusion ω (-)
		^{129}I	^{36}Cl	^{79}Se	
Callovo-Oxfordien sain	Kv = 10^{-13} Kh = 3.10^{-13}	6.10^{-12}	10^{-11}	5.10^{-12}	0,07
Zone à fracturation discrète (ZFD)	UA				
	10^{-10}	6.10^{-12}	10^{-11}	5.10^{-12}	0,07
	USC (+UT)				
	10^{-11}	6.10^{-12}	10^{-11}	5.10^{-12}	0,07
Zone fracturée connectée (ZFC)	Galeries/LSF (UA)/Alvéoles MA-VL				
	10^{-6}	$8,05.10^{-10}$			0,35

	Perméabilité K ($m.s^{-1}$)	Coefficient de diffusion effectif De ($m^2.s^{-1}$)			Porosité accessible à la diffusion ω (-)
		^{129}I	^{36}Cl	^{79}Se	
	Alvéoles HA				
	10^{-6}	$8,05.10^{-10}$			0,35
	Scellements de fond (galeries)				
	5.10^{-9}	$9,2.10^{-10}$			0,4
	Scellements de puits et descenderies (**)				
	-	-	-	-	-
ZFC foisonnée	10^{-8}	$1,2.10^{-11}$	2.10^{-11}	10^{-11}	0,07
Remblai (galeries, desc.)	10^{-8}	$6,9.10^{-10}$			0,3
Béton revêtement/soutènement (voussoirs)/remplissage/massifs d'appui	10^{-6}	$8,05.10^{-10}$			0,35
Interface noyau/argilites au droit des scellements	Scellements de fond (galeries)				
	5.10^{-11}	$8,05.10^{-10}$			0,35
	Scellements de puits et descenderies (**)				
	10^{-11}	$1,15.10^{-10}$			0,35
Noyau de scellement	Scellements de fond (galeries)				
	10^{-11}	$8,05.10^{-10}$			0,35
	Scellements de puits et descenderies (**)				
	10^{-11}	$1,15.10^{-10}$			0,05
Tête d'alvéole HA	10^{-6}	$9,2.10^{-10}$			0,4
Jeux inter-colis/vides apicaux	10^{-4}	$2,3.10^{-9}$			1
Colis de stockage/colis primaire	10^{-6}	$4,6.10^{-10}$			0,2

(*) Aucune zone fracturée connectée n'est retenue dans l'USC (+ UT)

(**) Au droit des ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond (LSF), il est considéré une dépose totale du revêtement-soutènement

Tableau 5-8 *Situation enveloppe - valeurs des paramètres de rétention chimique (sorption, précipitation) retenues pour les trois anions mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79)*

	Coefficient de partage solide/solution Kd ($m^3.kg^{-1}$)				Limite de solubilité Csat ($mol.L^{-1}$)			
	^{129}I	^{36}Cl	^{79}Se (Vl)	^{79}Se (autres)	^{129}I	^{36}Cl	^{79}Se (Vl)	^{79}Se (autres)
Callovo-Oxfordien sain	0				infinie			10^{-6}
Zone à fracturation discrète (ZFD)	0				infinie			10^{-6}
Zone fracturée connectée (ZFC)	0				infinie			10^{-6}
Béton de revêtement/soutènement (voussoirs) des alvéoles MA-VL	0	2.10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	infinie			infinie
Noyau de scellement	0				infinie			infinie

5.4 Les indicateurs retenus pour vérifier la performance des composants et de l'architecture dans son ensemble

Les indicateurs retenus pour vérifier le caractère favorable des performances des composants sont en lien avec des critères d'appréciation de l'atténuation et du retard du transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques, offerts par chaque composant et par l'architecture dans son ensemble.

Afin de quantifier le retard et l'atténuation des flux de solutés par les phénomènes de transfert (diffusion, convection, dispersion) et de rétention (sorption, précipitation), de dilution ainsi que de décroissance radioactive, des indicateurs de performance sont quantifiés dans les différents composants pour les voies de transfert par les ouvrages, par la couche du Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes.

Pour mémoire (cf. Chapitre 1.5 du présent volume), les principaux indicateurs de performance évalués au regard des fonctions de sûreté sont :

- pour la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau », les vitesses d'écoulement de l'eau et les débits d'eau dans les ouvrages remblayés et scellés ;
- pour la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage », le débit molaire (ou massique) instantané, et en particulier sa valeur maximale et la date d'occurrence associée. Les débits molaires ou massiques cumulés, normés par rapport à l'inventaire initial total du soluté concerné (notamment en pourcentage) sont également des indicateurs intermédiaires. Les indicateurs sont évalués :
  - ✓ à différents endroits pour la voie de transfert par les ouvrages (cf. Figure 5-52) : entrant dans les galeries d'accès, entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone centrale comprenant la base des liaisons surface-fond (cf. Définition détaillée dans l'encadré ci-après), et sortant des liaisons surface-fond au toit du Callovo-Oxfordien ;

- ✓ au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, pour la voie de transfert « Callovo-Oxfordien » ;

- pour la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques », la cartographie des concentrations en solution (dans la couche du Callovo-Oxfordien et/ou dans les formations encaissantes) et les débits molaires ou massiques instantanés et cumulés sur un million d'années :
  - ✓ transitant depuis les colis primaires jusqu'aux toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, en distinguant la voie de transfert « Callovo-Oxfordien » et la voie de transfert par les ouvrages ;
  - ✓ transitant dans les formations encaissantes jusqu'aux exutoires du Barrois, de l'Oxfordien, de l'Ornain et du Dogger (cf. Figure 5-53 et figure 5-54).

NOTA : DÉFINITION DE LA ZONE CENTRALE (TERME UTILISÉ POUR LES ÉVALUATIONS)

La **zone centrale** (dénommée **« zone principale »** sur la figure 5-52 ci-dessous) désigne la zone dans laquelle sont positionnées différentes surfaces géométriques où sont évalués les débits de solutés (débits molaires et débits massiques) en sortie des galeries principales, c'est-à-dire à l'entrée de la **zone centrale comprenant la base des liaisons surface-fond**. De façon équivalente, c'est le terme « zone principale » qui est employé dans le cartouche de légende de certains graphes du chapitre 6 du présent volume.

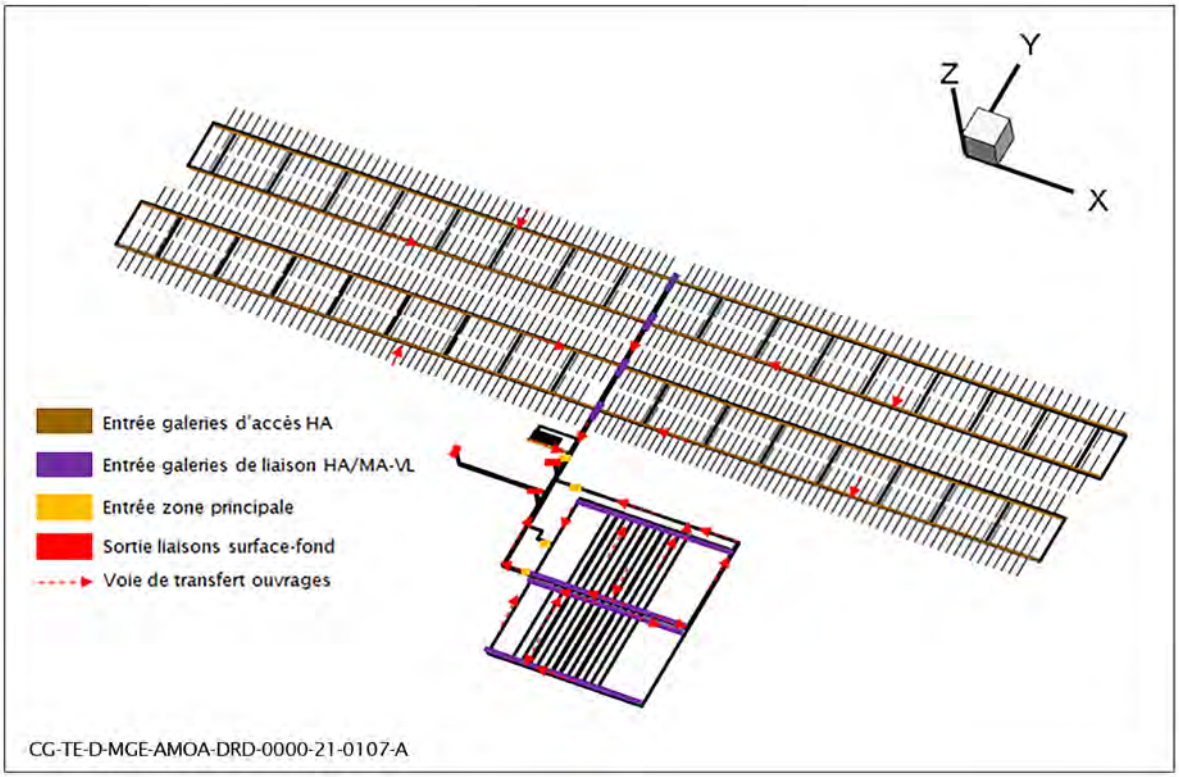


Figure 5-52 Positionnement des indicateurs intermédiaires pour la voie de transfert par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond)

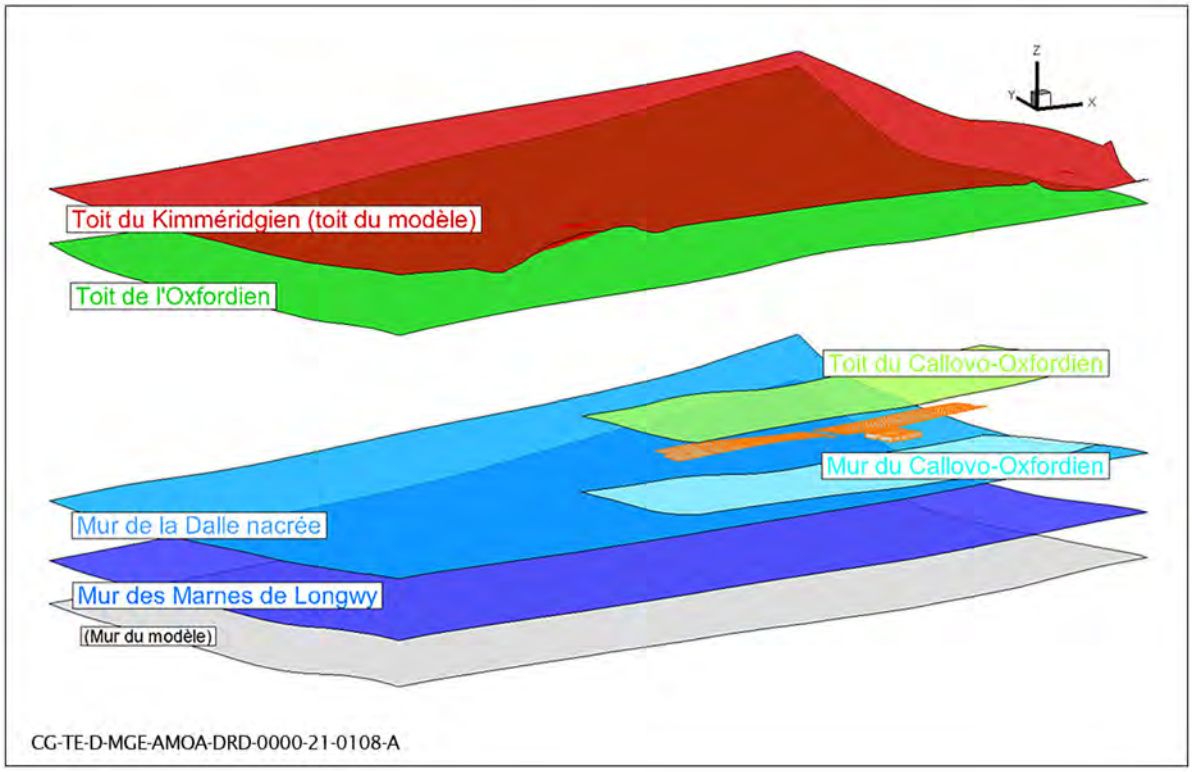
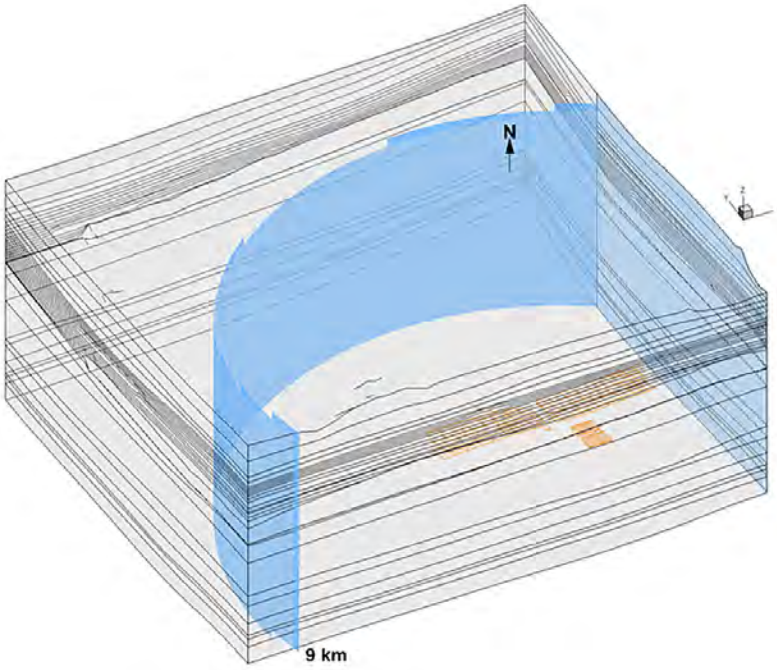


Figure 5-53 *Positionnement des indicateurs intermédiaires horizontaux pour la voie de transfert par le milieu géologique*



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0109-A

Figure 5-54 *Positionnement des indicateurs intermédiaires verticaux pour la voie de transfert par le milieu géologique*

Les résultats sont présentés sous forme de graphes de débits molaires ou de débits massiques, uniquement pour les radionucléides dont le débit molaire, respectivement pour les substances toxiques chimiques dont le débit massique, excède, au cours du million d'années, 1×10^{-10} mol.an^{-1}, respectivement 1×10^{-10} kg.an^{-1}, la contribution aux impacts sanitaires étant négligeable pour les radionucléides et substances toxiques chimiques ayant des débits molaires ou massiques inférieurs à ces valeurs.

6

Les résultats des évaluations pour le scénario d'évolution normale

6.1 Le rappel des objectifs et modalités des évaluations quantitatives du scénario d'évolution normale 310

6.2 Les résultats des évaluations pour la situation de référence 311

6.3 Les résultats des évaluations pour la situation enveloppe 349

6.1 Le rappel des objectifs et modalités des évaluations quantitatives du scénario d'évolution normale

Ce chapitre présente les résultats des évaluations quantitatives des deux situations du scénario d'évolution normale : la situation de référence puis la situation enveloppe.

Pour mémoire (cf. Chapitre 1.3.2 du présent volume), les objectifs des évaluations quantitatives du scénario d'évolution normale sont de vérifier que le système de stockage après sa fermeture :

- fonctionne tel qu'il a été voulu par la conception notamment en vérifiant que les fonctions de sûreté pour l'après fermeture sont réalisées ;
- satisfait aux exigences de sûreté visant à protéger l'homme et l'environnement et respecte ainsi les objectifs de protection.

La déclinaison de l'objectif fondamental de protection de l'homme et de l'environnement en fonctions de sûreté long terme en après fermeture, permet à l'aide d'indicateurs, de s'assurer du caractère favorable des performances des composants du système de stockage participant aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvragés, couche du Callovo-Oxfordien) puis dans leur ensemble.

Tel qu'indiqué au chapitre 1.5 du présent volume, les indicateurs retenus pour vérifier le caractère favorable des composants sont en lien avec des critères d'appréciation de l'atténuation et du retard du transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques offerts par chaque composant puis par le système de stockage dans son ensemble. Ces indicateurs sont rappelés au chapitre 1.5.1 du présent volume.

Ces indicateurs de performance étant évalués au regard des fonctions de sûreté, les résultats sont présentés pour chacune des situations du scénario d'évolution normale vis-à-vis :

- de la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau » ;
- de la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage » ;
- de la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques ».

Concernant l'évaluation des incidences sanitaires résiduelles sur l'homme des radionucléides et des substances toxiques chimique, l'Andra retient pour mémoire (cf. Chapitre 1.4.2 du présent volume) :

- la dose efficace engagée à l'homme pour les différents exutoires et groupes de référence considérés et se réfère aux valeurs qui sont préconisées dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (1). L'Andra retient la valeur de contrainte de dose de 0,25 $mSv.an^{-1}$ pour les expositions associées au scénario d'évolution normale sur les 10 000 premières années suivant la fermeture du stockage. Au-delà de cette période, la valeur de 0,25 $mSv.an^{-1}$ est conservée comme référence ;
- pour l'évaluation du risque potentiel lié aux substances toxiques chimiques accompagnant les déchets, les concentrations en substances toxiques chimiques obtenues aux exutoires sont comparées aux NQE (normes réglementaires de qualité environnementale) en vigueur.

Les résultats des incidences sanitaires aux exutoires définis au chapitre 2.10 du présent volume et rappelés au chapitre 4 du volume 8 sont présentés dans des sections spécifiques pour chacune des situations (référence, enveloppe) du scénario d'évolution normale, la biosphère ne contribuant pas aux fonctions de sûreté.

6.2 Les résultats des évaluations pour la situation de référence

Les résultats présentés dans ce chapitre correspondent aux hypothèses retenues pour la conceptualisation de la situation de référence définie au chapitre 5.2 du présent volume et aux valeurs de paramètres associées détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

6.2.1 Les résultats des évaluations de performance relatives aux radionucléides

La présentation des résultats détaillés relatifs au transfert des radionucléides en situation de référence du scénario d'évolution normale est axée sur les principaux radionucléides mobiles, à savoir les trois principaux anions (iode 129, chlore 36 et sélénium 79). Il s'agit en effet des trois principaux radionucléides présentant un débit molaire en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien (toit ou mur) supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1} (limite inférieure des graphes de débits molaires définie à la fin du chapitre 5.4 du présent volume) sur la période de simulation pour cette situation (cf. Figure 6-7 et figure 6-8 du chapitre 6.2.1.3.1 du présent volume).

6.2.1.1 Les résultats vis-à-vis de la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau »

La figure 6-1 présente le champ de charges hydrauliques dans un plan 2D traversant les ouvrages de stockage.

Le champ de charges hydrauliques dans la couche du Callovo-Oxfordien est peu perturbé par le drain hydraulique que constitue l'installation souterraine. Ceci est notamment dû (i) aux conditions hydrauliques favorables de la roche hôte (faibles perméabilités et gradient de charge) qui limitent les capacités de drainage par le stockage, également (ii) à la performance des ouvrages de fermeture, en particulier des scellements des liaisons surface-fond (notamment l'absence de zone de fracturation) qui « isolent » hydrauliquement le stockage des formations sus-jacentes, et (iii) aux dispositions de conception de l'architecture. Les phénomènes convectifs au sein des ouvrages y sont donc extrêmement limités. Les conditions de transfert dans le stockage restent diffusives.

Les vitesses d'écoulement de l'eau au sein des ouvrages (notamment dans le revêtement-soutènement) sont de l'ordre de 0,3 mm.an^{-1} dans les galeries de liaison des quartiers de stockage HA (orientés selon le gradient de l'Oxfordien, vers le nord, et non vers la zone centrale contenant les liaisons surface-fond), et 0,1 mm.an^{-1} à la sortie du quartier de stockage MA-VL. Les vitesses d'écoulement à la sortie du quartier de stockage MA-VL peuvent atteindre de l'ordre de 3 à 4 mm.an^{-1} dans la zone d'interface considérée plus perméable à l'extrados des voussoirs, mais sont plus faibles de plusieurs ordres de grandeur dans le remblai des galeries considéré moins perméable.

Du fait d'une position « amont hydraulique » du quartier de stockage MA-VL par rapport aux liaisons surface-fond, vis-à-vis des écoulements horizontaux dans l'Oxfordien, l'essentiel de l'eau drainée par les liaisons surface-fond provient du quartier de stockage MA-VL.

Le débit d'eau sortant de l'ensemble des liaisons surface-fond est de l'ordre du litre par an.

L'ensemble de ces résultats illustre que la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau » est globalement satisfaite en situation de référence du SEN.

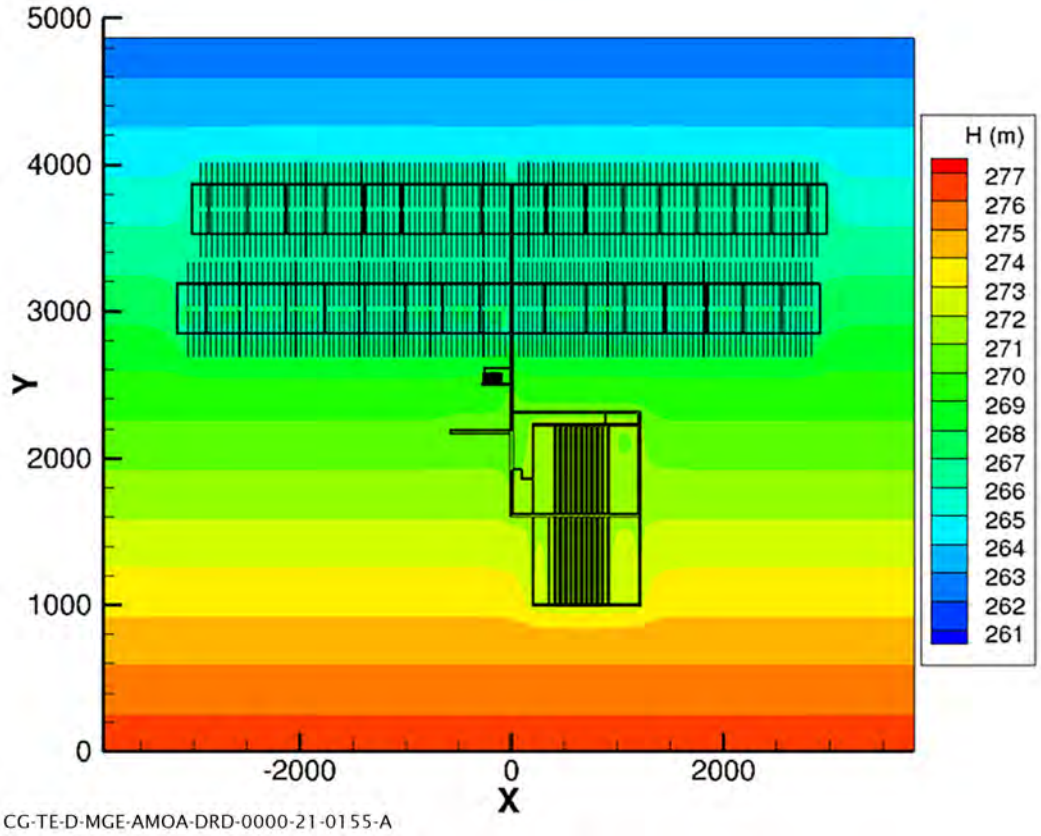


Figure 6-1 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage (quartiers pilote HA et de stockage HA (en haut) et quartier de stockage MA-VL (en bas))*

6.2.1.2 Les résultats vis-à-vis de la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »

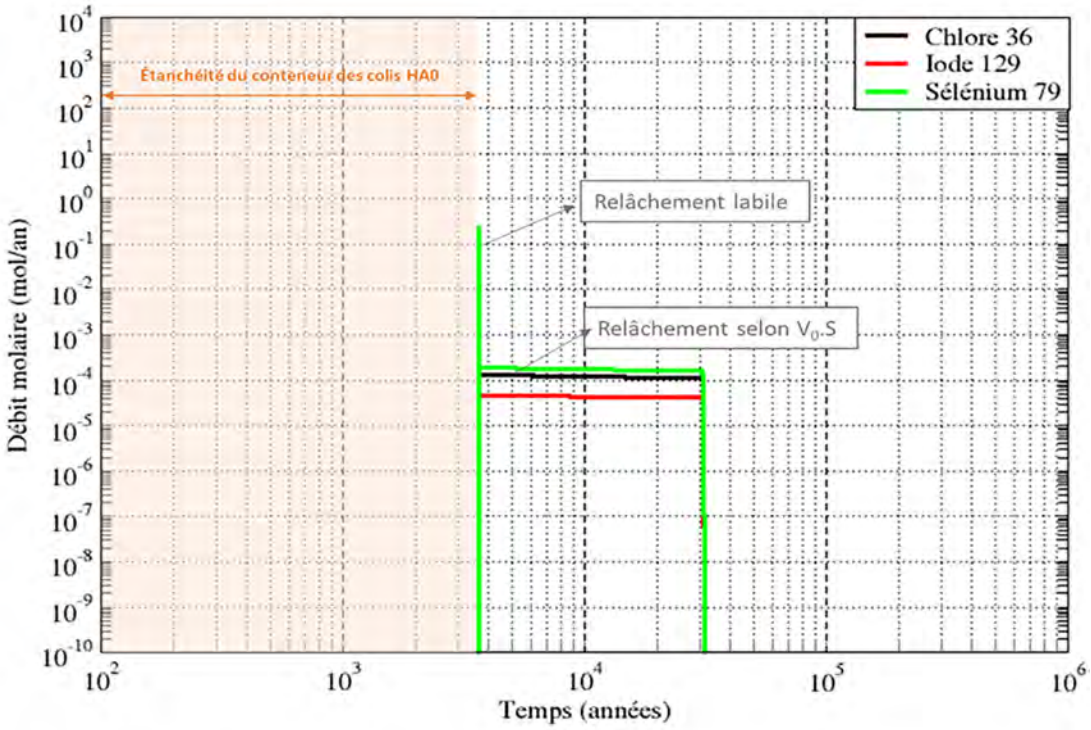
Pour mémoire, l'étude du relâchement des radionucléides considère en données d'entrée l'inventaire de référence présenté au volume 3 du présent rapport ainsi que les modèles de relâchement présentés au chapitre 5.2.3.1.3 du présent volume et au chapitre 5.2.4.1.2 du présent volume, respectivement pour les déchets HA et les déchets MA-VL. Les valeurs de paramètres retenues sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

6.2.1.2.1 Le relâchement des radionucléides dans les alvéoles de stockage HA

Les termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans les alvéoles de stockage HA en situation de référence, représentés sous forme de débits molaires en fonction du temps, sont présentés en figure 6-2 pour le quartier pilote HA, respectivement en figure 6-3 et figure 6-4 pour le quartier de stockage HA (cas sans auto-irradiation du verre, puis cas avec auto-irradiation du verre).

Après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage HA[55], l'application des modèles de relâchement associés aux différentes familles de colis de déchets (cf. Chapitre 5.2.3.1.3 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62) pour les valeurs de paramètres associées) conduit aux durées globales de relâchement suivantes :

- pour le quartier pilote HA, la durée globale de relâchement reposant sur le modèle « V_0.S » est d'environ 25 000 ans (cf. Figure 6-2) ;
- pour le quartier de stockage HA, la durée globale de relâchement en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 (radionucléides mobiles à vie longue) est d'environ 230 000 ans lorsque le modèle « V_0-V_r » sans auto-irradiation du verre est appliqué (cf. Figure 6-3). Cette durée est réduite à environ 500 ans pour les quelques familles de déchets « AVM » avec conteneur aminci et disposées en intercalaires ; les modèles de relâchement des familles de colis en intercalaires, non précisés sur les figure 6-3 et figure 6-4, sont de trois types selon les familles (labile, modèle « V_0.S », modèle « V_0-V_R ») comme indiqué dans le tableau 5-2 du chapitre 5.2.3.1.3 du présent volume ;
- l'application d'un modèle avec auto-irradiation du verre pour les mêmes familles du quartier de stockage HA, induit une durée globale de relâchement d'environ 20 000 ans (cf. Figure 6-4).



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0157-A

Figure 6-2 Scénario d'évolution normale – situation de référence : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier pilote HA

[55] Évaluée à 3 800 ans après mise en stockage pour les colis HA0 stockés dans le quartier pilote HA et les colis HA1/HA2 stockés dans le quartier de stockage HA, et à 550 ans après mise en stockage pour certains colis intercalaires HA0 et MA-VL stockés dans le quartier de stockage HA (cf. Figure 5-41 du chapitre 5.2.3.1.2 du présent volume).

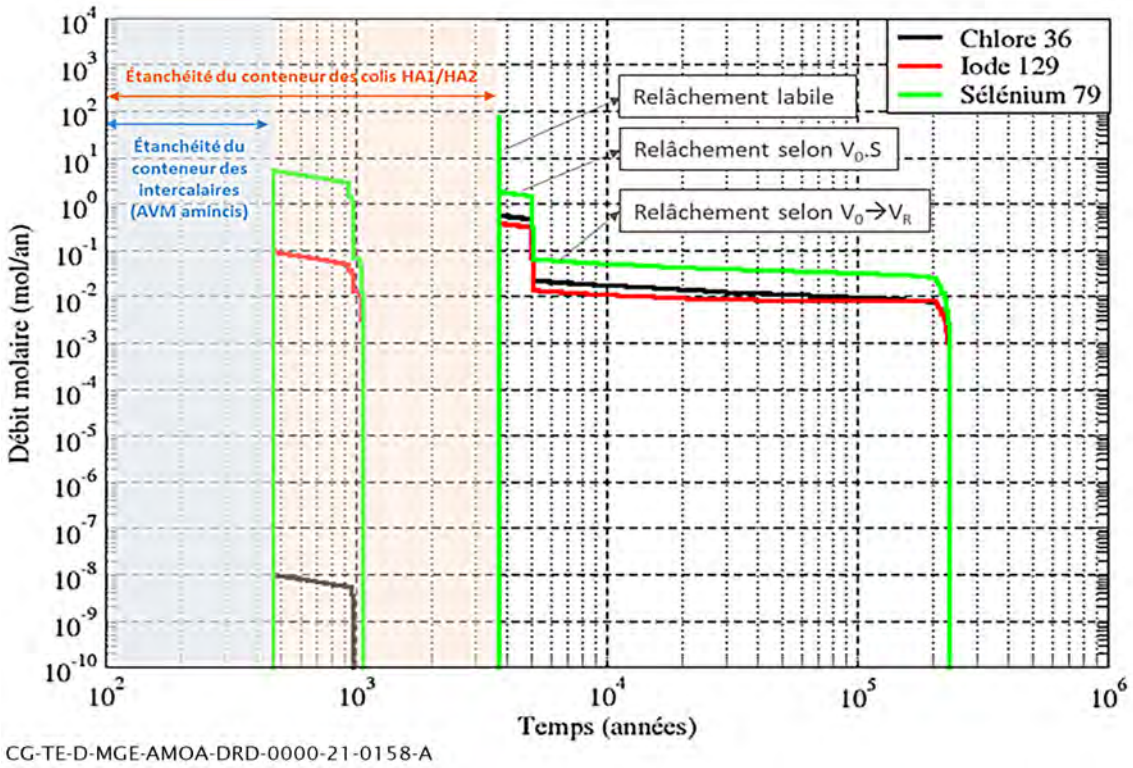


Figure 6-3 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier de stockage HA (cas sans auto-irradiation du verre)*

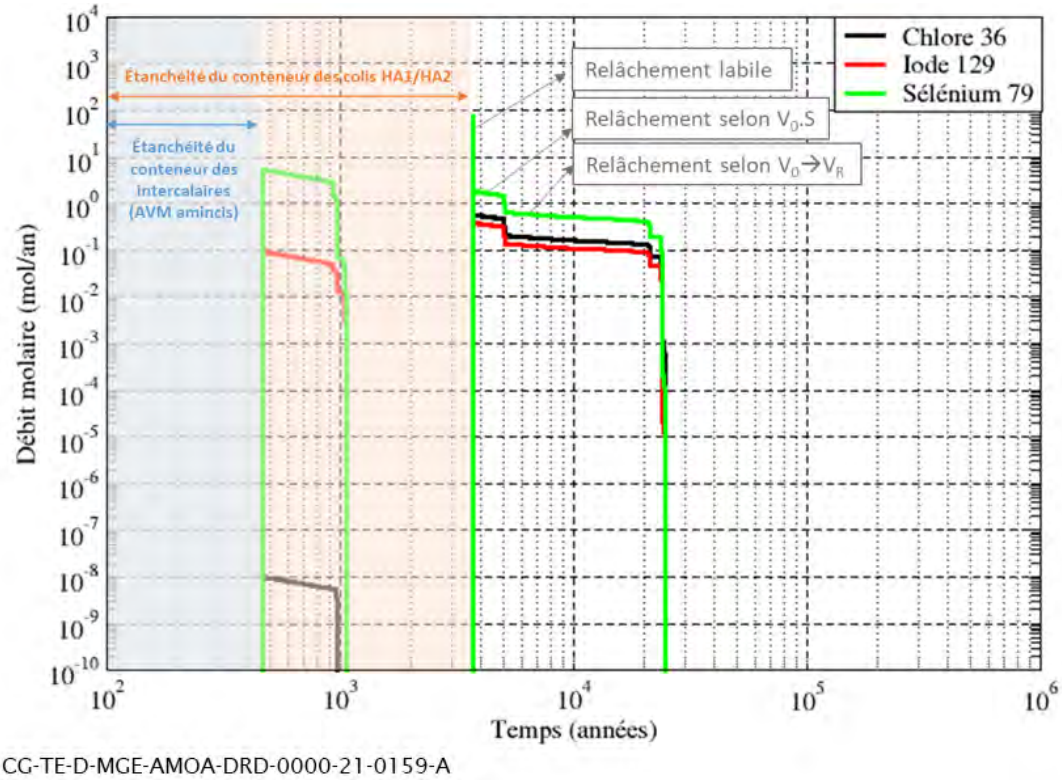


Figure 6-4 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier de stockage HA (cas avec auto-irradiation du verre)*

6.2.1.2.2 Le relâchement des radionucléides dans les alvéoles de stockage MA-VL

La figure 6-5 présente les termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL en situation de référence.

Les résultats présentés indiquent que la majeure partie de l'inventaire en principaux radionucléides mobiles (95 % de la quantité totale d'iode 129, 91 % de celle en chlore 36 et 98,4 % de celle en sélénium 79), est relâchée sur une durée d'un an du fait de l'application d'un modèle de relâchement des solutés sous forme labile (relâchement instantané en présence d'eau).

Le reste de l'inventaire est relâché progressivement, jusqu'à 1 000 ans pour les déchets bitumés (en lien avec le modèle de relâchement associé) et jusqu'à environ 75 000 ans par paliers successifs pour les déchets métalliques (en lien avec les différents modèles de relâchement associés) :

- relâchement graduel et limité jusqu'à 1 000 ans pour les déchets bitumés (durée d'intégrité des conteneurs de stockage), en lien avec l'application du modèle COLONBO ;
- relâchement par paliers successifs jusqu'à environ 15 000 ans pour les coques et éclats en zirconium, les alliages de zirconium-niobium et les alliages de nickel ;
- relâchement final jusqu'à 75 000 ans pour les aciers inoxydables.

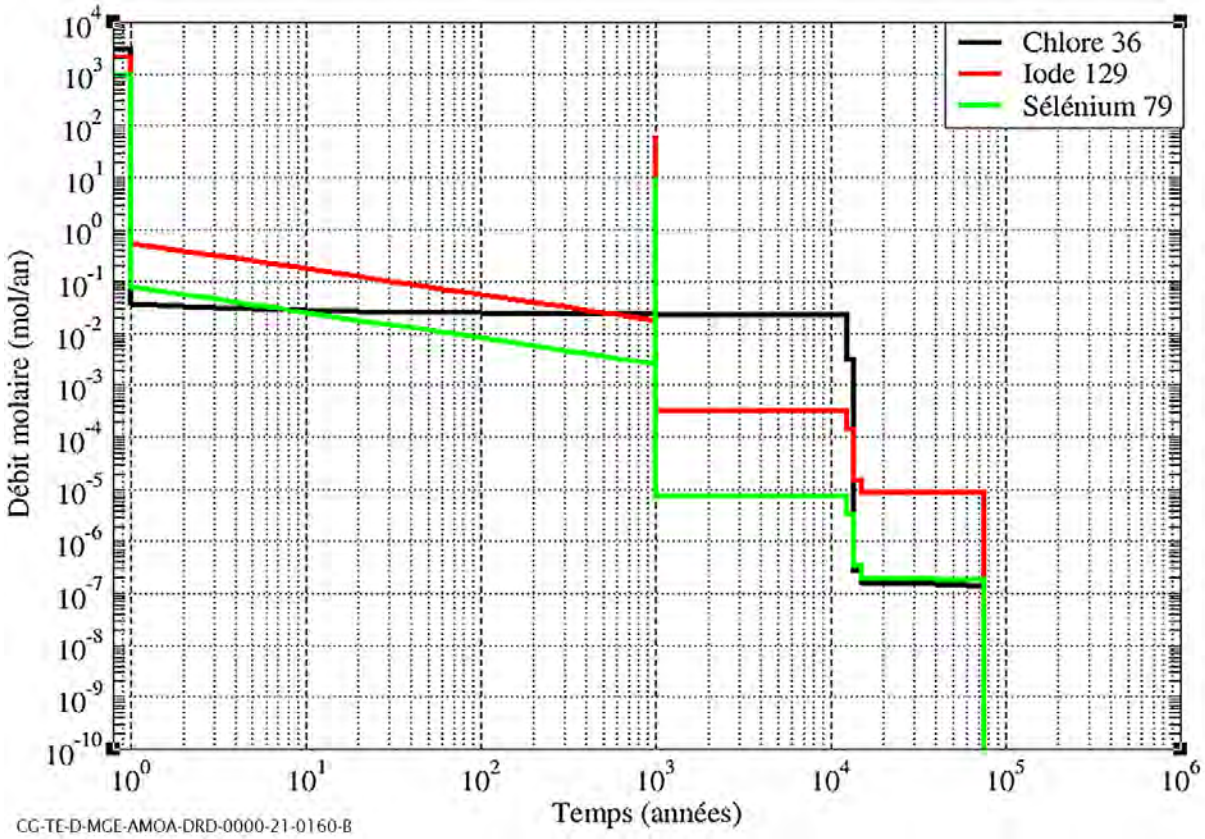


Figure 6-5 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL*

6.2.1.3 Les résultats vis-à-vis de la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques »

6.2.1.3.1 Le transfert des radionucléides dans les composants ouvragés et naturels du système de stockage (des colis au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien)

a) L'analyse des débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79[56]

La figure 6-6 présente l'évolution des débits molaires[57] en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79 au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Le tableau 6-1 présente les bilans des débits molaires cumulés sur un million d'années et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages ». Il en ressort les observations suivantes :

- les transferts sont à diffusion dominante. À l'échelle des quartiers de stockage HA et MA-VL et sur une période d'un million d'années, les transferts par convection sont d'environ un à deux ordres de grandeur inférieurs aux transferts par diffusion ;
- les débits molaires au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien sont similaires car les ouvrages souterrains sont situés à une profondeur d'implantation « réaliste » relativement proche en moyenne du milieu de la couche du Callovo-Oxfordien et la diffusion est le mode de transfert dominant ;
- les débits molaires maximaux d'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79, sommés au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, sont respectivement de l'ordre de $1{,}7 \times 10^{-3}$ mole par an après 800 000 ans, $1{,}6 \times 10^{-3}$ mole par an après 350 000 ans et 9×10^{-5} mole par an après 600 000 ans ;
- en sortie des liaisons surface-fond (au niveau du toit du Callovo-Oxfordien), les débits molaires maximaux en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79 sont très inférieurs aux débits molaires en sortie de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, et ce d'un facteur d'environ respectivement 5 000 000 pour l'iode, 10 000 000 pour le chlore et 50 000 000 pour le sélénium ;
- en un million d'années, environ 23 % de l'inventaire total initial[58] en iode 129, 13 % de celui en chlore 36 et 0,4 % de celui en sélénium 79 ont atteint les limites (toit + mur) de la couche du Callovo-Oxfordien[59]. Le reste de l'inventaire en ces trois radionucléides est encore présent dans la couche du Callovo-Oxfordien, du fait de ses caractéristiques favorables de retard et d'atténuation du transfert, ou bien a disparu par décroissance radioactive ;
- l'occurrence du débit molaire maximum au droit du quartier de stockage MA-VL précède celle des quartiers HA. Deux paramètres y contribuent : la durée du relâchement, plus longue pour les colis de déchets du quartier de stockage HA (en particulier pour le cas sans auto-irradiation du verre) que pour les colis de déchets MA-VL, et les temps de transfert par la couche de Callovo-Oxfordien qui dépendent de son épaisseur, plus importante au droit des quartiers HA.

---

[56] Compte tenu de leur prépondérance par rapport aux autres radionucléides (constat alimenté notamment par tous les dossiers/évaluations antérieurs), la présentation détaillée des résultats se focalise sur les trois principaux anions mobiles que sont l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79. Il en est de même pour la situation enveloppe.

[57] De façon particulière et pour la situation de référence uniquement, quelques graphes de débits molaires sont présentés avec une limite inférieure fixée à 1×10^{-12} mol.an^{-1}, afin de faire apparaître sur les graphes la courbe de débit molaire en sortie des liaisons surface-fond, généralement en-deçà de la limite inférieure initialement retenue (1×10^{-10} mol.an^{-1}).

[58] Dans la suite du présent volume, le terme « inventaire total initial » ou « inventaire initial » d'un radionucléide donné signifie l'inventaire stocké à la fermeture définitive du stockage correspondant au début de la simulation.

[59] Les différences de comportement entre l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79 sont imputables à la différence de mobilité de ces trois radionucléides dans la couche du Callovo Oxfordien, notamment à la sorption un peu plus élevée du sélénium dans le béton de revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL, à la faible limite de solubilité dans la couche du Callovo-Oxfordien pour 97 % de l'inventaire HA en sélénium en situation de référence (forme Se(-II/0) peu soluble), et aux périodes radioactives du chlore 36 et du sélénium 79 qui permettent de bénéficier d'une décroissance radioactive supérieure à celle de l'iode 129.

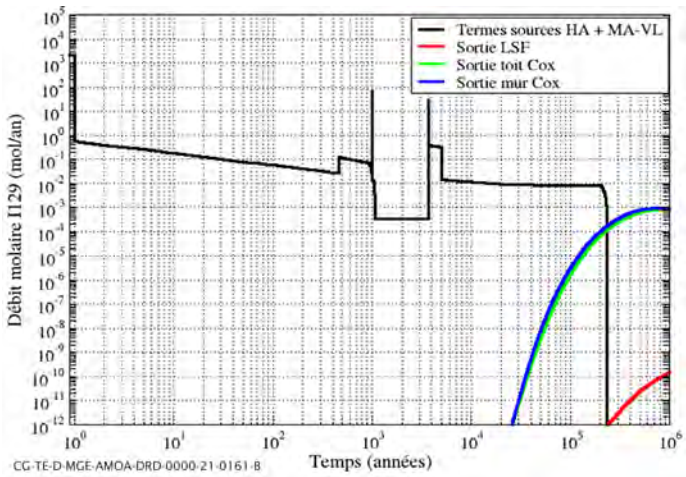
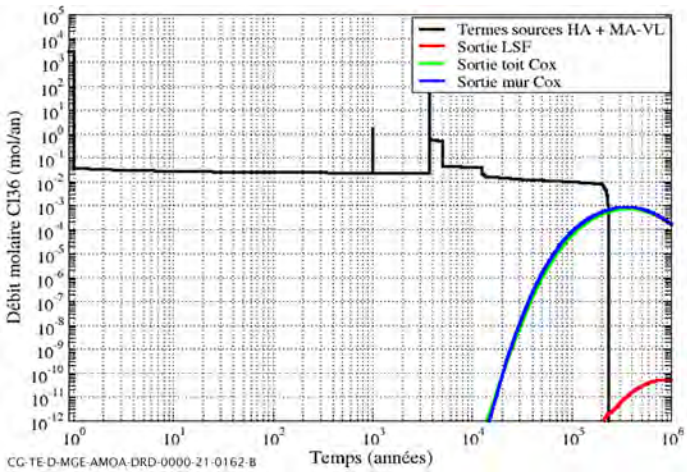
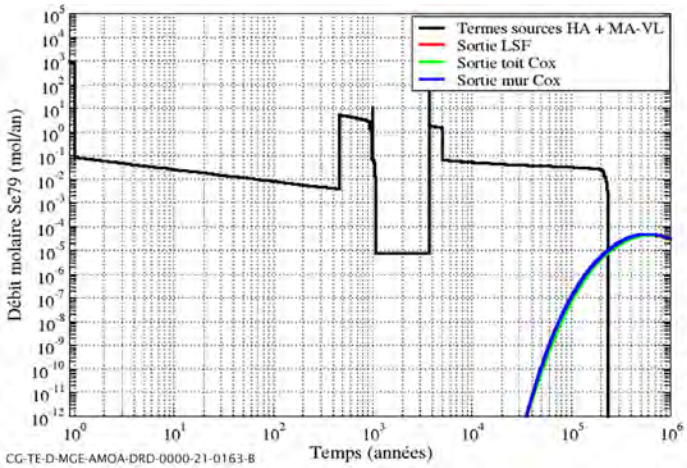
	Situation de référence : Stockage implanté à une profondeur « réaliste » dans le Callovo-Oxfordien
Iode 129	
Chlore 36	
Sélénium 79	

Figure 6-6 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)*

Tableau 6-1 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages »*

	Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
	% quantité initiale	Débit molaire maximum ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du maximum (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire maximum ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du maximum (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire maximum ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du maximum (milliers d'années)
Inventaire initial total en moles HA(*)/ MA-VL	4 600 moles			6 800 moles			13 900 moles		
Dont HA	52 %			53 %			93 %		
Dont MA-VL	48 %			47 %			7 %		
Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	10,5 %	800	850	5,9 %	740	370	0,2 %	42	610
Dont HA	5,2 %	420	875	2,9 %	370	410	0,07 %	16	625
Dont MA-VL	5,3 %	380	815	3,0 %	380	320	0,1 %	26	600
Par la voie « ouvrages »	$<10^{-6}$ %	2×10^{-4}	>1 000	$<10^{-6}$ %	5×10^{-5}	860	$<10^{-8}$ %	8×10^{-7}	>1 000
Dont HA	$<10^{-6}$ %	2×10^{-4}	>1 000	$<10^{-6}$ %	5×10^{-5}	860	$<10^{-8}$ %	8×10^{-7}	>1 000
Dont MA-VL	$<10^{-7}$ %	7×10^{-6}	>1 000	$<10^{-9}$ %	1×10^{-7}	>1 000	$<10^{-12}$ %	8×10^{-10}	>1 000
Au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	12,5 %	905	750	6,8 %	890	350	0,2 %	48	580
Dont HA	7,5 %	545	700	4,0 %	530	370	0,1 %	24	550
Dont MA-VL	5,0 %	360	840	2,8 %	360	330	0,1 %	24	610

(*) le terme « HA » désigne l'ensemble de la zone HA comprenant le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA.

b) L'analyse des débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien pour les radionucléides présentant un débit molaire supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1} au toit ou au mur de la couche du Callovo-Oxfordien

La figure 6-7 et la figure 6-8 présentent respectivement l'évolution des débits molaires des principaux radionucléides pour lesquels celui-ci est supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1} au toit ou au mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Outre les trois radionucléides mobiles analysés ci-avant (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), le potassium 40, le rubidium 87 et le calcium 41, radionucléides considérés faiblement sorbés dans les ouvrages cimentaires et la couche du Callovo-Oxfordien, présentent un débit molaire supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1}.

Tous les autres radionucléides sont totalement atténués par leur transfert dans les ouvrages, soit du fait de leur période, très inférieure au temps de transfert, soit du fait de la sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien : c'est notamment le cas du césium 135 significativement sorbé dans la couche du Callovo-Oxfordien et dont le débit molaire au mur de la couche du Callovo-Oxfordien ne dépasse 10^{-10} mol.an^{-1} qu'en toute fin de simulation (maximum « théorique » de débit non atteint à 10^{6} ans), et du carbone 14 mobile (organique) dont le débit molaire maximum au toit de la couche du Callovo-Oxfordien est d'environ 10^{-10} mol.an^{-1} à environ 80 000 ans.

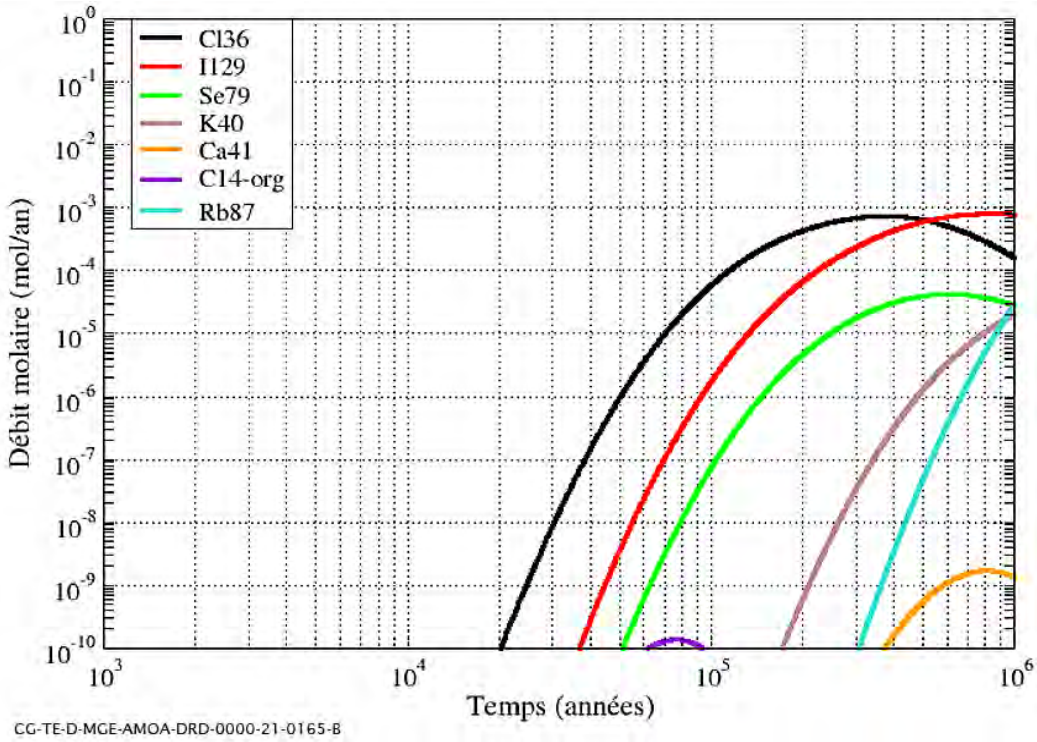


Figure 6-7 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits molaires des principaux radionucléides au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

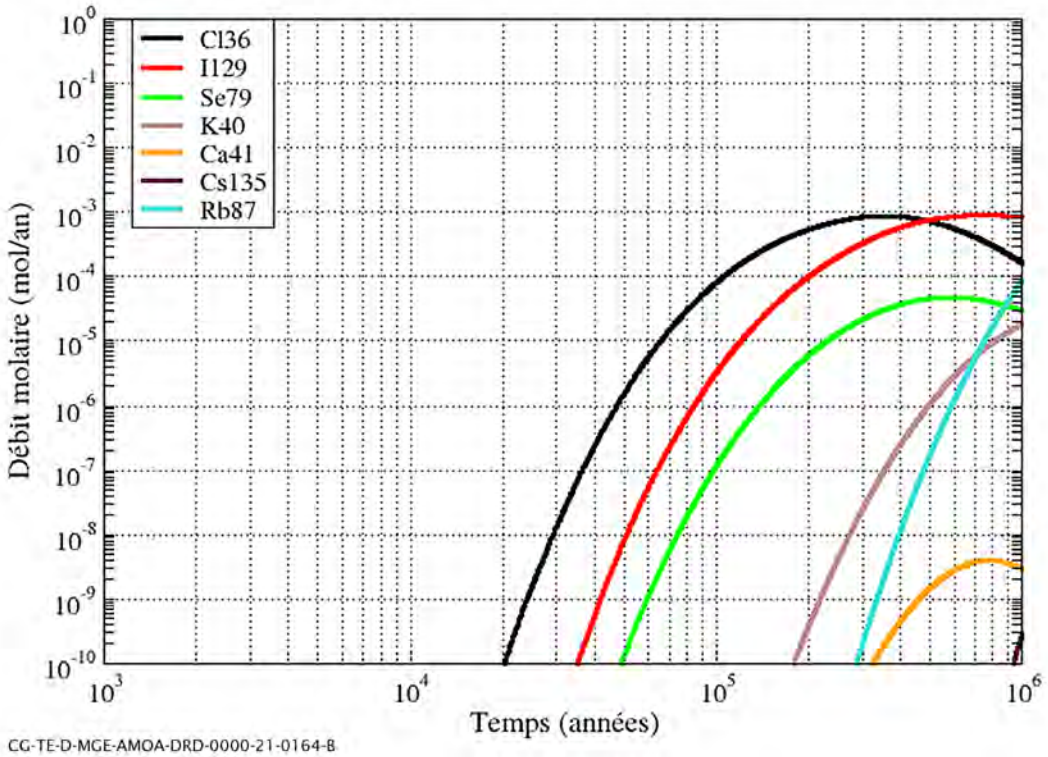
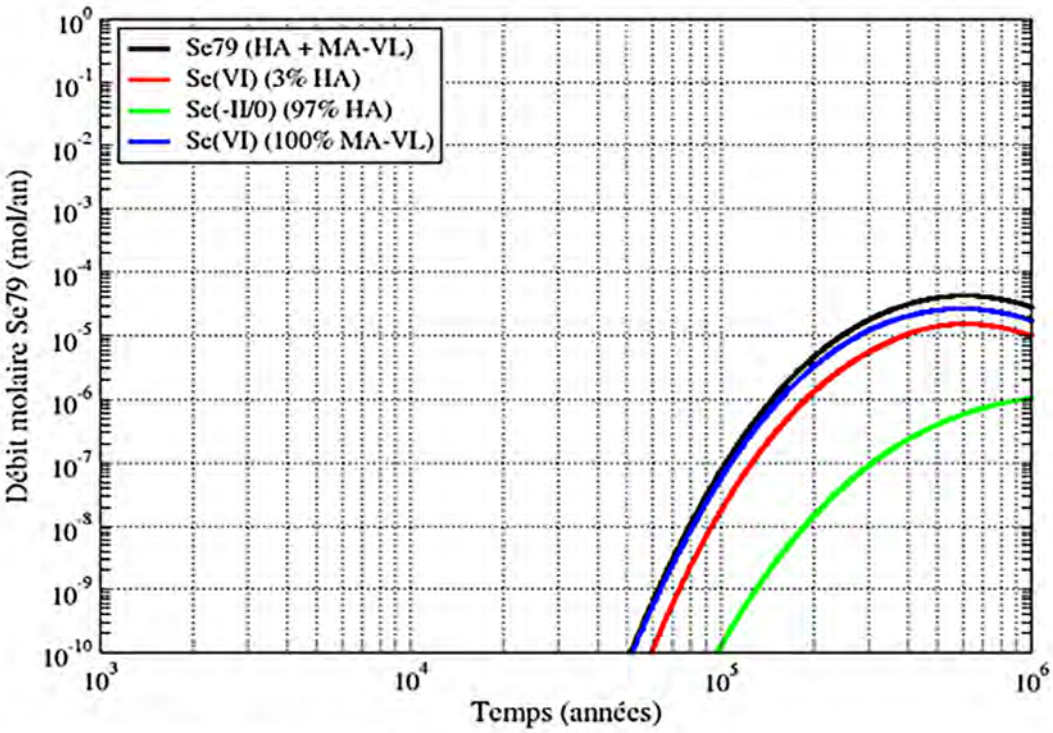


Figure 6-8 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits molaires des principaux radionucléides au mur de la couche du Callovo-Oxfordien*

Dans le cas particulier du sélénium 79, la figure 6-9 précise les contributions de chacune des deux formes chimiques du sélénium (Se(+VI) et Se(-II/0)) au débit molaire total du sélénium 79 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, avec une répartition selon les quartiers de stockage :

- pour le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA, 3 % de l'inventaire sous forme Se(+VI) soluble, et 97 % sous forme Se(-II/0) peu soluble ;
- pour le quartier de stockage MA-VL, 100 % de l'inventaire sous forme Se(+VI) soluble.

La contribution de la forme chimique oxydée Se(+VI), considérée soluble, contrôle le débit molaire total du sélénium 79, avec une légère prédominance correspondant à l'intégralité de l'inventaire du quartier de stockage MA-VL devant celle des 3 % de l'inventaire HA. La contribution de la forme réduite Se(-II/0) correspondant à 97 % de l'inventaire HA est plus faible, inférieure d'au moins un ordre de grandeur et d'occurrence plus tardive, du fait du contrôle par la faible limite de solubilité du Se(-II/0) en milieu argileux (2×10^{-9} mol.L^{-1}, cf. « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)).



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0166-A

Figure 6-9 *Scénario d'évolution normale - situation de référence : détail des contributions (Se(+VI) HA, Se(-II/0) HA, Se(+VI) MA-VL) à l'historique de débit molaire du sélénium 79 au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

Les cartographies de concentration

La figure 6-10 présente les cartographies de concentration (en mol.m^{-3}) de l'iode 129 (radionucléide mobile) et de quelques actinides (radionucléides généralement retenus dans la couche du Callovo-Oxfordien) autour des alvéoles de stockage HA à un million d'années. Cette figure indique, qu'à la différence de l'iode 129 mobile, la forte sorption des actinides dans la couche du Callovo-Oxfordien conduit à les immobiliser au voisinage des alvéoles de stockage, sur une distance d'environ 10 mètres pour l'uranium (sorbé), de 1 mètre à 2 mètres pour le neptunium (fortement sorbé) et d'au plus quelques décimètres pour le thorium (très fortement sorbé).

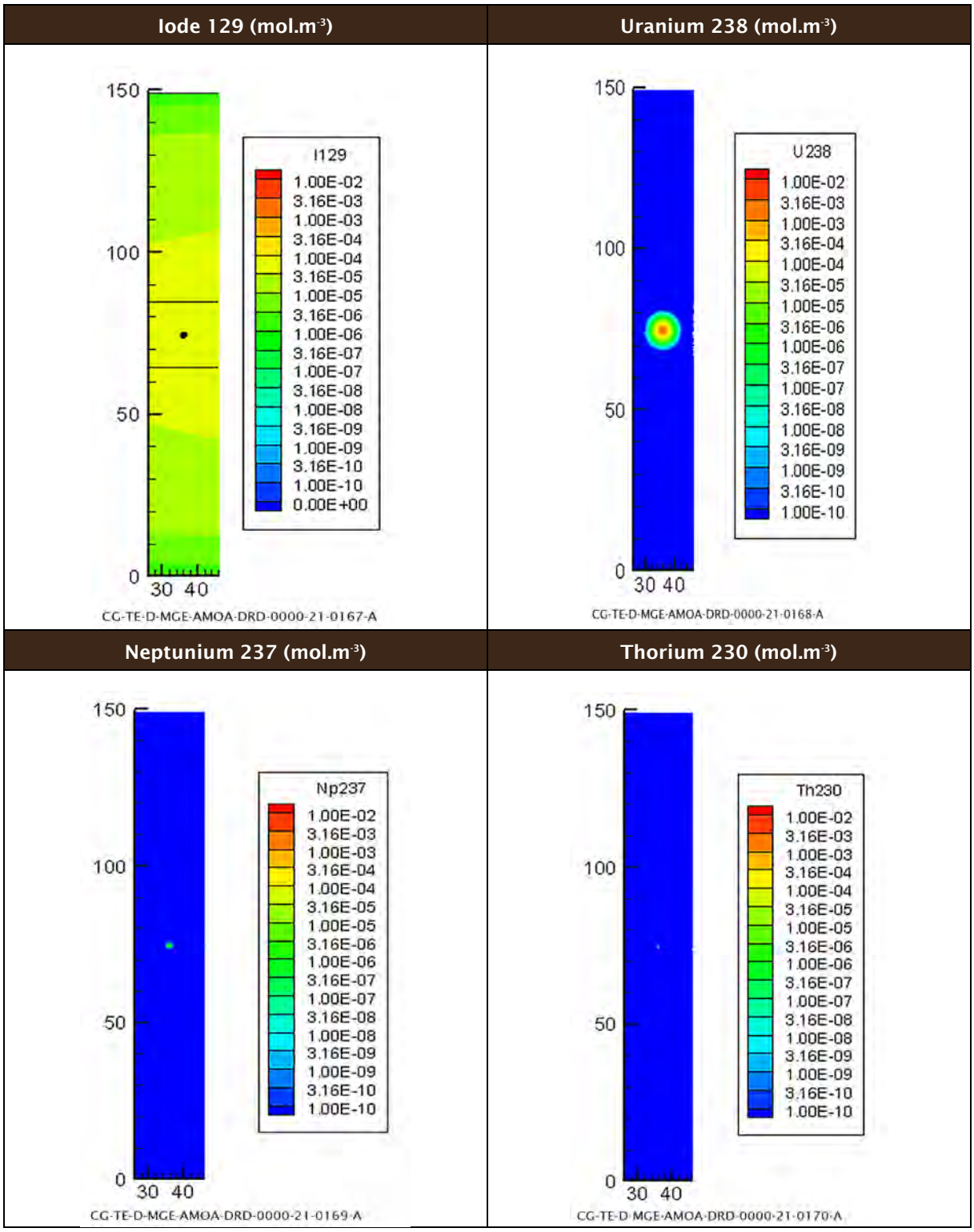


Figure 6-10 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : cartographies de concentration (mol.m^{-3}) en iode 129, uranium 238, neptunium 237 et thorium 230 dans la couche du Callovo-Oxfordien autour d'un alvéole HA à un million d'années*

c) L'analyse du transfert de l'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79 issus des zones HA et MA-VL- Cas de la non prise en compte de l'auto-irradiation du verre

La figure 6-11 présente l'évolution des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 relâchés par les colis HA et MA-VL et migrant par le Callovo-Oxfordien et par la voie ouvrages. Les débits molaires sont déterminés au niveau des galeries d'accès (zone HA), des galeries de liaison, de la zone centrale comprenant la base des liaisons surface-fond et de la sortie des liaisons surface-fond.

Les graphes de la figure 6-11 permettent d'aboutir aux conclusions suivantes :

- comme évoqué au chapitre 6.2.1.2 du présent volume, le relâchement des radionucléides intervient entre 3 800 ans (date de perte d'étanchéité du conteneur) et 230 000 ans pour les déchets HA (cas sans prise en compte de l'auto-irradiation du verre) et pendant environ 75 000 ans pour les déchets MA-VL ;
- les débits molaires en entrée de galeries des quartiers de stockage HA et MA-VL présentent un retard limité par rapport au relâchement des radionucléides. La valorisation du coefficient de partage (sorption) dans les voussoirs (revêtement-soutènement) des alvéoles MA-VL permet de bénéficier d'un retard et d'un étalement temporel du transfert, et de retarder de plusieurs milliers d'années l'occurrence du maximum de débit molaire en sortie des alvéoles MA-VL ;
- l'atténuation du débit molaire maximal est d'environ deux ordres de grandeur en sortie de quartier de stockage HA, quatre ordres de grandeur en sortie globale de la zone HA (en entrée de la zone centrale précisée sur la figure 5-52) et plus de six ordres de grandeur en sortie des liaisons surface-fond ;
- le débit molaire maximum par la voie ouvrages n'est atteint qu'après quelques millions d'années pour l'iode 129 et pour le sélénium 79 (dont la courbe de débit en sortie des liaisons surface-fond est inférieure à la limite inférieure du graphe), et d'environ 800 000 ans pour le chlore 36. Ces temps de transfert élevés s'expliquent par la longueur cumulée de la voie ouvrages et le régime hydraulique très faible. En effet, la diffusion est dominante dans les galeries et les liaisons surface-fond ;
- les débits molaires en iode 129 sortant des puits et des descenderies proviennent essentiellement de la zone HA, et en particulier des inventaires du quartier pilote HA. La contribution des alvéoles du quartier pilote HA (inventaires des colis HA0 stockés dans ce quartier) à la voie de transfert par les liaisons surface-fond est 20 fois plus importante que celle des alvéoles MA-VL. En effet, (i) les inventaires HA0 des alvéoles du quartier pilote HA sont situés à une distance plus courte par rapport à la zone centrale, que ne le sont les principaux inventaires MA-VL localisés en fond de quartier de stockage MA-VL (nord-est), et (ii) les inventaires des alvéoles du quartier de stockage HA, situés à des distances pluri-hectométriques par rapport à la zone centrale, ont une contribution plus faible que celle des inventaires HA0 des alvéoles du quartier pilote HA.

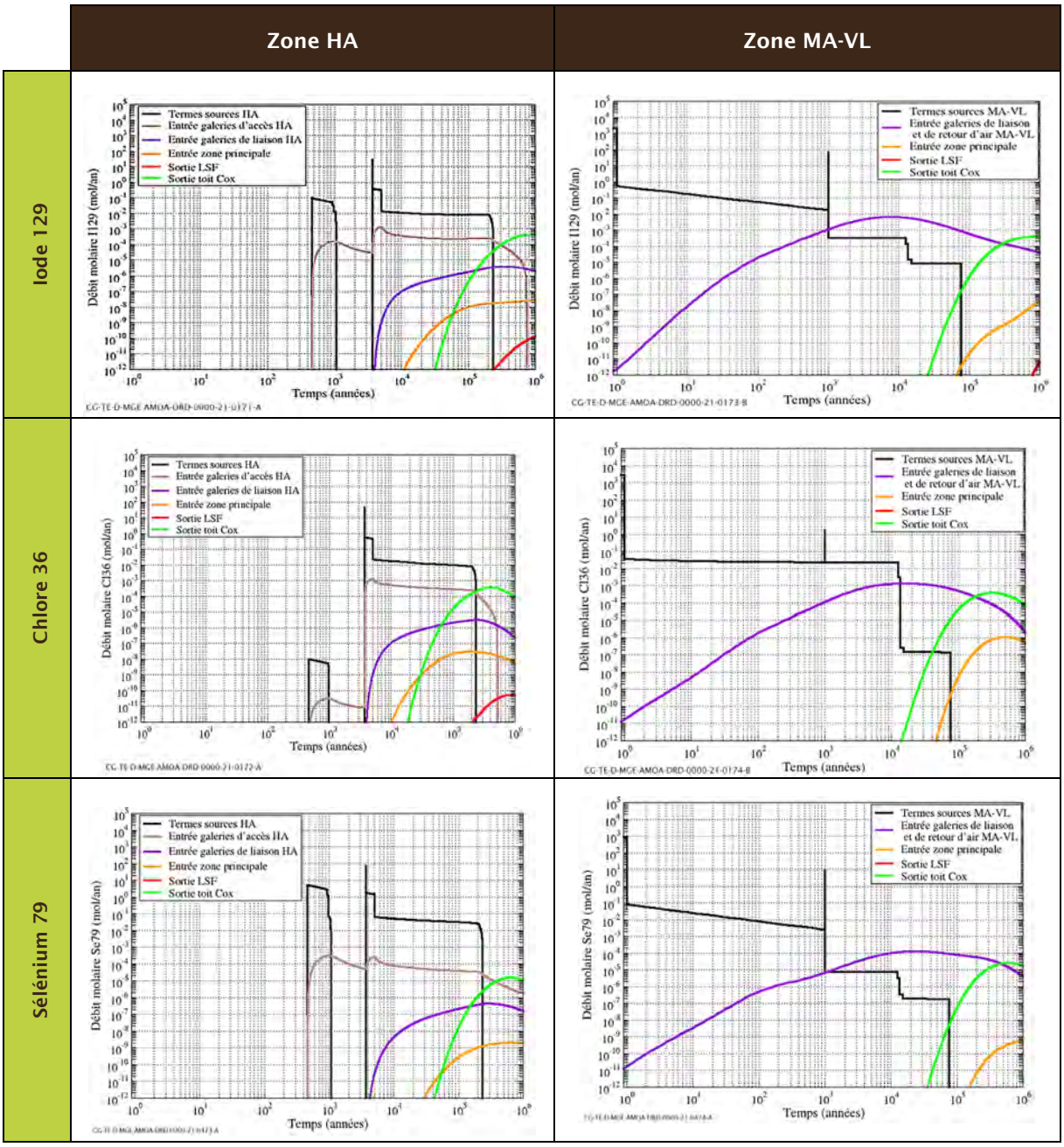


Figure 6-11 *Scénario d'évolution normale – situation de référence, quartiers de stockage HA (à gauche) et quartier de stockage MA-VL (à droite) : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit)*

Le tableau 6-2 donne le bilan des débits molaires en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79, cumulés sur un million d'années en différents endroits au long de la voie « ouvrages » et en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien.

Ces débits molaires cumulés sont normés par rapport à l'inventaire total initial respectif des quartiers de stockage HA et du quartier de stockage MA-VL.

Ces données permettent de dresser les conclusions suivantes :

- pour la zone HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA), la voie de transfert principale est le Callovo-Oxfordien, puisque sur un million d'années, seulement 3 % de l'inventaire initial en iode 129 (2 % pour le chlore 36 et 0,1 % pour le sélénium 79) entre dans les galeries d'accès. Cette prépondérance de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien à l'échelle de l'alvéole HA s'explique par la longueur hectométrique de la partie utile des alvéoles HA et l'absence de drain hydraulique dans les galeries. Le transfert lent et principalement diffusif, associé à la longueur des galeries, favorise le transfert des radionucléides depuis les galeries vers la couche du Callovo-Oxfordien. Ainsi au final, seulement 0,1 % de l'inventaire initial en iode 129 (0,04 % pour le chlore 36 et 0,002 % pour le sélénium 79) arrivent dans les galeries de liaison. Cette fraction est encore bien plus faible en sortie des liaisons surface-fond et s'établit à des valeurs inférieures à 0,00001 % ;
- pour le quartier de stockage MA-VL[60], seulement environ 15 % de l'inventaire initial en iode 129 (environ 5 % de celui en chlore 36 et 3,4 % de celui en sélénium 79) entrent dans les galeries d'accès puis de liaison et de retour d'air et la voie de transfert principale reste la couche du Callovo-Oxfordien. En sortie du quartier de stockage MA-VL, dans les galeries et les liaisons surface-fond, le transfert des radionucléides s'effectue en régime hydraulique lent et à diffusion dominante, ce qui favorise le transfert des radionucléides depuis les galeries vers la couche du Callovo-Oxfordien. Ainsi, moins de 0,001 % de l'inventaire total initial en iode 129 (0,02 % de celui en chlore 36 et 3×10^{-5} % de celui en sélénium 79) arrive à la base des liaisons surface-fond par la voie ouvrages. Les fractions d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 sortant des liaisons surface-fond sont bien inférieures à 10^{-7} %, principalement du fait de la distance importante séparant la base des liaisons surface-fond (zone centrale) de la galerie de recoupe MA-VL située au nord-est du quartier de stockage MA-VL, et à proximité de laquelle sont situés les plus forts inventaires en iode 129 des déchets MA-VL).

Tableau 6-2 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (cumulés sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial respectif des quartiers de stockage HA et du quartier de stockage MA-VL) entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit)*

Débit cumulé en % de l'inventaire total initial de la zone HA	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone centrale	Sortie des liaisons surface-fond	Sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien
Iode 129	3,3 %	0,1 %	$<10^{-3}$ %	$<10^{-5}$ %	10,0 %
Chlore 36	2,2 %	0,04 %	$<10^{-3}$ %	$<10^{-6}$ %	5,6 %
Sélénium 79	0,1 %	2×10^{-3} %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-8}$ %	0,08 %
Débit cumulé en % de l'inventaire total initial du quartier de stockage MA-VL	**Entrée dans les galeries de liaison/accès et de retour d'air**		**Entrée dans la zone centrale**	**Sortie des liaisons surface-fond**	**Sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien**
Iode 129	15,3 %		$<10^{-3}$ %	$<10^{-7}$ %	11,1 %
Chlore 36	4,7 %		0,02 %	$<10^{-9}$ %	6,4 %
Sélénium 79	3,4 %		3×10^{-5} %	$<10^{-11}$ %	1,7 %

[60] Avec une distribution des inventaires MA-VL de l'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79 correspondant à celle des inventaires du radionucléide « pilote » iode 129 (inventaires principaux en iode 129 disposés à proximité de la galerie de recoupe au nord-est du quartier de stockage MA-VL).

d) L'analyse du transfert de l'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79 issus des zones HA et MA-VL- Cas de la prise en compte de l'auto-irradiation du verre (évaluation pour l'iode 129)

La comparaison des résultats présentés à la figure 6-6 (cas sans prise en compte de l'auto-irradiation du verre) avec ceux de la figure 6-12 (cas avec prise en compte de l'auto-irradiation du verre) montrent une très faible influence de la prise en compte de l'auto-irradiation du verre sur les débits molaires d'iode 129 sortant de la couche du Callovo-Oxfordien et des liaisons surface-fond.

En effet, la durée du terme source des déchets vitrifiés dans les deux cas (avec ou sans prise en compte de l'auto-irradiation du verre) est largement inférieure aux temps de transfert de l'iode 129 à travers la couche du Callovo-Oxfordien ou selon la voie « ouvrages » : durée du terme source d'environ 230 000 ans (cas sans auto-irradiation) et 20 000 ans (cas avec auto-irradiation), comparée à plusieurs centaines de milliers d'années de temps de transfert. Ainsi, la cinétique du terme source verre n'a pas d'influence sur les débits molaires sortant aux limites de la couche du Callovo-Oxfordien, quelle que soit la voie de transfert.

En conséquence, dans les résultats présentés par la suite pour la situation de référence, l'auto-irradiation du verre n'est plus retenue.

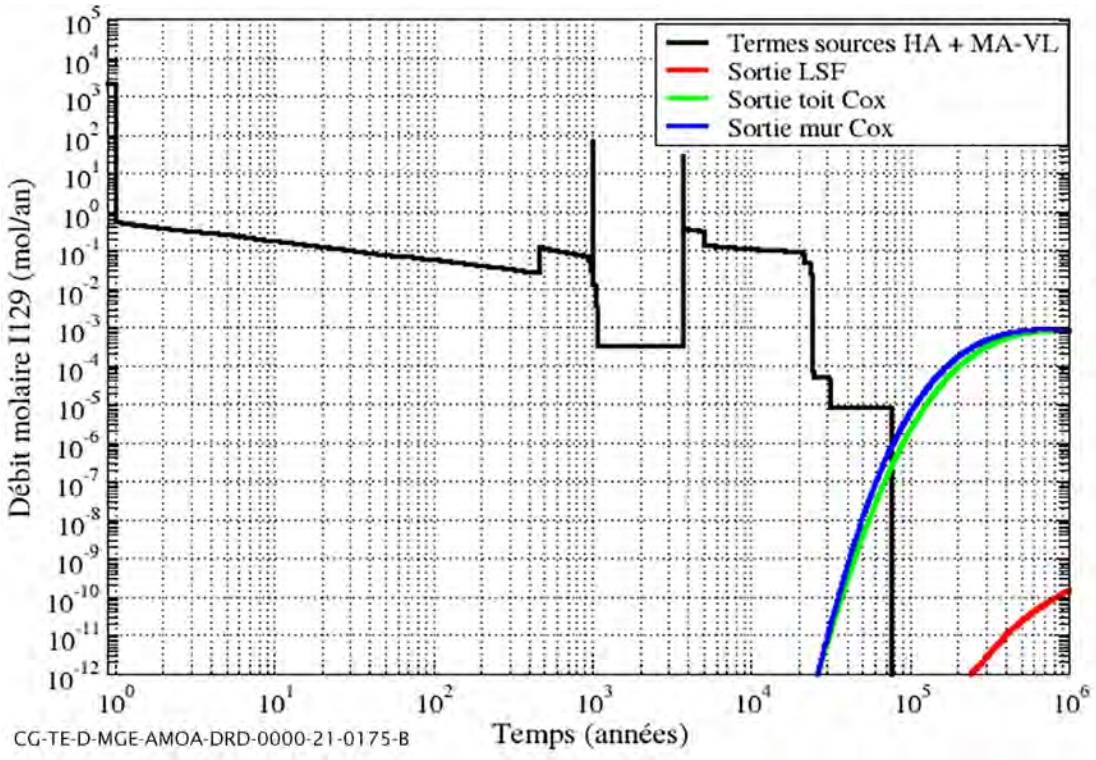


Figure 6-12 *Scénario d'évolution normale – situation de référence, prise en compte de l'auto-irradiation du verre dans les quartiers de stockage HA : historiques des débits molaires en iode 129 sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)*

6.2.1.3.2 Le transfert des radionucléides dans le milieu géologique (des formations encaissantes[61] aux exutoires)

Les radionucléides qui parviennent au toit de la couche du Callovo-Oxfordien atteignent les horizons poreux de l'Oxfordien caractérisés par une vitesse de pore moyenne de l'ordre de 4 km par 100 000 ans, et une direction vers le nord-ouest, avant d'atteindre la base du Kimméridgien. Les radionucléides migrent ensuite dans cette formation marneuse par diffusion avant de se disperser dans l'aquifère du Barrois. Les débits molaires dans l'Oxfordien présentés au chapitre 6.3.1.3 pour la situation enveloppe sont calculés au niveau de la zone de fracturation diffuse située à 9 km du droit du stockage.

Les radionucléides qui parviennent au mur de la couche du Callovo-Oxfordien atteignent les calcaires du Dogger où l'écoulement est orienté vers le nord-ouest, avec une vitesse de pore moyenne de l'ordre de 12 km par 100 000 ans, avant d'atteindre la zone de fracturation diffuse. Les débits molaires dans le Dogger présentés ci-après sont calculés au niveau de la zone de fracturation diffuse située à 9 km du droit du stockage.

La figure 6-13 présente les débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 en sortie des principales formations encaissantes.

Le tableau 6-3 compare les débits molaires dans les formations encaissantes à l'inventaire total initial pour chaque radionucléide. Il ressort de ces résultats :

- pour la voie de transfert par l'Oxfordien :
  - ✓ une très faible proportion de l'inventaire total initial en iode 129 atteint les limites supérieures de l'Oxfordien (environ 0,7 %). Le transfert dans l'Oxfordien permet de bénéficier d'une atténuation d'un ordre de grandeur des débits molaires d'iode 129 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, avec un retard de l'occurrence du maximum de débit molaire de 150 000 ans par rapport à la date d'occurrence du débit molaire maximum au toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ le transfert dans le Kimméridgien permet une atténuation supplémentaire d'un facteur 3 et la quantité d'iode 129 atteignant le Barrois ne représente que 0,2 % de l'inventaire total initial en iode 129 ;
  - ✓ les observations sont similaires pour le chlore 36. Le transfert dans l'Oxfordien conduit à ce que seulement 0,35 % de l'inventaire total initial en chlore 36 atteigne les limites supérieures de l'Oxfordien et seulement 0,1 % atteigne le toit du Kimméridgien (calcaires du Barrois) ;
  - ✓ tout comme l'iode 129 et le chlore 36, le sélénium 79 subit une atténuation d'environ un facteur 45 de son débit molaire maximum entre le toit de la couche du Callovo-Oxfordien et le toit du Kimméridgien ;
- pour la voie de transfert par le Dogger :
  - ✓ les écoulements dans le Dogger vers la zone de fracturation diffuse, sont environ trois fois plus rapides que ceux dans l'Oxfordien ;
  - ✓ une part plus importante des radionucléides mobiles qui arrivent au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (19 % de l'iode 129, 16 % du chlore 36 et 15 % du sélénium 79) migre dans le Dogger et atteint la zone de fracturation diffuse (2,4 % de l'inventaire total initial en iode 129, 1,1 % de celui en chlore 36 et 0,03 % de celui en sélénium 79) en raison des échanges de masse plus limités entre le Dogger et la couche du Callovo-Oxfordien[62].

[61] Comme indiqué au chapitre 4 du présent volume et rappelé au chapitre 5.2.7 du présent volume, bien que n'ayant pas de fonctions de sûreté après fermeture, les formations encaissantes sont toutefois représentées jusqu'aux exutoires afin de permettre la quantification des incidences potentielles sur l'homme.

[62] Du fait des vitesses de migration plus élevées dans le Dogger que dans les horizons poreux de l'Oxfordien.

Tableau 6-3 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, depuis la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux différents exutoires (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial)*

		Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
		% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
	Inventaire initial total en moles HA/MA-VL	4 600 moles			6 800 moles			13 900 moles		
	Dont HA	52 %			53 %			93 %		
	Dont MA-VL	48 %			47 %			7 %		
Vers l´exutoire au Barrois	Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	10,5 %	800	850	5,9 %	740	370	0,2 %	42	610
	Toit de l'Oxfordien	0,7 %	88	>1 000	0,35 %	40	590	0,01 %	3	880
	Toit du Kimméridgien	0,2 %	30	>1 000	0,1 %	10	860	0,002 %	0,9	>1 000

		Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
		% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
Vers l´exutoire au Dogger	Au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	12,5 %	900	750	6,8 %	880	350	0,2 %	48	580
	Dogger (zone de fracturation diffuse)	2,4 %	210	860	1,1 %	150	460	0,03 %	8	690

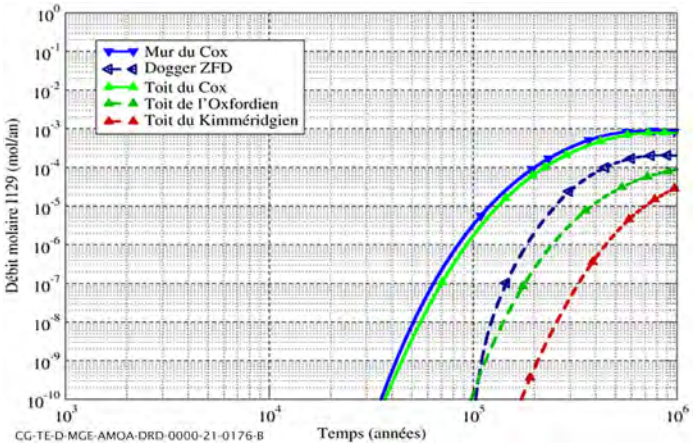
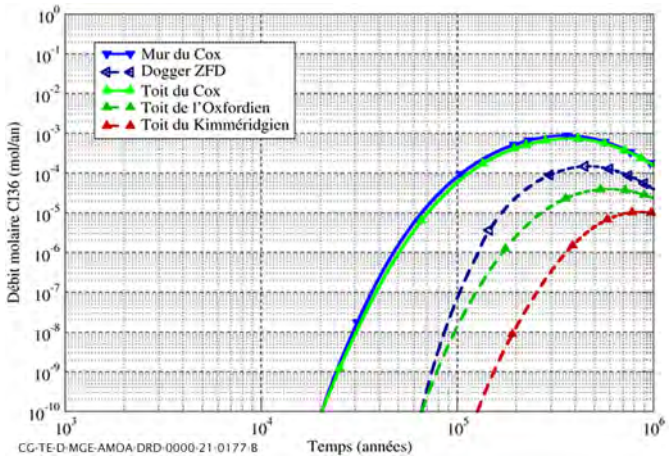
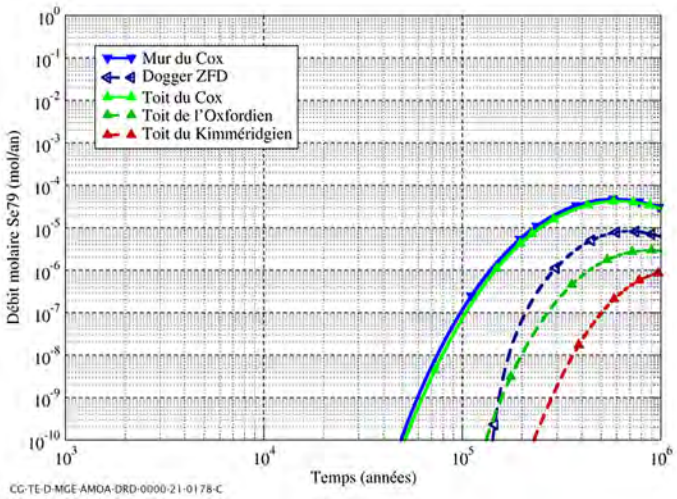
	Situation de référence : Stockage implanté à une profondeur « réaliste » dans le Callovo-Oxfordien
Iode 129	
Chlore 36	
Sélénium 79	

Figure 6-13 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien, et depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à la zone de fracturation diffuse dans le Dogger*

6.2.2 Les résultats des incidences sanitaires sur l'homme liées au transfert potentiel de radionucléides aux exutoires

Ce chapitre présente le transfert des radionucléides dans la biosphère et l'évaluation des incidences sanitaires sur l'homme par la quantification de la dose aux exutoires retenus sur les personnes représentatives des différents groupes de référence hypothétiques définis au chapitre 4 du présent volume et détaillés dans le document « Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage » (57).

Les résultats sont présentés à la figure 6-14, à la figure 6-15 et au tableau 6-4 pour les exutoires retenus pour la situation de référence (cf. Chapitre 2.10 du présent volume) : « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) ». Ils concernent l'incidence sanitaire relative au groupe de référence hypothétique « multi-activités », pour le cas des biosphères tempérée et chaude, et des classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an). Ces résultats sont complétés à la figure 6-16 et au tableau 6-5 par ceux relatifs à la biosphère froide pour la classe d'âge adulte[63].

Pour ces mêmes exutoires, les résultats relatifs aux deux groupes de référence hypothétiques particuliers de sensibilité au régime alimentaire (« éleveur de bovins », « villageois jardinier ») sont présentés à la figure 6-17 et au tableau 6-6 pour une biosphère tempérée et la classe d'âge adulte.

L'ensemble des résultats relatifs au groupe de référence hypothétique « multi-activités » montre que :

- pour l'exutoire « Pompage dans le Barrois » :
  - ✓ les incidences radiologiques relatives aux biosphères tempérée et chaude, exprimées en termes de doses, sont principalement pilotées par le chlore 36 et sont très faibles. Les valeurs maximales de dose, obtenues pour une biosphère chaude, sont inférieures à 2×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'adulte, 3×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans et 5×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'enfant d'un an. En lien avec les dates d'occurrence respectives des débits molaires maximaux obtenus au toit du Kimméridgien (cf. Tableau 6-3 du chapitre 6.2.1.3.2 du présent volume), la valeur maximale du cumul de dose est atteinte après 900 000 ans quelle que soit la classe d'âge ;
- pour l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » :
  - ✓ les incidences radiologiques relatives aux biosphères tempérée et chaude, exprimées en termes de doses, sont pilotées par le sélénium 79 et l'iode 129 pour la classe d'âge adulte, et principalement par le sélénium 79 pour les deux classes d'âge enfant (10 ans, 1 an). Les incidences radiologiques sont très faibles, avec des valeurs maximales de dose, obtenues pour une biosphère chaude, et inférieures à 1×10^{-3} mSv.an^{-1} pour l'adulte et $1{,}5 \times 10^{-3}$ mSv.an^{-1} pour les enfants de 10 ans ou 1 an. En lien avec les dates d'occurrence respectives des débits molaires maximaux obtenus dans le Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse (cf. Tableau 6-3 du chapitre 6.2.1.3.2 du présent volume), la valeur maximale du cumul de dose est globalement atteinte entre 650 000 ans et 700 000 ans, quelle que soit la classe d'âge ;
- pour chacun des deux exutoires (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse »), les incidences radiologiques relatives à la biosphère froide (classe d'âge adulte) sont inférieures d'environ 20 % à celles obtenues avec la biosphère tempérée (classe d'âge adulte), avec un horizon temporel du cumul de dose maximal similaire à celui des biosphères tempérée et chaude.

Les incidences radiologiques relatives aux groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier » en biosphère tempérée (classe d'âge adulte) sont légèrement supérieures à celles obtenues avec le groupe de référence « multi-activités » en biosphère tempérée (classe d'âge adulte), respectivement d'au plus 8 % et 25 %, et restent donc très faibles, de l'ordre de 5×10^{-4} mSv.an^{-1} pour le villageois jardinier.

---

[63] En cohérence avec les objectifs de protection présentés au chapitre 1.5.2.1 du présent volume, la contrainte de dose est représentée par un trait noir continu pendant les premiers 10 000 ans (objectif de protection), puis par des pointillés sur le reste de la période d'évaluation (valeur de référence).

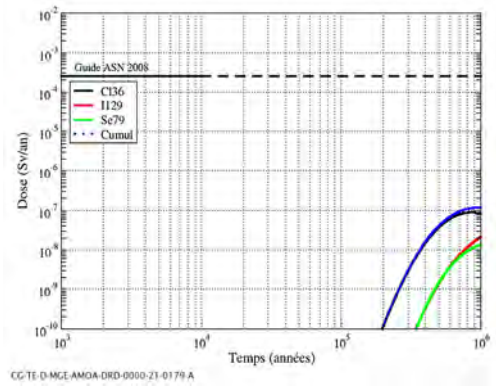
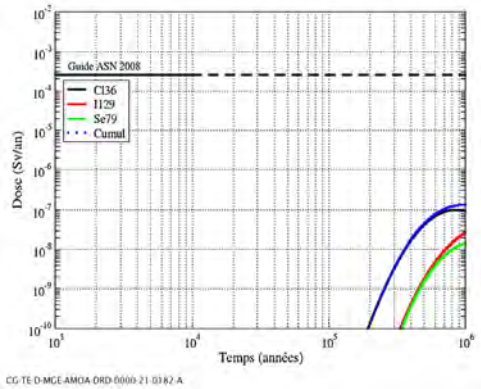
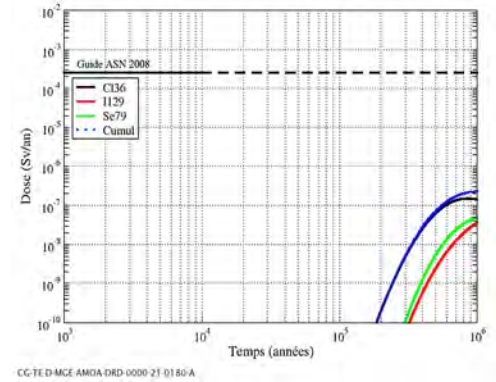
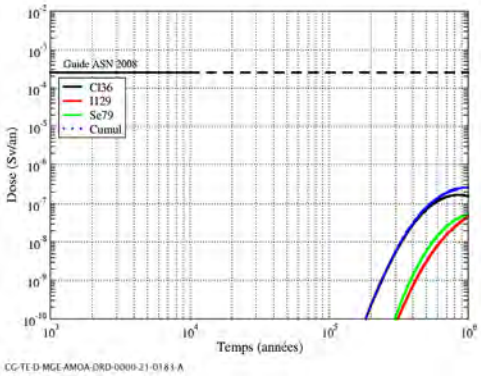
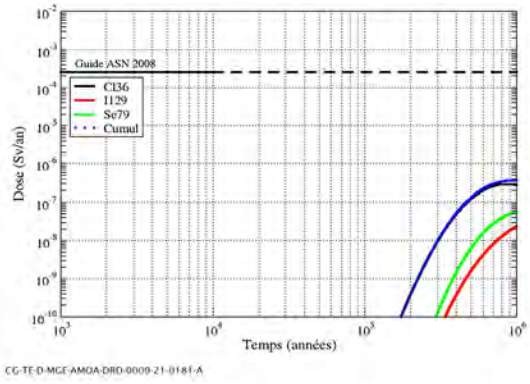
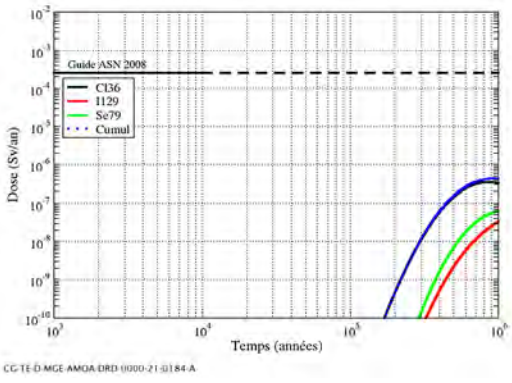
	Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})	
	Groupe de référence hypothétique « multi-activités »	
	Biosphère tempérée	Biosphère chaude
Adulte		
Enfant 10 ans		
Enfant 1 an		

Figure 6-14 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

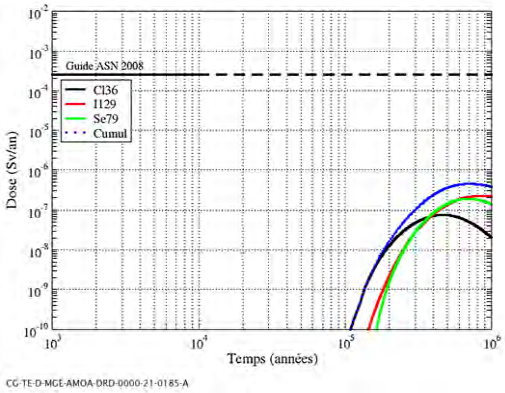
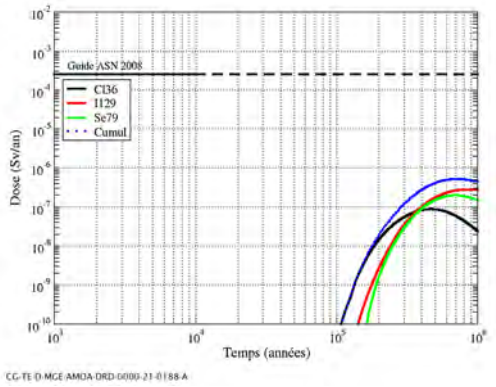
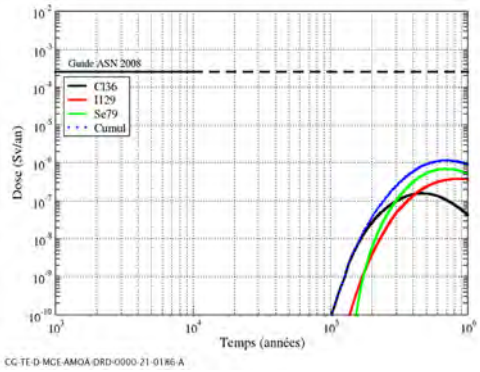
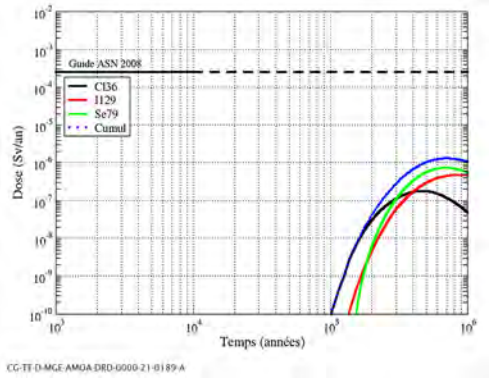
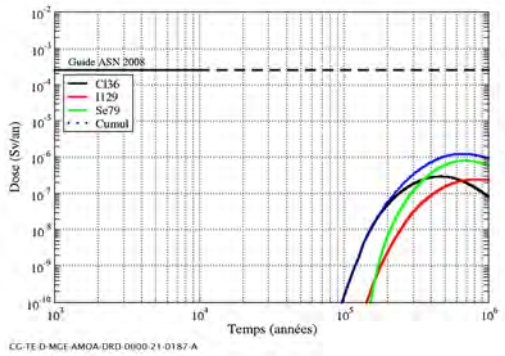
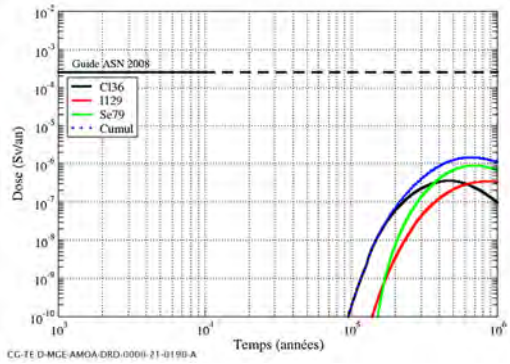
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse) (100 L.min^{-1})	
	Groupe de référence hypothétique « multi-activités »	
	Biosphère tempérée	Biosphère chaude
Adulte		
Enfant 10 ans		
Enfant 1 an		

Figure 6-15 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Tableau 6-4 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : doses maximales et occurrences des doses maximales aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

		Exutoire Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})				Exutoire Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})			
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités »							
		Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	$8,9 \times 10^{-5}$	860	$1,0 \times 10^{-4}$	860	$7,7 \times 10^{-5}$	460	$8,9 \times 10^{-5}$	460
	^{129}I	$2,2 \times 10^{-5}$	≥1 000	$2,7 \times 10^{-5}$	≥1 000	$2,2 \times 10^{-4}$	860	$2,8 \times 10^{-4}$	860
	^{79}Se	$1,3 \times 10^{-5}$	≥1 000	$1,4 \times 10^{-5}$	≥1 000	$1,9 \times 10^{-4}$	690	$2,0 \times 10^{-4}$	690
	Cumul[64]	$1,2 \times 10^{-4}$	990	$1,4 \times 10^{-4}$	≥1 000	$4,5 \times 10^{-4}$	700	$5,2 \times 10^{-4}$	710
Enfant 10 ans	^{36}Cl	$1,5 \times 10^{-4}$	860	$1,7 \times 10^{-4}$	860	$1,6 \times 10^{-4}$	460	$1,8 \times 10^{-4}$	460
	^{129}I	$3,7 \times 10^{-5}$	≥1 000	$4,6 \times 10^{-5}$	≥1 000	$3,8 \times 10^{-4}$	860	$4,8 \times 10^{-4}$	860
	^{79}Se	$5,0 \times 10^{-5}$	≥1 000	$5,3 \times 10^{-5}$	≥1 000	$7,0 \times 10^{-4}$	690	$7,4 \times 10^{-4}$	690
	Cumul	$2,3 \times 10^{-4}$	≥1 000	$2,6 \times 10^{-4}$	≥1 000	$1,2 \times 10^{-3}$	690	$1,3 \times 10^{-3}$	700
	^{36}Cl	$3,0 \times 10^{-4}$	860	$3,5 \times 10^{-4}$	860	$3,0 \times 10^{-4}$	460	$3,6 \times 10^{-4}$	460

[64] Les valeurs présentées à la ligne « Cumul » sont les doses maximales et les dates d'occurrence qui correspondent au cumul des doses des radionucléides. Ces valeurs sont calculées d'après l'historique de la somme des doses liées à chaque radionucléide, tracé en points bleu sur les graphes de doses. Les doses maximales et les dates d'occurrence ne coïncident pas nécessairement à celles des principaux radionucléides (iode 129, chlore 36 et sélénium 79).

		Exutoire Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})				Exutoire Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})			
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités »							
		Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Enfant 1 an	^{129}I	$2,4 \times 10^{-5}$	≥1 000	$3,3 \times 10^{-5}$	≥1 000	$2,5 \times 10^{-4}$	860	$3,5 \times 10^{-4}$	860
	^{79}Se	$5,7 \times 10^{-5}$	≥1 000	$6,5 \times 10^{-5}$	≥1 000	$8,0 \times 10^{-4}$	690	$9,1 \times 10^{-4}$	690
	Cumul	$3,6 \times 10^{-4}$	930	$4,3 \times 10^{-4}$	930	$1,2 \times 10^{-3}$	660	$1,5 \times 10^{-3}$	660

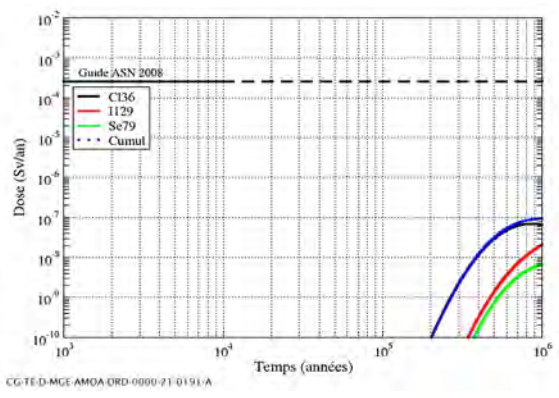
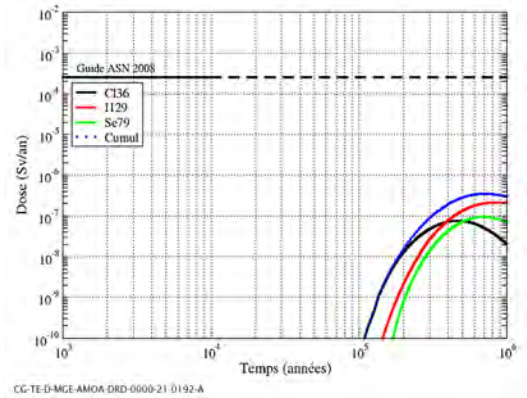
	Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})	Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})
	Groupe de référence hypothétique « multi-activités »	
	Biosphère froide	
Adulte		

Figure 6-16 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des doses aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », la biosphère froide et la classe d'âge adulte*

Tableau 6-5 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : doses maximales et occurrences des doses maximales aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », la biosphère froide et la classe d'âge adulte*

		Exutoire Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})		Exutoire Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})	
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités »			
		Biosphère froide			
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	7,0 × 10^{-5}	860	7,7 × 10^{-5}	460
	^{129}I	2,1 × 10^{-5}	≥1 000	2,2 × 10^{-4}	860
	^{79}Se	6,7 × 10^{-6}	≥1 000	9,5 × 10^{-5}	690
	Cumul	9,3 × 10^{-5}	≥1 000	3,5 × 10^{-4}	710

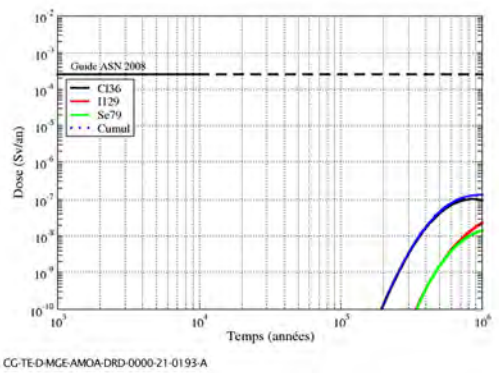
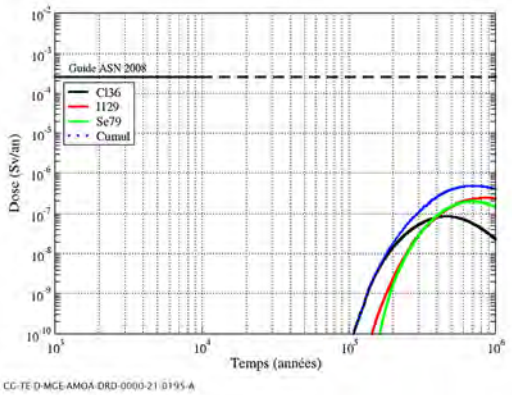
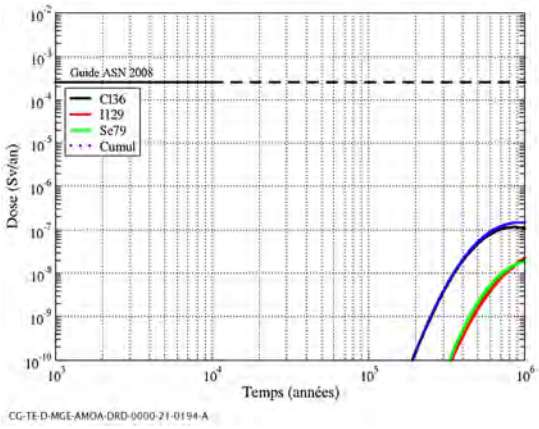
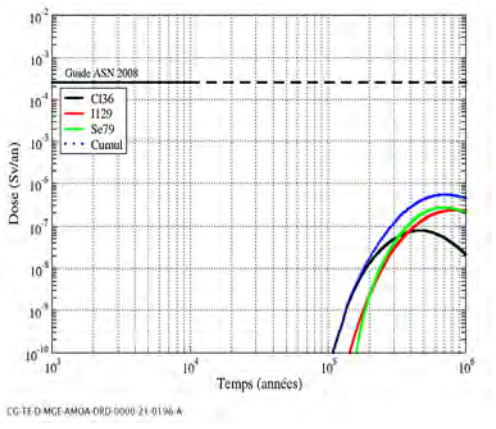
	Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})	Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})
	Groupe de référence hypothétique « éleveur de bovins »	
	Biosphère tempérée	
Adulte		
	Groupe de référence hypothétique « villageois jardinier »	
	Biosphère tempérée	
Adulte		

Figure 6-17 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des doses aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte*

Tableau 6-6 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : doses maximales et occurrences des doses maximales aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte*

		Exutoire Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})		Exutoire Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})	
		Groupe de référence hypothétique « éleveur de bovins »			
		Biosphère tempérée			
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	1,0 × 10^{-4}	860	8,6 × 10^{-5}	460
	^{129}I	2,3 × 10^{-5}	≥1 000	2,4 × 10^{-4}	860
	^{79}Se	1,4 × 10^{-5}	≥1 000	2,0 × 10^{-4}	690
	Cumul	1,3 × 10^{-4}	980	4,8 × 10^{-4}	700
		Groupe de référence hypothétique « villageois jardinier »			
		Biosphère tempérée			
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	1,2 × 10^{-4}	860	8,0 × 10^{-5}	460
	^{129}I	2,3 × 10^{-5}	≥1 000	2,3 × 10^{-4}	860
	^{79}Se	1,9 × 10^{-5}	≥1 000	2,7 × 10^{-4}	690
	Cumul	1,5 × 10^{-4}	970	5,4 × 10^{-4}	700

6.2.3 Les résultats des évaluations de performance relatives aux substances toxiques chimiques présentes dans les déchets

La présentation des résultats détaillés relatifs au transfert des substances toxiques chimiques en situation de référence du scénario d'évolution normale est principalement axée sur les éléments mobiles, à savoir les deux anions (sélénium et cyanure). Il s'agit en effet des deux seules substances toxiques chimiques présentant un débit massique en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien (toit ou mur) supérieur à 10^{-10} kg.an^{-1} (limite inférieure des graphes de débits massiques définie à la fin du chapitre 5.4 du présent volume) sur la période de simulation pour cette situation (cf. Figure 6-23 du chapitre 6.2.3.2.1 du présent volume).

6.2.3.1 Les résultats vis-à-vis de la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »

Le relâchement des substances toxiques chimiques présentes dans les déchets est associé à celui des radionucléides. Pour mémoire, il repose sur l'inventaire de référence présenté au volume 3 du présent rapport et sur les modèles de relâchement présentés aux chapitres 5.2.3.1.3 et 5.2.4.1.2 du présent volume, respectivement pour les déchets HA et les déchets MA-VL. Les valeurs de paramètres retenues sont détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

6.2.3.1.1 Le relâchement des substances toxiques chimiques dans les alvéoles de stockage HA

Les termes sources en sélénium[65] dans les alvéoles de stockage HA (colis de déchets HA0, colis de déchets HA1 et HA2) en situation de référence, représentés sous forme de débits massiques en fonction du temps, sont présentés en figure 6-18 pour le quartier pilote HA, respectivement en figure 6-19 et figure 6-20 pour le quartier de stockage HA (cas sans auto-irradiation du verre, puis cas avec auto-irradiation du verre).

Comme pour le relâchement des radionucléides rappelé au chapitre 6.2.1.2 du présent volume, et après perte d'étanchéité du conteneur de stockage HA, l'application des modèles de relâchement associés aux différentes familles de colis de déchets (cf. Chapitre 5.2.3.1.2 du présent volume et document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62) pour les valeurs de paramètres associées) conduit aux mêmes durées globales de relâchement.

[65] La seule substance toxique chimique de type anion mobile présente dans les déchets HA est le sélénium. En effet, comme indiqué dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62), le cyanure (autre anion mobile) n'est pas présent dans les déchets HA.

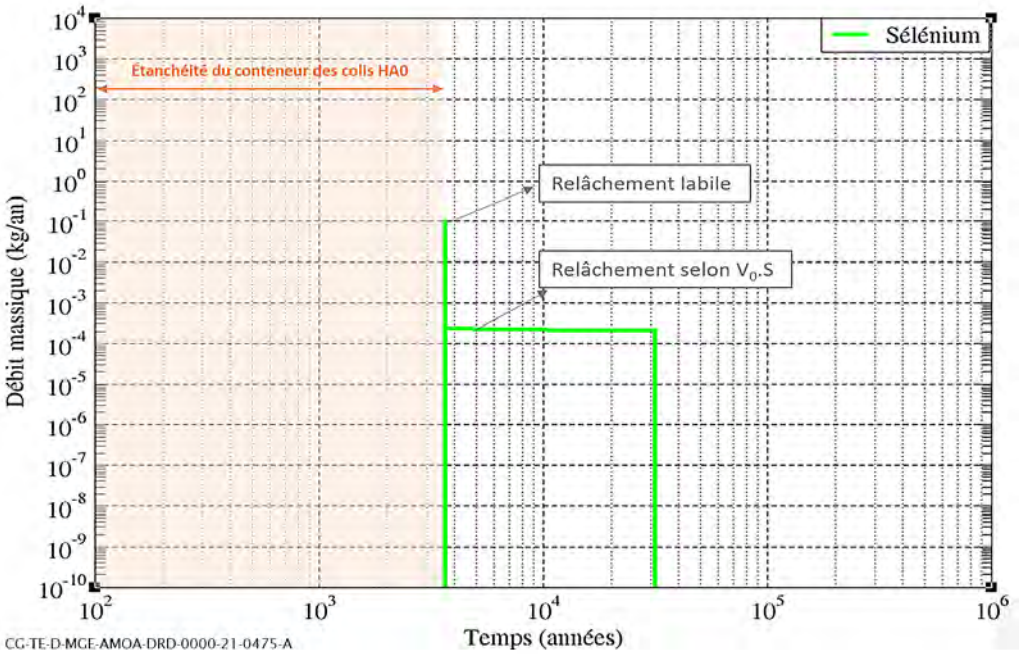


Figure 6-18 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : terme source en sélénium dans le quartier pilote HA*

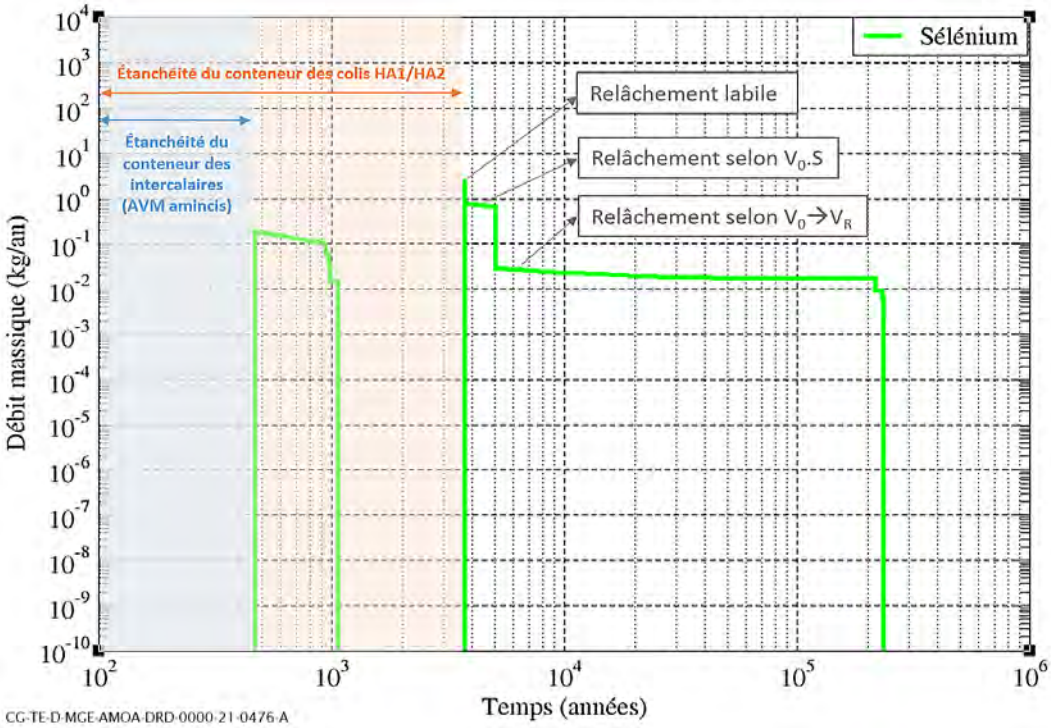


Figure 6-19 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : terme source en sélénium dans le quartier de stockage HA (cas sans auto-irradiation du verre)*

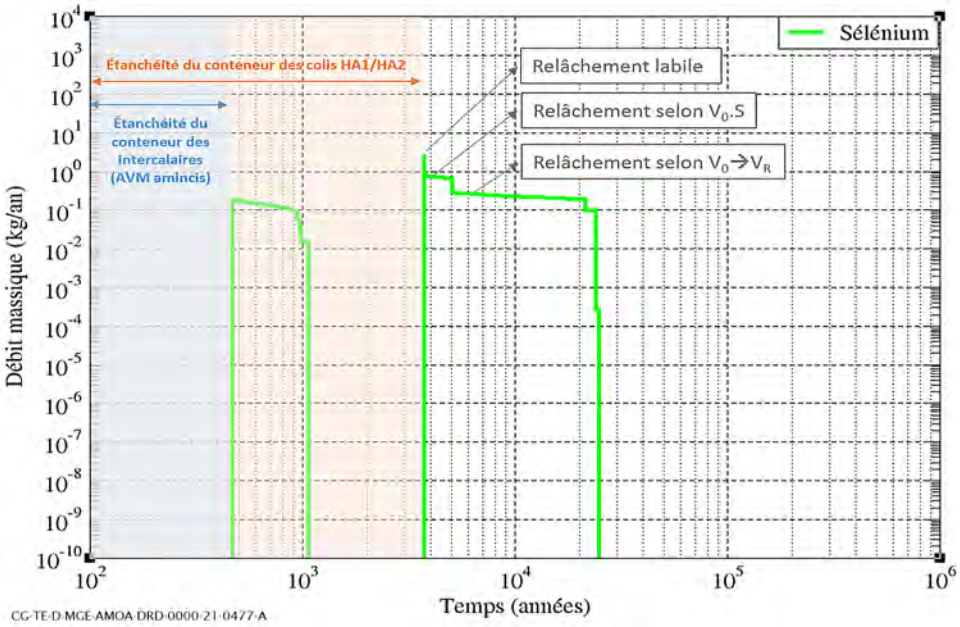


Figure 6-20 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : terme source en sélénium dans le quartier de stockage HA (cas avec auto-irradiation du verre)*

6.2.3.1.2 Le relâchement des substances toxiques chimiques dans les alvéoles de stockage MA-VL

La figure 6-21 présente les termes sources en sélénium et cyanure dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL en situation de référence. Le relâchement de ces éléments est de type labile.

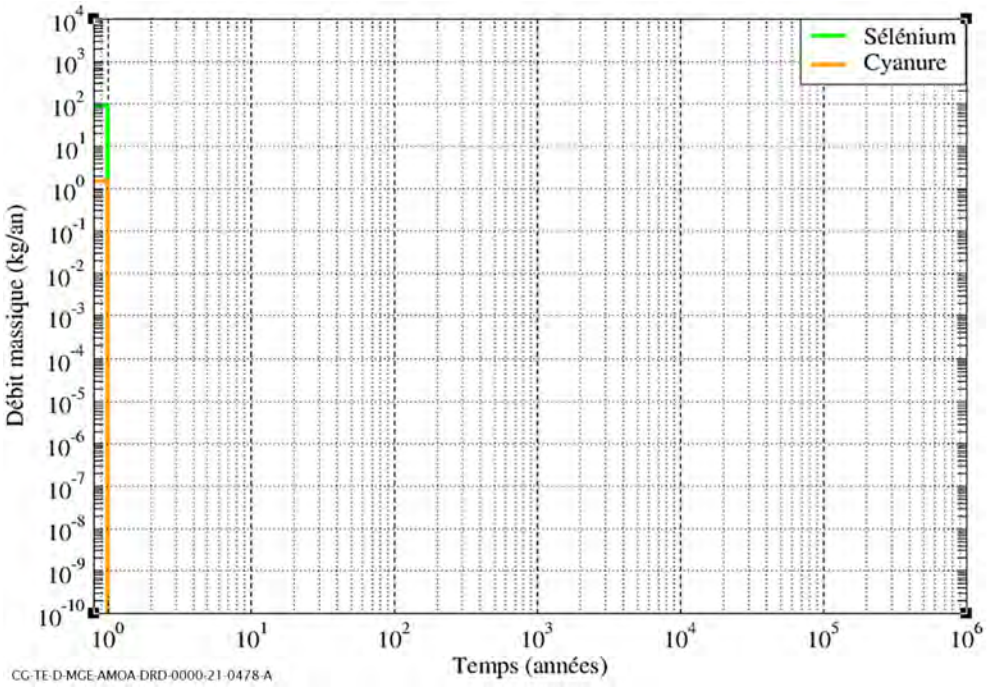


Figure 6-21 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : termes sources en sélénium et cyanure dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL*

6.2.3.2 Les résultats vis-à-vis de la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques »

6.2.3.2.1 Le transfert des substances toxiques chimiques dans les composants ouvragés et naturels du système de stockage (des colis au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien)

a) L'analyse des débits massiques en sortie des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien pour le sélénium et le cyanure[66]

La figure 6-22 présente l'évolution des débits massiques[67] en sélénium et en cyanure (anions mobiles) au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Le tableau 6-7 présente les bilans des débits massiques cumulés sur un million d'années et des débits massiques maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages ». Il en ressort les observations suivantes :

- les débits massiques maximaux de sélénium et de cyanure, sommés au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, sont respectivement de l'ordre de 7×10^{-5} kg.an^{-1} après 900 000 ans et d'environ 1×10^{-6} kg.an^{-1} après 450 000 ans ;
- en sortie des liaisons surface-fond, les débits massiques maximaux en sélénium et en cyanure sont très inférieurs aux débits massiques maximaux au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, d'un facteur d'environ respectivement 10^{7} pour le sélénium et 10^{10} pour le cyanure ;
- en un million d'années, environ 0,8 % du sélénium total initial[68] et 46 % du cyanure total initial ont atteint les limites (toit + mur) de la couche du Callovo-Oxfordien[69]. Le reste de l'inventaire en ces deux éléments est encore présent dans la couche du Callovo-Oxfordien.

---

66 Compte tenu de leur prépondérance par rapport aux autres substances toxiques chimiques, la présentation détaillée des résultats se focalise sur les deux anions mobiles que sont le sélénium et le cyanure.

67 De façon particulière et pour la situation de référence uniquement, quelques graphes de débits massiques sont présentés avec une limite inférieure fixée à 1×10^{-12} kg.an^{-1}, afin de faire apparaître sur les graphes la courbe de débit massique en sortie des liaisons surface-fond, généralement en-deçà de la limite inférieure initialement retenue (1×10^{-10} kg.an^{-1}).

68 Dans la suite du présent volume, le terme « inventaire total initial » ou « inventaire initial » d'une substance toxique chimique donnée signifie l'inventaire stocké à la fermeture définitive du stockage correspondant au début de la simulation.

69 Les différences de comportement entre le sélénium et le cyanure sont imputables à la différence de mobilité de ces deux substances toxiques chimiques dans la couche du Callovo Oxfordien, notamment à un coefficient de diffusion effectif du sélénium dans le Callovo-Oxfordien deux fois plus faible (comparé à celui du cyanure), à la sorption du sélénium dans le béton de revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL et à la faible limite de solubilité dans la couche du Callovo-Oxfordien pour 97 % de l'inventaire HA en sélénium en situation de référence (forme Se(-II/0) peu soluble).

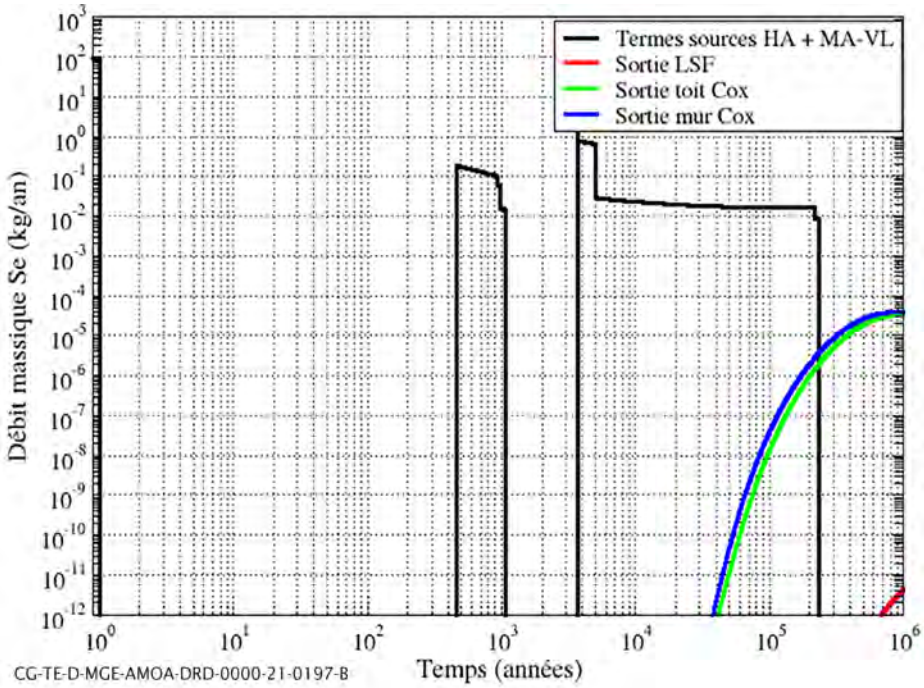
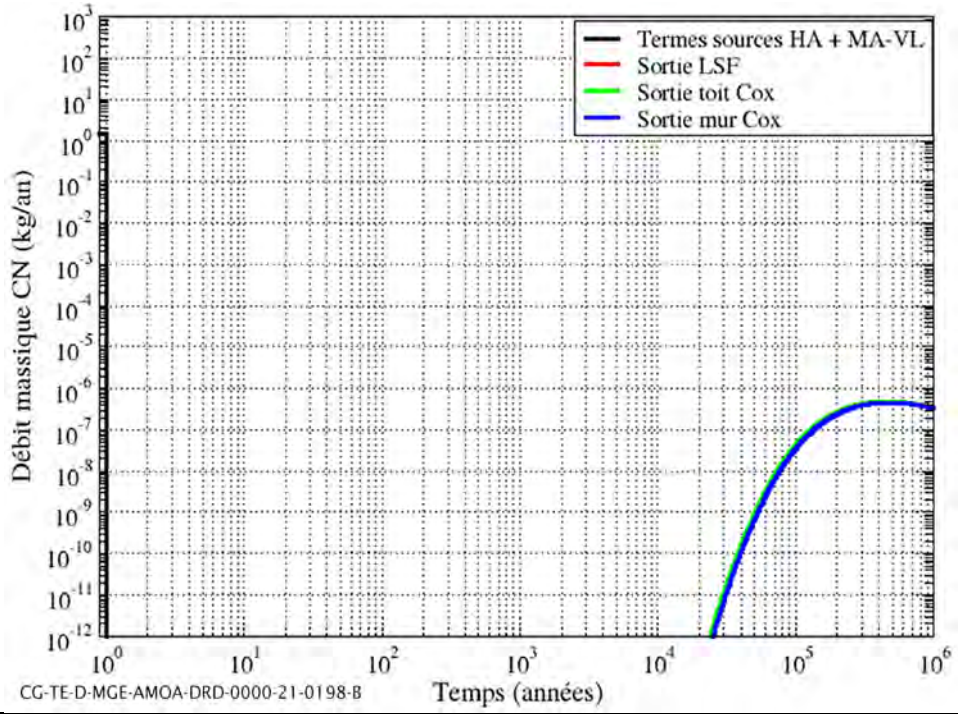
	Situation de référence : Stockage implanté à une profondeur « réaliste » dans le Callovo-Oxfordien
Sélénium	
Cyanure	

Figure 6-22 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits massiques en sélénium (en haut) et cyanure (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)*

Tableau 6-7 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan des débits massiques en sélénium et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages »*

	Sélénium			Cyanure		
	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
Inventaire initial total en kilogrammes HA/MA-VL	4 900 kg[70]			1,5 kg		
Dont HA	98 %			0 %		
Dont MA-VL	2 %			100 %		
Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	0,35 %	35	>1 000	24 %	0,5	450
Dont HA	0,25 %	25	>1 000	s.o.	s.o.	s.o.
Dont MA-VL	0,1 %	10	>1 000	24 %	0,5	450
Par la voie « ouvrages »	<10^{-7} %	4×10^{-6}	>1 000	<10^{-11} %	3×10^{-11}	>1 000
Au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	0,45 %	40	910	23 %	0,45	470
Dont HA	0,35 %	30	850	s.o.	s.o.	s.o.
Dont MA-VL	0,1 %	10	>1 000	23 %	0,45	470

b) L'analyse des débits massiques en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien pour les substances toxiques chimiques présentant un débit massique supérieur à 10^{-10} kg.an^{-1} au toit de la couche du Callovo-Oxfordien

Hormis le sélénium et le cyanure analysés ci-avant, toutes les autres substances toxiques chimiques présentent un débit massique largement inférieur à 10^{-10} kg.an^{-1} en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 6-23), notamment du fait de leur sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien. Favorisant les échanges de masse entre les galeries et la couche du Callovo-Oxfordien, cette sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien atténue également totalement leur transfert selon la voie « ouvrages ».

[70] Conformément à la démarche de constitution des inventaires en substances toxiques chimiques (cf. Volume 3 du présent rapport), la masse indiquée dans les tableaux correspond à la quantité « non margée » déclarée au titre du « déchet » par les producteurs.

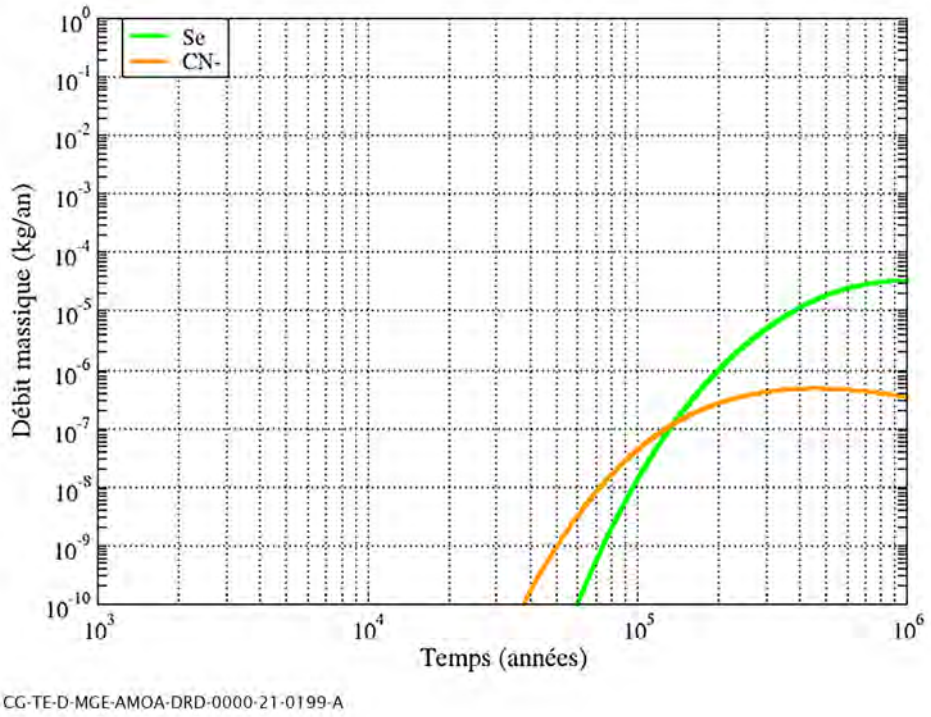


Figure 6-23 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits massiques des principales substances toxiques chimiques au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

6.2.3.2.2 Le transfert des substances toxiques chimiques dans le milieu géologique (des formations encaissantes[71] aux exutoires)

La figure 6-24 présente les débits massiques de sélénium et de cyanure en sortie des principales formations encaissantes.

Le tableau 6-8 compare les débits massiques dans les principales formations encaissantes à l'inventaire total initial pour ces deux éléments.

Il ressort de ces résultats :

- pour la voie de transfert par l'Oxfordien :
  - ✓ une très faible proportion de l'inventaire total initial en sélénium atteint les limites supérieures de l'Oxfordien (environ 0,02 %). Le transfert dans l'Oxfordien permet de bénéficier d'une atténuation d'un ordre de grandeur des débits massiques du sélénium sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ le transfert dans le Kimméridgien permet une atténuation supplémentaire du débit massique d'un facteur 3 et la quantité de sélénium atteignant le Barrois ne représente que 0,004 % de son inventaire total initial ;
  - ✓ les ratios d'atténuation des débits massiques sont similaires pour le cyanure (une atténuation d'un ordre de grandeur pour le transfert dans l'Oxfordien, puis une atténuation supplémentaire d'un facteur 3 pour le transfert dans le Kimméridgien). Sur un million d'années, le transfert dans l'Oxfordien conduit à ce que seulement 1,4 % de l'inventaire total initial en cyanure atteigne les limites supérieures de l'Oxfordien et seulement 0,4 % atteigne le Barrois ;

[71] Comme indiqué au chapitre 4 du présent volume et rappelé au chapitre 5.2.7 du présent volume, bien que n'ayant pas de fonctions de sûreté après fermeture, les formations encaissantes sont toutefois représentées jusqu'aux exutoires afin de permettre la quantification des incidences potentielles sur l'homme.

- pour la voie de transfert par le Dogger :
  - ✓ une très faible proportion de l'inventaire total initial en sélénium et en cyanure, respectivement 0,1 % et 1,3 %, atteint la zone de fracturation diffuse dans le Dogger.

Tableau 6-8 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan des débits massiques en sélénium et en cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, depuis la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux différents exutoires (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial)*

		Sélénium			Cyanure		
		% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
	Inventaire initial total en kilogrammes HA/MA-VL	4 900 kg			1,5 kg		
	Dont HA	98 %			0 %		
	Dont MA-VL	2 %			100 %		
Vers l'exutoire au Barrois	Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	0,35 %	35	>1 000	24 %	0,5	450
	Toit de l'Oxfordien	0,02 %	3	>1 000	1,4 %	0,05	>1 000
	Toit du Kimméridgien	0,004 %	1	>1 000	0,4 %	0,02	>1 000
Vers l'exutoire au Dogger	Au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	0,45 %	40	910	23 %	0,45	470
	Dogger (zone de fracturation diffuse)	0,1 %	10	>1 000	1,3 %	0,06	840

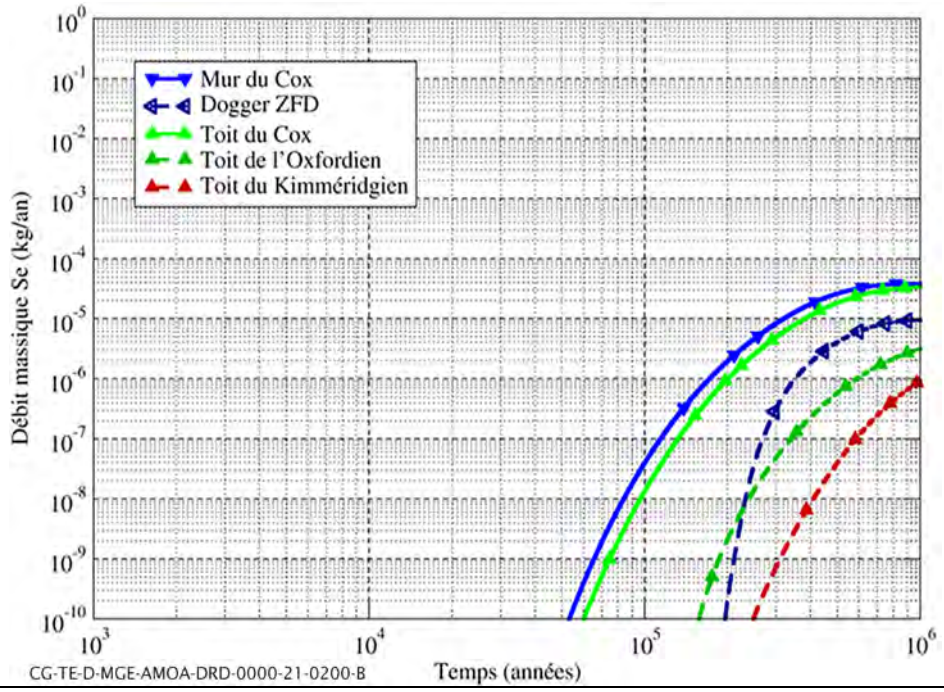
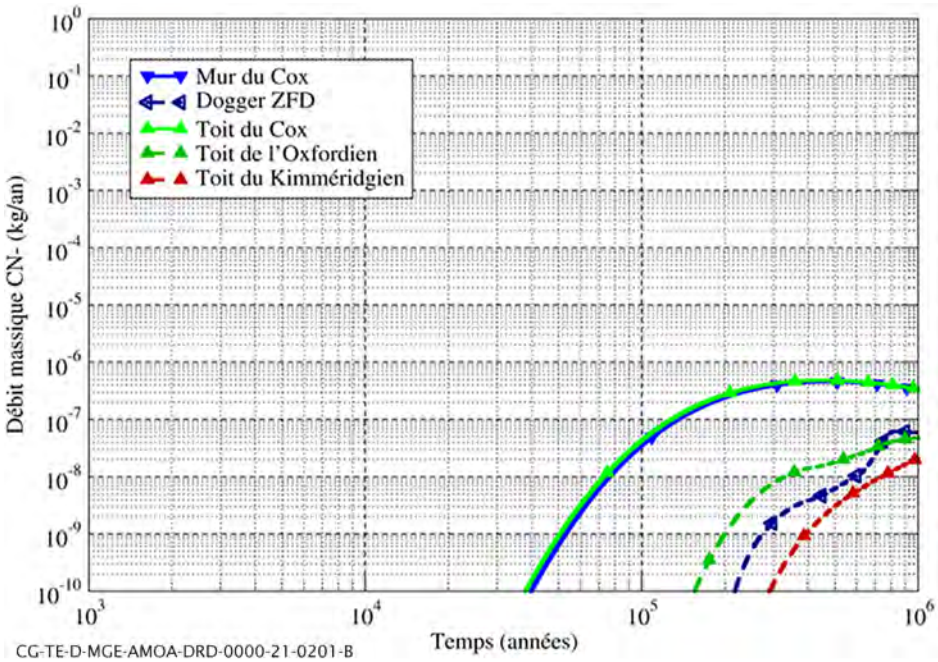
	Situation de référence : Stockage implanté à une profondeur « réaliste » dans le Callovo-Oxfordien
Sélénium	
Cyanure	

Figure 6-24 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits massiques en sélénium (en haut) et cyanure (en bas), depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien, et depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à la zone de fracturation diffuse dans le Dogger*

6.2.4 Les résultats des incidences sanitaires sur l'homme liées au transfert potentiel de substances toxiques chimiques aux exutoires

Conformément à la démarche présentée au chapitre 1.4.2 du présent volume, ce chapitre donne les concentrations en substances toxiques chimiques en sélénium et cyanure aux différents exutoires. Les concentrations maximales peuvent ainsi être comparées aux normes réglementaires de qualité environnementale (NQE) qui correspondent aux concentrations limites de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine indiquées dans l'arrêté du 11 janvier 2007 (63).

La figure 6-25 donne les évolutions de concentration en sélénium et cyanure aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) ». Le tableau 6-9 donne les valeurs maximales de concentration associées et les occurrences de ces maxima.

Les concentrations pour ces deux substances toxiques chimiques sont négligeables, car inférieures de plusieurs ordres de grandeur à leurs NQE respectives. Les valeurs maximales de concentration en sélénium sont en effet de l'ordre de 10^{-5} µg.L-1 à 10^{6} ans pour l'exutoire « Pompage dans le Barrois » et de 2×10^{-4} µg.L^{-1} à 10^{6} ans pour celui dans le Dogger, soit de 5 à 6 ordres de grandeur inférieur à la NQE de 10 µg.L^{-1}. Les concentrations en cyanure sont encore plus faibles (négligeables), en lien notamment avec le faible inventaire dans les colis de déchets (1,5 kg réduit au seul quartier de stockage MA-VL).

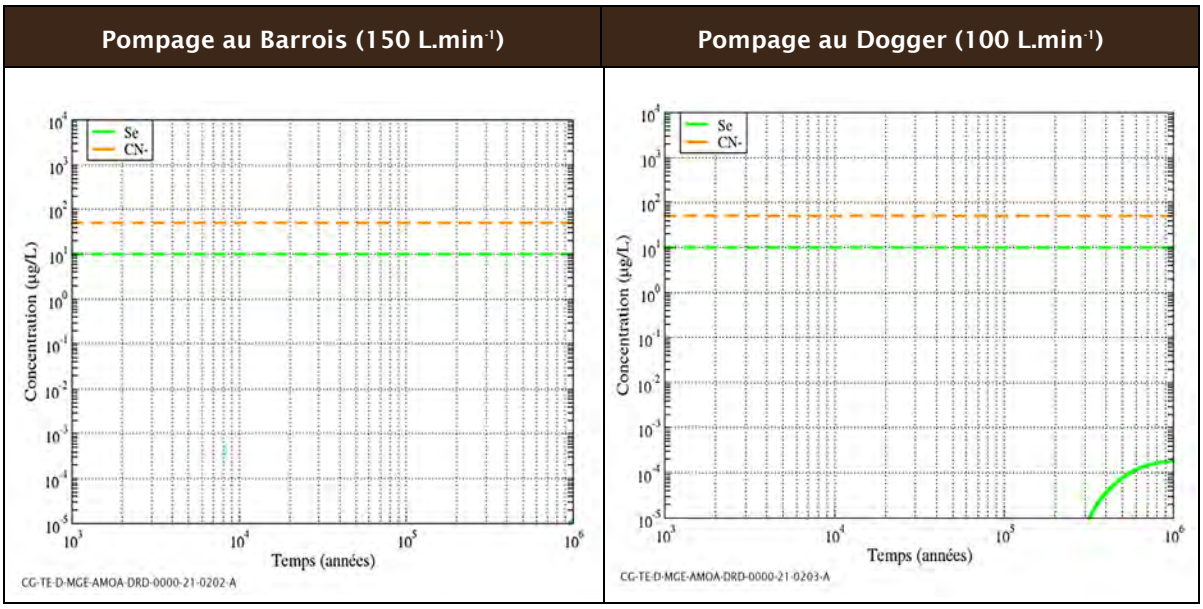


Figure 6-25 *Scénario d'évolution normale - situation de référence : historiques des concentrations en sélénium et en cyanure aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »*

Tableau 6-9 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : concentrations maximales en sélénium et en cyanure et occurrences des concentrations maximales aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »*

		Exutoire Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})		Exutoire Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})	
Toxique chimique	Norme Qualité Environnementale (µg.L^{-1})	Concentration max. (µg.L^{-1})	Date de concentration max. (milliers d'années)	Concentration max. (µg.L^{-1})	Date de concentration max. (milliers d'années)
Se	10	$1,2 \times 10^{-5}$	≥1 000	$1,8 \times 10^{-4}$	≥1 000
CN	50	$2,6 \times 10^{-7}$	≥1 000	$1,2 \times 10^{-6}$	840

6.3 Les résultats des évaluations pour la situation enveloppe

Les résultats présentés dans ce chapitre correspondent aux hypothèses retenues pour la conceptualisation de la situation enveloppe définie au chapitre 5.3 du présent volume et aux valeurs de paramètres associées détaillées dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62).

6.3.1 Les résultats des évaluations de performance relatives aux radionucléides

La présentation des résultats détaillés relatifs au transfert des radionucléides en situation enveloppe du SEN est axée sur les principaux radionucléides mobiles, à savoir les trois principaux anions (iode 129, chlore 36 et sélénium 79). Il s'agit en effet des trois principaux radionucléides présentant un débit molaire en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien (toit ou mur) supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1} (limite inférieure des graphes de débits molaires) sur la période de simulation pour cette situation (cf. Figure 6-31 et figure 6-37 des chapitres 6.3.1.3.1 et 6.3.1.3.4 du présent volume).

6.3.1.1 Les résultats vis-à-vis de la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau »

La figure 6-26 présente le champ de charges hydrauliques dans un plan 2D traversant les ouvrages de stockage en situation enveloppe avec une garde supérieure de couche de Callovo-Oxfordien de 50 mètres.

De même que pour la situation de référence, le champ de charges hydrauliques dans la couche du Callovo-Oxfordien est relativement peu perturbé par le drain hydraulique que constitue l'installation souterraine, notamment les liaisons surface-fond. Ceci est notamment dû :

- aux conditions hydrauliques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien (faibles perméabilités) qui limitent les capacités de drainage par les ouvrages souterrains ;
- à la performance des scellements, en particulier des scellements des liaisons surface-fond (absence de zone de fracturation connectée, uniquement zone à fracturation diffuse de perméabilité 10^{-11} m.s^{-1}) et en particulier à l'efficacité des noyaux de scellement qui « isolent » hydrauliquement les ouvrages souterrains des formations sus-jacentes ;

- aux dispositions de conception de l'architecture, détaillées au chapitre 5.1.4 du présent volume (architecture globalement « borgne », regroupement des liaisons surface-fond, grand élancement des alvéoles de stockage). Les phénomènes convectifs au sein des ouvrages y sont donc extrêmement limités. Les conditions de transfert dans le stockage restent diffusives.

Les vitesses d'écoulement de l'eau au sein des ouvrages (notamment dans le revêtement-soutènement laissé en place) sont de l'ordre de 1 mm.an^{-1} dans les galeries de liaison de la zone HA (orientés selon le gradient de l'Oxfordien, vers le nord, et non vers la zone centrale contenant les liaisons surface-fond), et 2 mm.an^{-1} à la sortie du quartier de stockage MA-VL. Les vitesses d'écoulement dans les galeries remblayées à la sortie du quartier de stockage MA-VL peuvent atteindre de l'ordre de 70 à 80 mm.an^{-1} dans la zone d'interface considérée plus perméable à l'extrados des voussoirs, mais sont plus faibles de plusieurs ordres de grandeur dans le remblai des galeries considéré moins perméable.

Comme en situation de référence, du fait d'une position « amont hydraulique » du quartier de stockage MA-VL par rapport aux liaisons surface-fond, vis-à-vis des écoulements horizontaux dans l'Oxfordien, l'essentiel de l'eau drainée par les liaisons surface-fond provient du quartier de stockage MA-VL. La contribution hydraulique des quartiers HA est très faible, du fait des faibles gradients ascendants et de la position « aval hydraulique » de ces quartiers vis-à-vis des écoulements horizontaux dans l'Oxfordien.

Le débit d'eau sortant de l'ensemble des liaisons surface-fond est de l'ordre de 300 litres par an, ce qui reste très faible, bien que 300 fois le débit d'eau obtenu en situation de référence (cf. Chapitre 6.2.1.1 du présent volume), confortant ainsi l'efficacité des scellements.

L'ensemble de ces résultats illustre que la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau » est satisfaite en situation enveloppe du SEN.

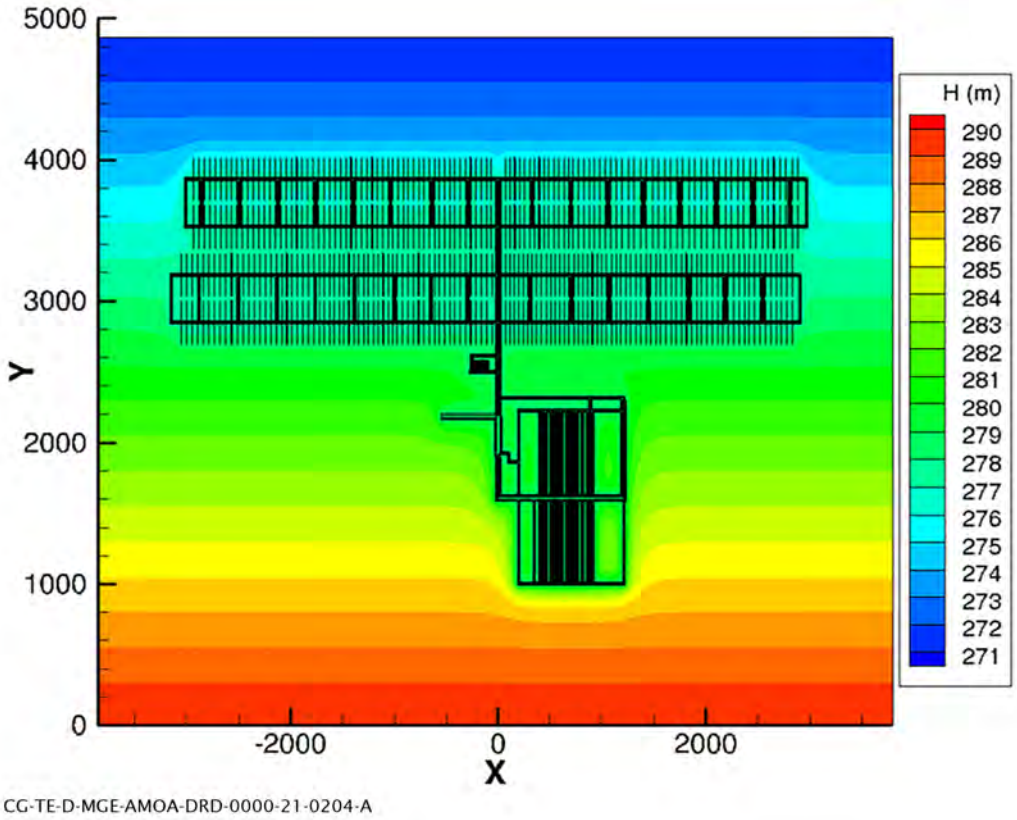


Figure 6-26 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage (quartiers pilote HA et de stockage HA (en haut) et quartier de stockage MA-VL (en bas))*

6.3.1.2 Les résultats vis-à-vis de la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »

6.3.1.2.1 Le relâchement des radionucléides dans les alvéoles de stockage HA

Les termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans les alvéoles de stockage HA (colis de déchets HA0, colis de déchets HA1 et HA2) en situation enveloppe, représentés sous forme de débits molaires en fonction du temps, sont présentés en figure 6-27 pour le quartier pilote HA et en figure 6-28 pour le quartier de stockage HA. Après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage HA[72], l'application du modèle de relâchement « V_0.S » et des valeurs de paramètres associées à ce modèle en situation enveloppe du SEN (valeurs conservatives) aboutit à une durée globale de relâchement d'environ 9 000 ans pour les colis de déchets HA0 du quartier pilote HA et 2 000 ans pour les colis de déchets HA du quartier de stockage HA.

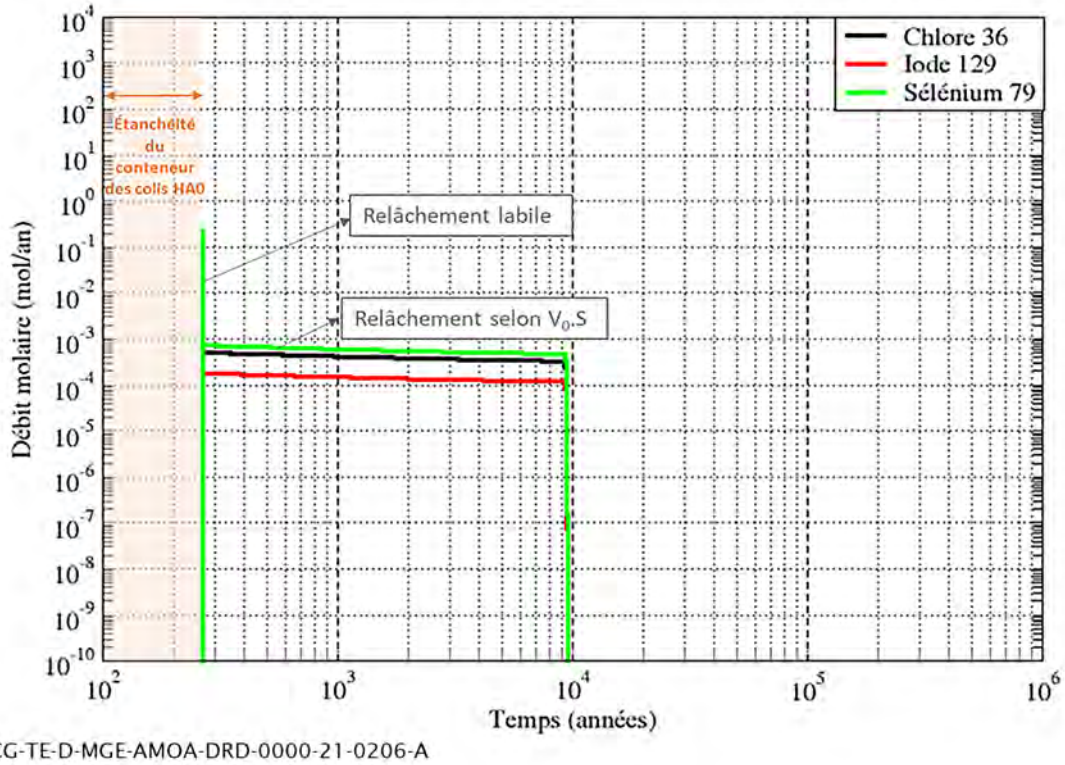


Figure 6-27 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier pilote HA*

[72] Évaluée à 400 ans après mise en stockage pour les colis HA0 stockés dans le quartier pilote HA, 500 ans après mise en stockage pour les colis HA1/HA2 stockés dans le quartier de stockage HA et à 350 ans après mise en stockage pour certains colis intercalaires HA0 et MA-VL stockés dans le quartier de stockage HA (cf. Figure 5-41 du chapitre 5.3.3.1.2 du présent volume).

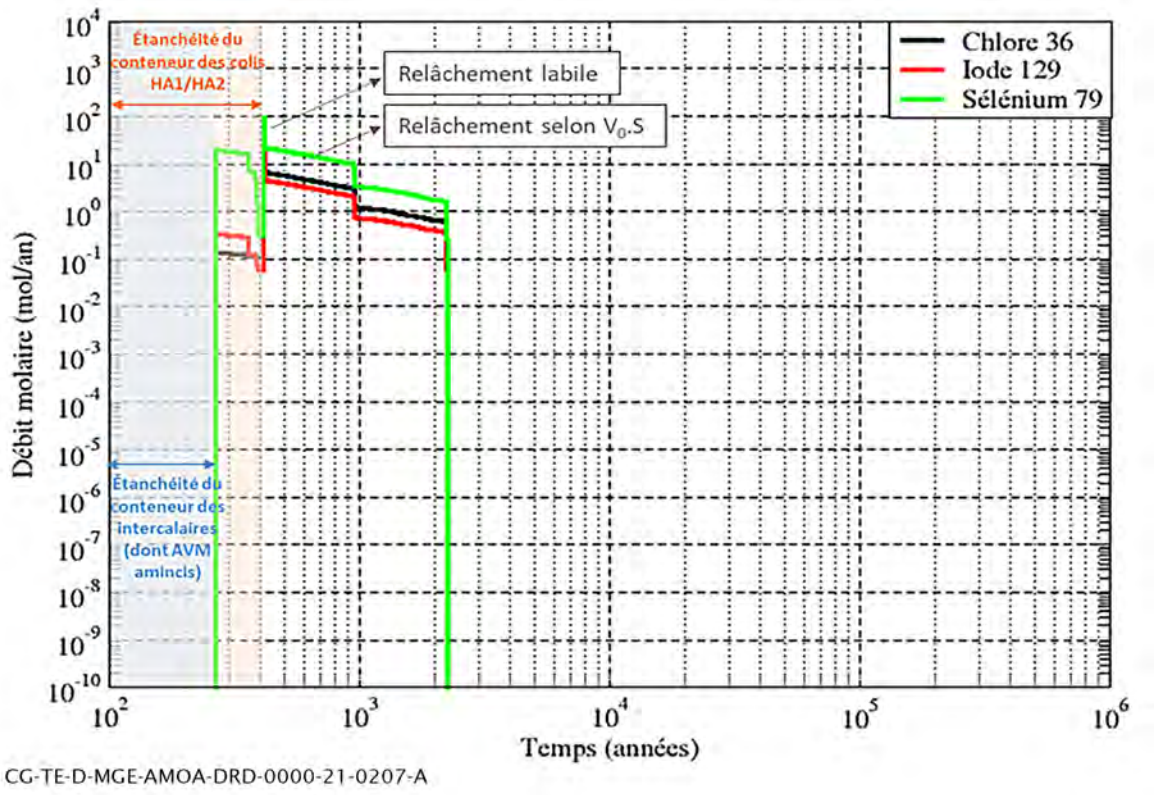


Figure 6-28 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier de stockage HA*

6.3.1.2.2 Le relâchement des radionucléides dans les alvéoles de stockage MA-VL

La figure 6-29 présente les termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL en situation enveloppe.

La majeure partie de l'inventaire MA-VL en principaux radionucléides mobiles (99,8 % de la quantité totale d'iode 129, 91,5 % de celle en chlore 36 et 99,9 % de celle en sélénium 79) est relâchée sous forme labile. L'augmentation des quantités labiles par rapport à celles de la situation de référence (cf. Chapitre 6.2.1.2.2 du présent volume) est notamment liée au fait que le modèle COLONBO associé aux colis de déchets bitumés n'est pas appliqué pour la situation enveloppe, et qu'en conséquence, les quantités correspondantes ne sont donc plus relâchées sur 1 000 ans (modèle COLONBO), mais sur un an (relâchement labile).

Pour le reste de l'inventaire radiologique des colis de déchets MA-VL, le palier principal jusqu'à environ 15 000 ans est similaire à celui de la situation de référence et regroupe le relâchement des inventaires des coques et embouts en zirconium, des alliages de zirconium-niobium et des alliages de nickel. Enfin, de même qu'en situation de référence, le terme source est physiquement épuisé après 75 000 ans, c'est-à-dire après la dégradation des aciers inoxydables.

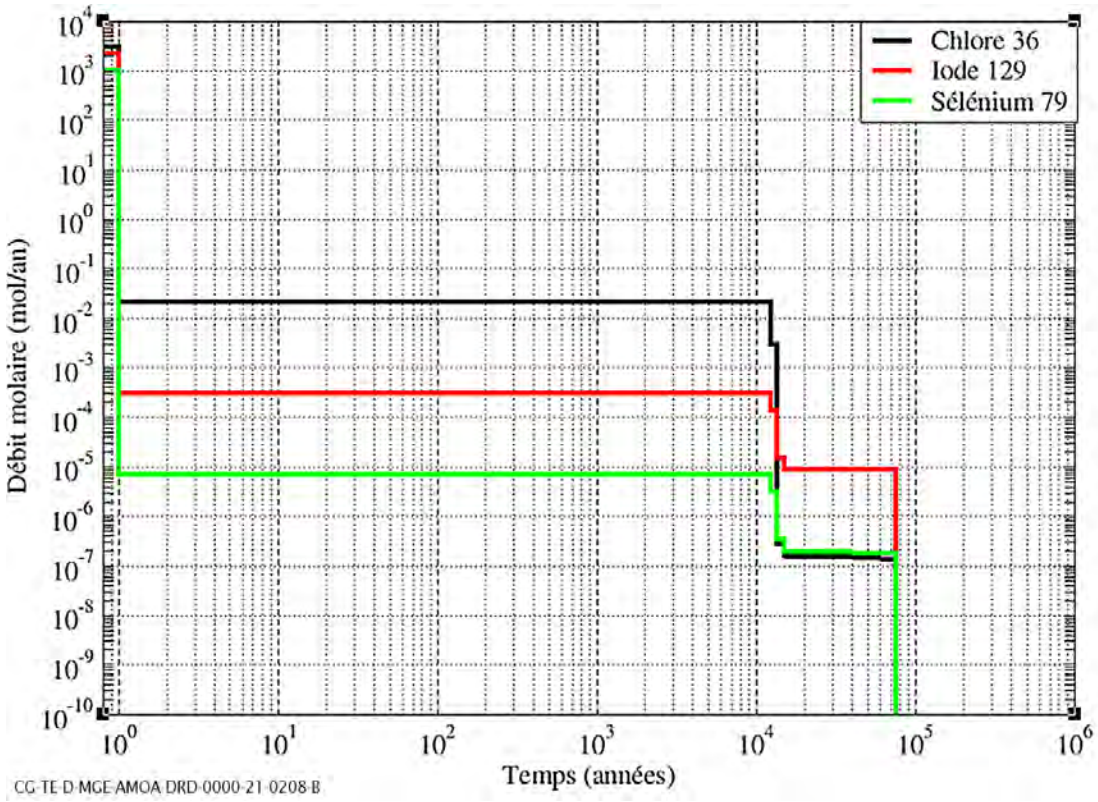


Figure 6-29 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL*

6.3.1.3 Les résultats vis-à-vis de la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques »

6.3.1.3.1 Le transfert des radionucléides dans les composants ouvragés et naturels du système de stockage - Cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien

a) L'analyse des débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79

La figure 6-30 présente l'évolution des débits molaires en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79 au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Le tableau 6-10 présente les bilans des débits molaires cumulés sur un million d'années et des débits molaires maximaux, respectivement par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages ». Il en ressort les observations suivantes :

- en un million d'années, 61 % de l'inventaire total initial en iode 129, 36 % de celui en chlore 36 et 22 % de celui en sélénium 79 ont atteint les limites (toit + mur) de la couche du Callovo-Oxfordien. Le reste de l'inventaire en ces trois radionucléides est encore présent dans la couche du Callovo-Oxfordien ou a disparu par décroissance radioactive. Les différences obtenues sont dues aux périodes respectives du chlore 36 et du sélénium 79, qui permettent de bénéficier d'une décroissance radioactive supérieure à celle de l'iode 129, ainsi qu'à la sorption du sélénium dans le béton de revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL et au coefficient de diffusion du sélénium dans la couche du Callovo-Oxfordien, deux fois plus faible que celui du chlore 36 ;

- les comportements de l'iode 129 et du sélénium 79 présentent de nombreuses similitudes. Par exemple, les débits molaires traversant le Callovo-Oxfordien atteignent leur maximum après environ 200 000 ans, soit plus tardivement que pour le chlore 36 (débit molaire maximum atteint à environ 100 000 ans). Cette similitude s'explique notamment par le fait que les paramètres de transfert de ces deux radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien sont similaires, en particulier un coefficient de diffusion effectif du même ordre (6×10^{-12} $m^2.s^{-1}$ pour l'iode et 5×10^{-12} $m^2.s^{-1}$ pour le sélénium) et environ deux fois inférieur à celui du chlore (1×10^{-11} $m^2.s^{-1}$) ;
- le débit molaire maximum de l'iode 129 par la voie ouvrages est environ 150 fois inférieur à celui de l'iode 129 transitant par le Callovo-Oxfordien. Ce rapport est d'au moins 5 000 pour le chlore 36 et d'au moins 10 000 pour le sélénium 79. En effet, outre la décroissance radioactive de ces deux radionucléides, la rétention du sélénium dans le béton de revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL, ainsi que la distribution des inventaires MA-VL effectuée sur la base du radionucléide « pilote » (l'iode 129), contribuent à la réduction de leur débit molaire par la voie ouvrages ;
- lorsque le stockage est représenté avec une garde supérieure de 50 mètres et un gradient de charge favorable aux transferts ascendants (« stockage haut »), les débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (maximum d'environ 1×10^{-3} $mol.an^{-1}$) sont moins importants que ceux au toit et atteignent leur maximum plus tard (après environ 200 000 ans pour le chlore 36 et 400 000 ans pour l'iode 129 et le sélénium 79). Les niveaux de débits molaires au mur sont comparables à ceux obtenus en situation de référence ;
- les conditions de transfert sont à diffusion dominante au niveau des gardes inférieure et supérieure de Callovo-Oxfordien. Plus précisément, le rapport entre les flux par convection et par diffusion, calculé à l'échelle de la garde supérieure de Callovo-Oxfordien, est inférieur à 0,2. La différence entre les débits molaires au toit et au mur de la couche de Callovo-Oxfordien avec un « stockage haut » est liée à la différence d'épaisseur entre la garde supérieure qui correspond à l'exigence de 50 mètres et la garde inférieure de Callovo-Oxfordien d'environ 70 mètres en moyenne ;
- par rapport à la situation de référence, les quantités cumulées sur un million d'années des trois principaux radionucléides mobiles qui atteignent les formations encaissantes supérieures, sont environ quatre fois plus importantes pour l'iode 129 et le chlore 36, 100 fois plus importante pour le sélénium 79, et les débits molaires sont respectivement 4 à 8 fois plus importants pour l'iode 129 et le chlore 36, et plus de 100 fois plus importants pour le sélénium 79. Ces différences sont notamment dues aux hypothèses respectives des situations enveloppe et de référence (respectivement des gardes de 50 mètres, et de 60 mètres à 70 mètres selon les quartiers de stockage, et des propriétés de diffusion des anions considérées deux fois moins favorables en situation enveloppe).

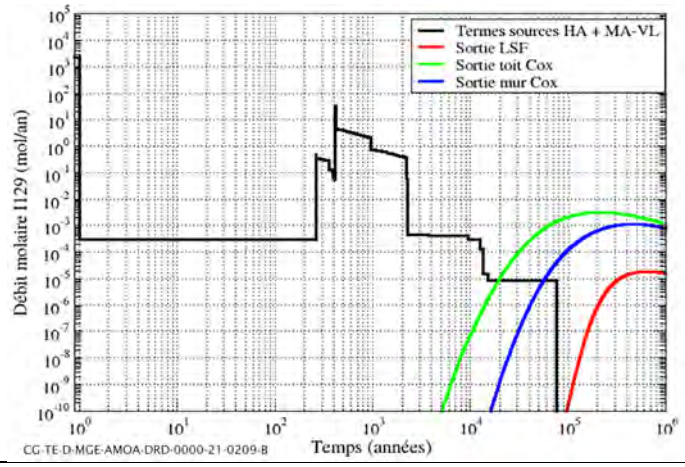
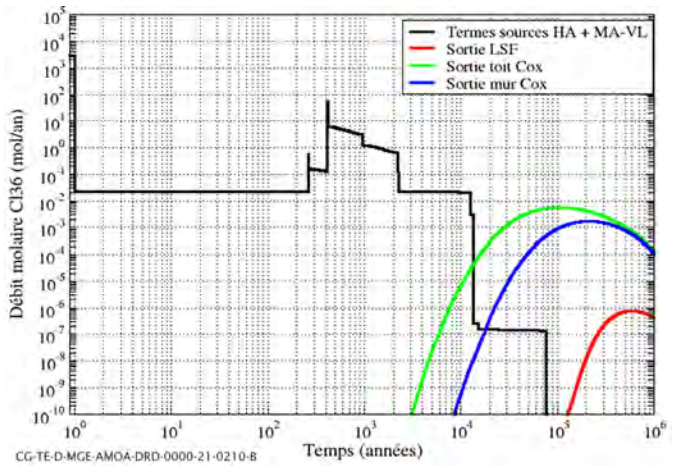
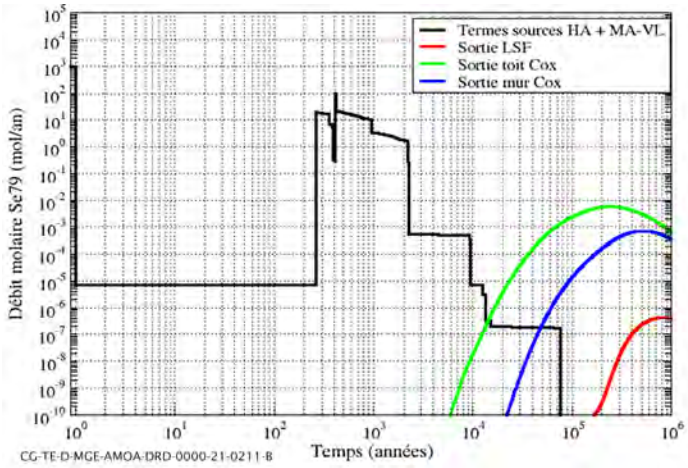
	Situation enveloppe : « Stockage haut » implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien
Iode 129	
Chlore 36	
Sélénium 79	

Figure 6-30 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)*

Tableau 6-10 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages »*

	Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
Inventaire initial total en moles HA/MA-VL	4 600 moles			6 800 moles			13 900 moles		
Dont HA	52 %			53 %			93 %		
Dont MA-VL	48 %			47 %			7 %		
Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	42,6 %	3 200	210	25,1 %	5 700	110	19,2 %	5 800	240
Dont HA	26,3 %	2 400	170	16,6 %	4 600	90	18,5 %	5 600	240
Dont MA-VL	16,2 %	1 100	330	8,5 %	1 600	170	0,7 %	180	310
Par la voie « ouvrages »	0,25 %	20	630	0,006 %	0,8	590	0,002 %	0,4	810
Dont HA	$<10^{-5}$ %	$2,5 \times 10^{-4}$	>1 000	$<10^{-5}$ %	3×10^{-4}	460	$\sim 10^{-6}$ %	2×10^{-4}	500
Dont MA-VL	0,25 %	20	630	0,006 %	0,8	590	0,002 %	0,4	810
Au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	18,0 %	1 100	450	10,7 %	1 700	210	3,1 %	710	520
Dont HA	7,1 %	500	570	4,3 %	670	270	2,7 %	630	540
Dont MA-VL	10,9 %	700	360	6,4 %	1 100	180	0,4 %	110	330

b) L'analyse des débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien pour les radionucléides présentant un débit molaire supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1} au toit de la couche du Callovo-Oxfordien

La figure 6-31 présente l'évolution des débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien des radionucléides présentant un débit molaire supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1}, pour une implantation du stockage à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien.

Outre les radionucléides mobiles analysés ci-avant (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), les radionucléides présentant un débit molaire supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1} (limite inférieure des graphes de débit molaire définie au chapitre 5.4 du présent volume) au toit de la couche du Callovo-Oxfordien en situation enveloppe (implantation du stockage à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien) sont les suivants :

- le calcium 41 et le potassium 40, considérés comme faiblement sorbés dans les ouvrages cimentaires des alvéoles MA-VL et dans la couche du Callovo-Oxfordien ; leur fort inventaire initial conduit à des débits molaires maximaux supérieurs à 10^{-4} mol.an^{-1}, entre 100 000 ans et 300 000 ans ;
- le carbone 14 (forme organique) et le molybdène 93, qui, malgré leur faible période, ont un inventaire radiologique initial suffisamment élevé pour conduire à des débits molaires respectivement d'environ 2×10^{-7} mol.an^{-1} et 10^{-8} mol.an^{-1} au toit de la couche du Callovo-Oxfordien. L'approche retenue pour le carbone 14 indiquée dans le document « Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage » (57) est très conservative[73]. Les débits molaires du carbone 14 et du molybdène 93 sont cependant à relativiser puisqu'à 100 000 ans, seulement 3×10^{-5} % à 4×10^{-5} % de leur inventaire total initial (HA + MA-VL) a atteint le toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- le rubidium 87 et le césium 135, compte tenu des coefficients de partage conservatifs retenus dans la couche du Callovo-Oxfordien : à un million d'années, les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien sont d'environ $7{,}5 \times 10^{-3}$ mol.an^{-1} pour le rubidium 87 et $1{,}5 \times 10^{-3}$ mol.an^{-1} pour césium 135, et environ 0,3 % de l'inventaire total initial en rubidium 87 et 0,05 % de celui en césium 135 ont atteint le toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les isotopes de l'uranium (uranium 238, uranium 235, uranium 236, puis uranium 233 et uranium 234 dans une moindre mesure), compte tenu des coefficients de partage conservatifs retenus dans la couche du Callovo-Oxfordien : à un million d'années, seulement de l'ordre de 2×10^{-4} % de l'inventaire total initial en chaque isotope de l'uranium a atteint le toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- le manganèse 53 et le fer 60, relativement peu sorbés dans la couche du Callovo-Oxfordien et non sorbés dans les ouvrages cimentaires des alvéoles MA-VL ; leur inventaire total initial et leur période longue conduisent à des débits molaires respectifs d'environ 5×10^{-6} mol.an^{-1} et 3×10^{-7} mol.an^{-1} (plus faibles que ceux des principaux isotopes de l'uranium), et à des occurrences très tardives également ;
- dans une moindre mesure, le radium 226, le protactinium 231 et le thorium 232.

Sur la durée de simulation retenue, tous les autres radionucléides présentent un débit molaire inférieur à 10^{-10} mol.an^{-1} au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, soit du fait de leur période, très inférieure au temps de transfert, soit du fait de leur sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien.

[73] La représentation du comportement du carbone 14 retenue est très conservative : 100 % de son inventaire est considéré sous forme organique, sans sorption et soluble dans les composants cimentaires et le Callovo-Oxfordien, avec un coefficient de diffusion majorant.

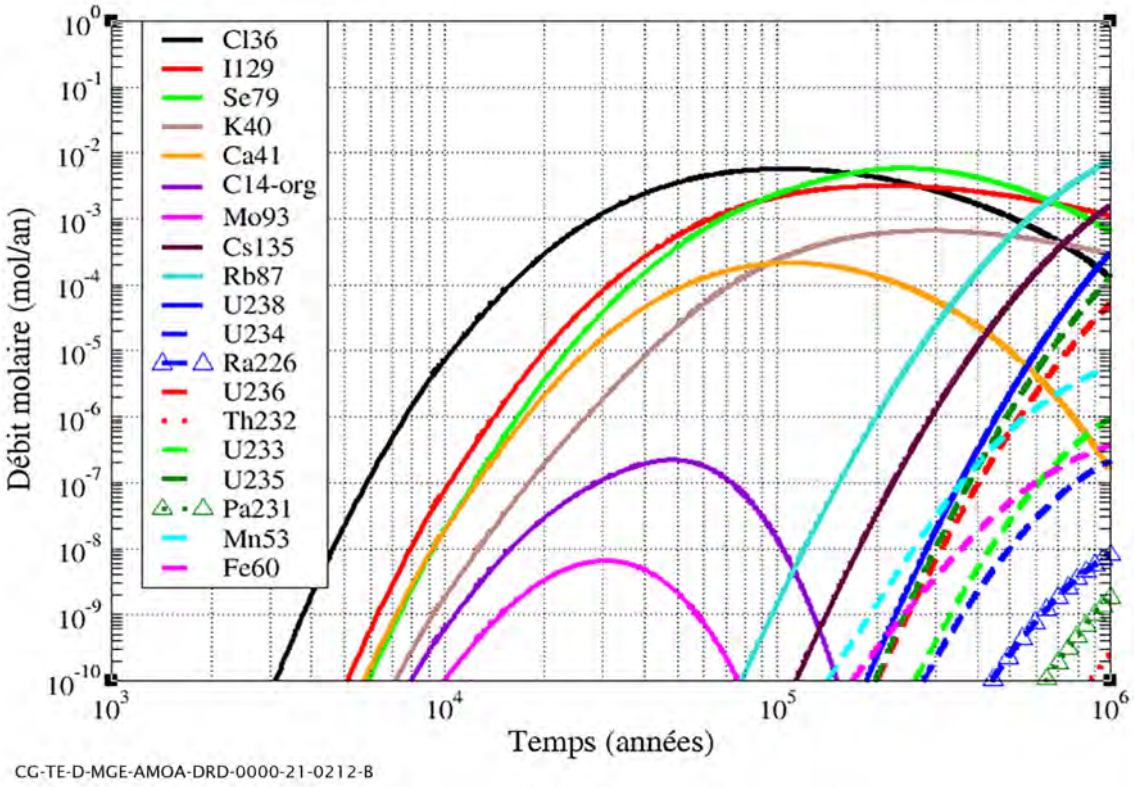


Figure 6-31 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : historiques des débits molaires des principaux radionucléides au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

Dans le cas particulier du sélénium 79, la figure 6-32 précise les contributions de chacune des deux formes chimiques du sélénium (Se(+VI) et Se(-II/0)) au débit molaire total de sélénium 79 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien (position haute du stockage), avec une répartition selon les quartiers de stockage :

- pour le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA, 20 % de l'inventaire sous forme Se(+VI) soluble, et 80 % sous forme Se(-II/0) avec une limite de solubilité élevée (cf. Document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62)) ;
- pour le quartier de stockage MA-VL, 100 % de l'inventaire sous forme Se(+VI) soluble.

La forme chimique réduite Se(-II/0) correspondant à 80 % de l'inventaire HA (hypothèse retenue pour la situation enveloppe), contrôle le débit molaire total du sélénium 79, du fait d'une limite de solubilité 500 fois plus élevée (10^{-6} mol.L^{-1}) qu'en situation de référence, devant la contribution des 20 % de l'inventaire HA Se(+VI). La part correspondant à l'intégralité de l'inventaire MA-VL Se(+VI) est inférieure d'au moins un ordre de grandeur et contribue peu au débit molaire total du sélénium 79.

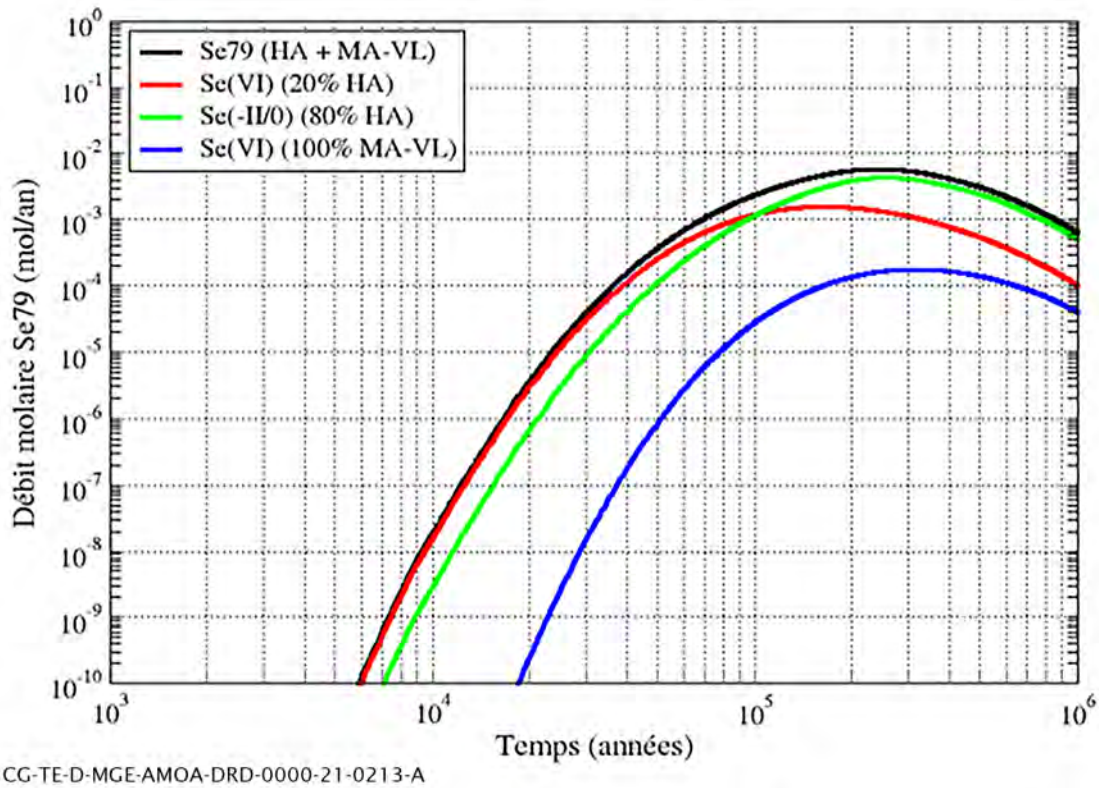


Figure 6-32 *Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : détail des contributions (Se(+VI) HA, Se(-II/0) HA, Se(+VI) MA-VL) à l'historique de débit molaire du sélénium 79 au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

c) L'analyse du transfert de l'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79, issus des zones HA et MA-VL

La figure 6-33 donne l'évolution des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 relâchés par les colis HA et MA-VL et migrant par le Callovo-Oxfordien et par la voie ouvrages. Les débits molaires sont déterminés au niveau des galeries d'accès (zone HA), des galeries de liaison, de la zone centrale et de la sortie des liaisons surface-fond.

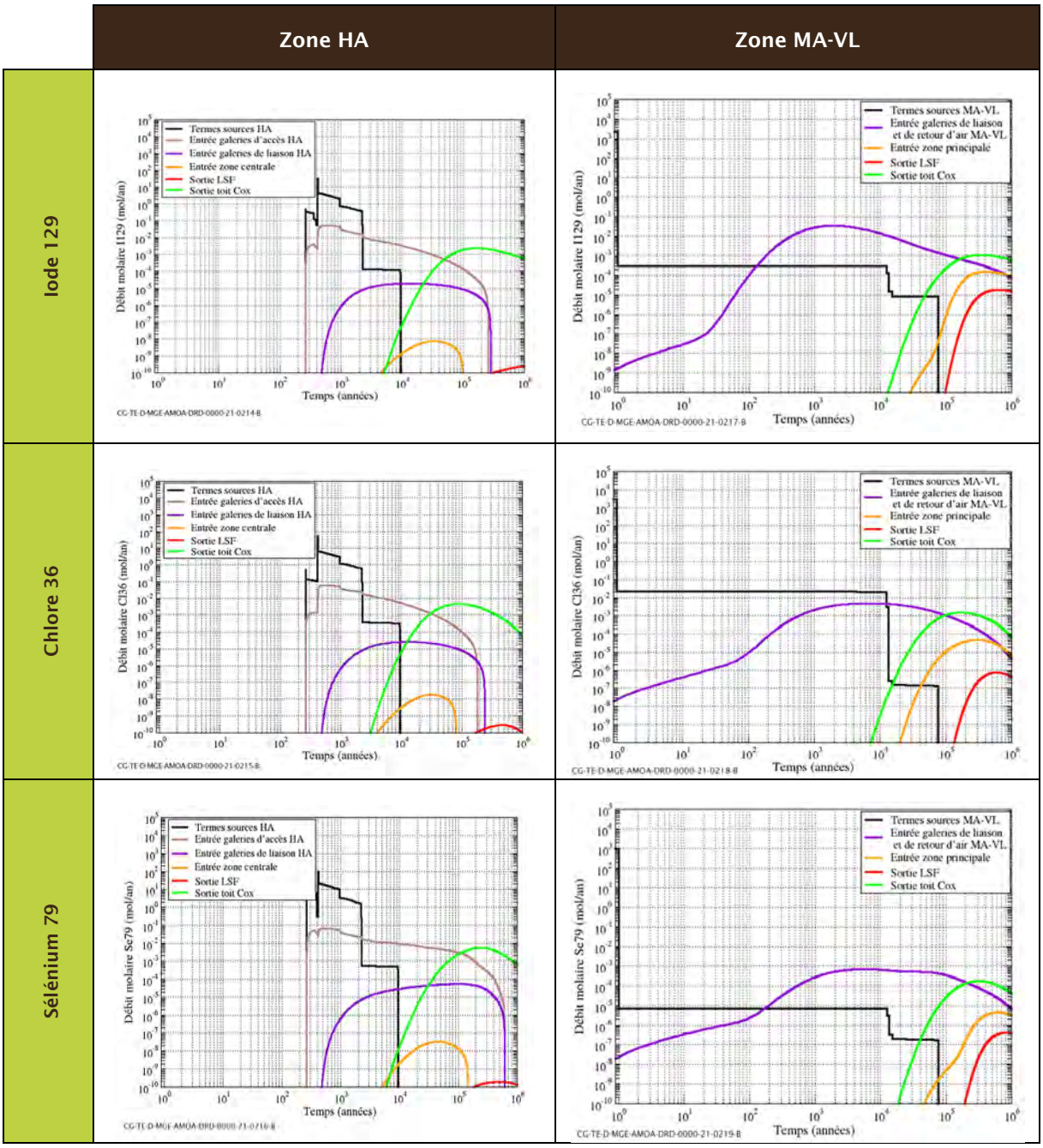


Figure 6-33 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), quartiers de stockage HA (à gauche) et quartier de stockage MA-VL (à droite) : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), en chlore 36 (au milieu) et en sélénium 79 (en bas), entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit)*

Les graphes de la figure 6-33 et le tableau 6-11 mettent en évidence les points suivants :

- en situation enveloppe, les relâchements de l'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79 interviennent plus tôt qu'en situation de référence :
  - ✓ entre 300 ans et 10 000 ans dans la zone HA ;
  - ✓ avant 80 000 ans dans la zone MA-VL ;
- les débits molaires des radionucléides transitant par la voie ouvrages sont significativement plus importants pour la zone MA-VL que pour la zone HA. Cet écart est principalement dû au moteur hydraulique plus important qu'en situation de référence, et à l'orientation des écoulements dans l'installation souterraine, plus favorable aux transferts depuis le quartier de stockage MA-VL vers la zone centrale ;
- dans la zone HA, les débits molaires en iode 129 et en chlore 36 par la voie ouvrages diminuent brutalement, après environ 200 000 ans ou 300 000 ans en entrée de galerie d'accès et en entrée de galerie de liaison et 100 000 ans en entrée de zone centrale. Cette évolution est due aux écoulements lents orientés vers la zone HA. Aux dates identifiées ci-dessus, les flux convectifs vers la zone HA contrebalancent les flux diffusifs.

Le tableau 6-11 donne le bilan des débits molaires en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79, cumulés sur un million d'années en différents endroits au long de la voie « ouvrages » et en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien. Ces débits molaires cumulés, normés par rapport à l'inventaire total initial respectif des quartiers de stockage HA et du quartier de stockage MA-VL, conduisent aux observations suivantes :

- dans la zone HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA), moins de 7 % de l'inventaire initial en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79 atteignent les galeries d'accès, la majorité de l'inventaire diffusant à travers le Callovo-Oxfordien. Cette fraction est faible grâce à la longueur hectométrique des alvéoles HA et au régime hydraulique faible. Le transfert lent au long des galeries d'accès permet également aux radionucléides de traverser le revêtement et de diffuser dans la couche du Callovo-Oxfordien. Ainsi, au plus 0,1 % de l'inventaire initial en iode 129, chlore 36 ou sélénium 79, atteignent les galeries de liaison et le débit molaire maximal est atténué de deux ordres de grandeur. Seulement 0,00002 % de l'inventaire initial en iode 129, chlore 36 ou sélénium 79, atteignent la zone centrale, avec une atténuation supplémentaire de trois ordres de grandeur. *In fine*, une très faible fraction des inventaires en iode 129, chlore 36 ou sélénium 79 (moins de 0,00001 %), sortent des liaisons surface-fond, avec une atténuation de deux ordres de grandeur supplémentaire. Le débit molaire maximal est alors d'au moins six ordres de grandeur inférieur au débit molaire des radionucléides qui traversent le Callovo-Oxfordien ;
- dans le quartier de stockage MA-VL, 34 % de l'inventaire initial en iode 129, 12 % de celui en chlore 36 et 11 % de celui en sélénium 79 atteignent les galeries de liaison. Ces proportions tombent à 4,7 %, 0,8 % et 0,3 % respectivement en entrée de la zone centrale, avec une atténuation de deux ordres de grandeur du débit molaire maximal. La cinétique lente des écoulements dans les galeries de liaison et le transfert vers le Callovo-Oxfordien permettent de limiter à 0,5 % et 0,02 % les fractions d'iode 129 de chlore 36 et de sélénium 79 qui sortent des liaisons surface-fond, avec une atténuation supplémentaire des débits molaires maximaux d'au moins un ordre de grandeur. Le débit molaire maximal est alors d'environ deux à trois ordres de grandeur inférieur au débit molaire des radionucléides qui migrent par le Callovo-Oxfordien.

Tableau 6-11 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : bilan des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (cumulés sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial respectif des quartiers de stockage HA et du quartier de stockage MA-VL) entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit)*

Débit cumulé en % de l'inventaire total initial de la zone HA	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone centrale	Sortie des liaisons surface-fond	Sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien
Iode 129	6,8 %	0,08 %	~2 × 10^{-5} %	~5 × 10^{-6} %	50,7 %
Chlore 36	6,2 %	0,06 %	~2 × 10^{-5} %	~5 × 10^{-6} %	31,4 %
Sélénium 79	6,4 %	0,1 %	<2 × 10^{-5} %	~10^{-6} %	19,9 %
Débit cumulé en % de l'inventaire total initial du quartier de stockage MA-VL	**Entrée dans les galeries de liaison/accès et de retour d'air**		**Entrée dans la zone centrale**	**Sortie des liaisons surface-fond**	**Sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien**
Iode 129	33,6 %		4,7 %	0,5 %	33,8 %
Chlore 36	11,5 %		0,8 %	<0,015 %	18,0 %
Sélénium 79	10,7 %		0,3 %	0,02 %	10,3 %

6.3.1.3.2 Le transfert des radionucléides dans le milieu géologique (des formations encaissantes[74] aux exutoires) - Cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts ascendants verticaux des solutés vers le Barrois (cas 1)

Pour mémoire, le cas 1[75] désigne une configuration maximisant les transferts ascendants verticaux des solutés vers le Barrois sur la base d'un transfert « enveloppe » dans les formations marneuses de l'Oxfordien et du Kimméridgien.

La figure 6-34 présente les débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, de l'Oxfordien, puis du Kimméridgien à l'exutoire du Barrois.

Le tableau 6-12 compare les débits molaires dans ces formations encaissantes à l'inventaire total initial pour chaque radionucléide.

Les écoulements lents dans l'Oxfordien calcaire permettent l'atténuation et la rétrodiffusion des radionucléides vers le Callovo-Oxfordien. Le transfert dans l'Oxfordien permet ainsi l'atténuation des

[74] Comme indiqué au chapitre 4 du présent volume et rappelé au chapitre 5.2.7 du présent volume, bien que n'ayant pas de fonctions de sûreté après fermeture, les formations encaissantes sont toutefois représentées jusqu'aux exutoires afin de permettre la quantification des incidences potentielles sur l'homme.
[75] Configuration illustrée à la figure 5-48 du chapitre 5.3.7 du présent volume.

débits molaires maximaux au toit de la couche du Callovo-Oxfordien d'un facteur 3 pour l'iode 129, d'un facteur 8 pour le chlore 36 et d'un facteur 6 pour le sélénium 79, avec une date d'occurrence du débit molaire maximum après environ 800 000 ans pour l'iode 129, 300 000 ans pour le chlore 36 et 450 000 ans pour le sélénium 79. Les proportions de l'inventaire total initial en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79, qui atteignent les calcaires du Barrois, sont d'environ 11 % pour l'iode 129, 4 % pour le chlore 36 et 3 % pour le sélénium 79. Contrairement à la situation de référence, l'atténuation obtenue lors de la traversée du Kimméridgien est très limitée, du fait des paramètres de transfert conservatifs retenus dans l'Oxfordien et le Kimméridgien.

Tableau 6-12 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Barrois (cas 1)*** *: bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à l'exutoire Barrois (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial)*

	Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
Inventaire initial total en moles HA/MA-VL	4 600 moles			6 800 moles			13 900 moles		
Dont HA	52 %			53 %			93 %		
Dont MA-VL	48 %			47 %			7 %		
Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	42,6 %	3 200	210	25,1 %	5 700	110	19,2 %	5 800	240
Toit de l'Oxfordien	14,4 %	940	790	5,6 %	690	310	4,4 %	950	470
Toit du Kimméridgien	11,0 %	880	960	3,8 %	450	440	2,9 %	680	600

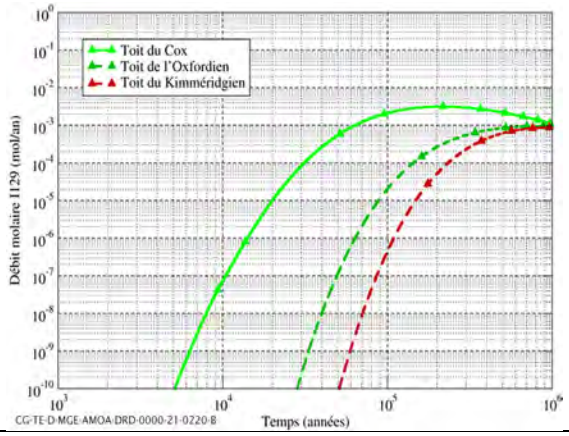
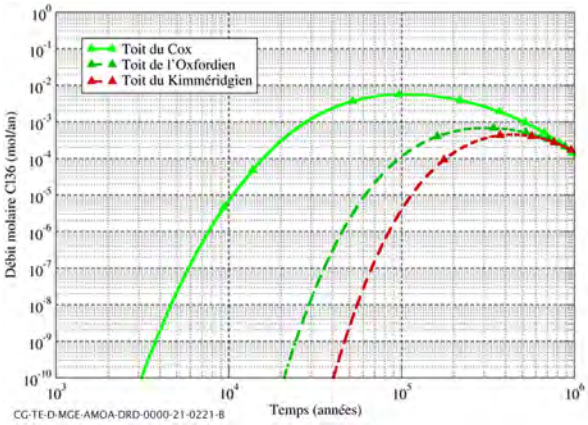
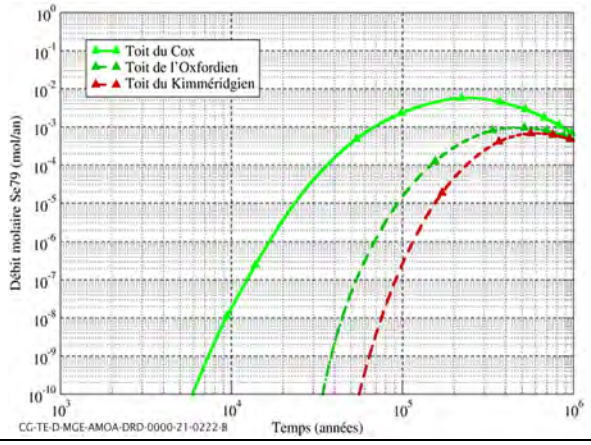
	Situation enveloppe : « Stockage haut » implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien
Iode 129	
Chlore 36	
Sélénium 79	

Figure 6-34 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Barrois (cas 1)*** *: historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien*

6.3.1.3.3 Le transfert des radionucléides dans le milieu géologique (des formations encaissantes[76] aux exutoires) - Cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts horizontaux des solutés dans l'Oxfordien calcaire (cas 2)

Pour mémoire, le cas 2[77] désigne une configuration maximisant les transferts horizontaux des solutés dans la partie transmissive de l'Oxfordien calcaire, vers les exutoires de l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse, rivière Ornain), sur la base d'un transfert « enveloppe » dans les horizons poreux de l'Oxfordien.

La figure 6-35 présente les débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 au niveau de la zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien et au niveau de l'Ornain.

Le tableau 6-13 compare les débits molaires à ces exutoires Oxfordien (zone de fracturation diffuse) et Ornain à l'inventaire total initial pour chaque radionucléide.

Le transfert par convection (et dispersion) dans l'Oxfordien permet l'atténuation des débits molaires maximaux au toit de la couche du Callovo-Oxfordien d'un facteur 1,5 pour l'iode 129, d'un facteur 4 pour le chlore 36 et d'un facteur 3 pour le sélénium 79, avec une date d'occurrence du débit molaire maximum après environ 700 000 ans pour l'iode 129, 470 000 ans pour le chlore 36 et 600 000 ans pour le sélénium 79. Les proportions de l'inventaire total initial en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79, qui atteignent la zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien, sont d'environ 27 % pour l'iode 129, 10 % pour le chlore 36 et 8 % pour le sélénium 79.

L'atténuation des débits molaires maximaux au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, consécutive au transfert vers l'exutoire Ornain, et les dates d'occurrence des débits molaires maximaux à cet exutoire sont très similaires à celles indiquées précédemment pour le transfert dans l'Oxfordien. Les proportions de l'inventaire total initial en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79, qui atteignent l'exutoire Ornain, sont d'environ 22 % pour l'iode 129, 7 % pour le chlore 36 et 6 % pour le sélénium 79.

[76] Comme indiqué au chapitre 4 du présent volume et rappelé au chapitre 5.2.7 du présent volume, bien que n'ayant pas de fonctions de sûreté après fermeture, les formations encaissantes sont toutefois représentées jusqu'aux exutoires afin de permettre la quantification des incidences potentielles sur l'homme.

[77] Configuration illustrée à la figure 5-48 du chapitre 5.3.7 du présent volume.

Tableau 6-13 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2) :*** *bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires Oxfordien et Ornain (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial)*

		Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
		% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
	Inventaire initial total en moles HA/MA-VL	4 600 moles			6 800 moles			13 900 moles		
	Dont HA	52 %			53 %			93 %		
	Dont MA-VL	48 %			47 %			7 %		
Vers les exutoires Oxfordien et Ornain	**Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien**	42,6 %	3 200	210	25,1 %	5 700	110	19,2 %	5 800	240
	Oxfordien (zone de fracturation diffuse)	26,8 %	2 200	700	9,6 %	1 300	470	8,0 %	2 100	600
	Ornain	21,6 %	2 000	760	6,9 %	1 000	540	5,6 %	1 600	670

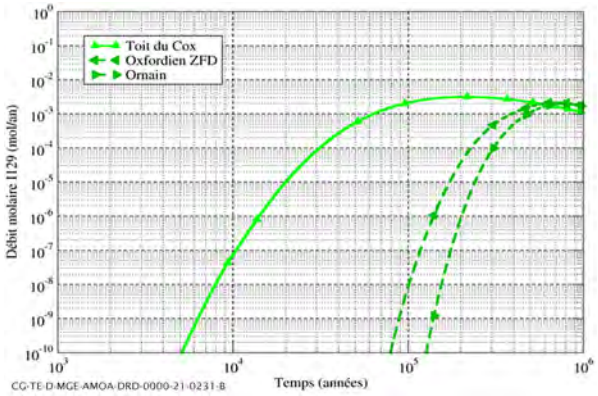
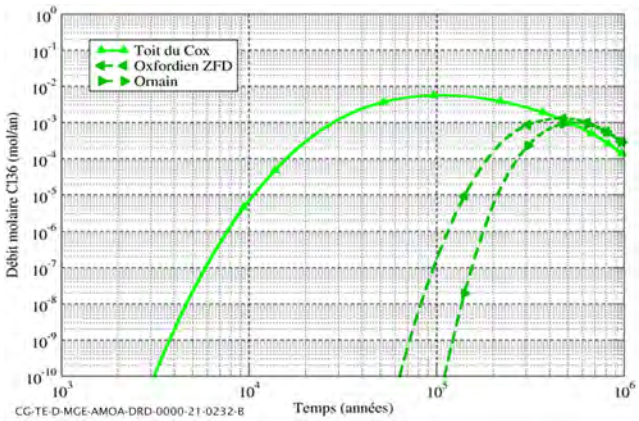
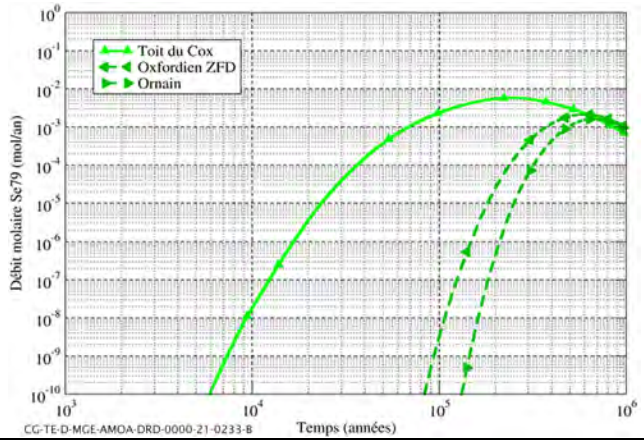
	Situation enveloppe : « Stockage haut » implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien
Iode 129	
Chlore 36	
Sélénium 79	

Figure 6-35 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2)*** *: historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires Oxfordien (zone de fracturation diffuse) et Ornain*

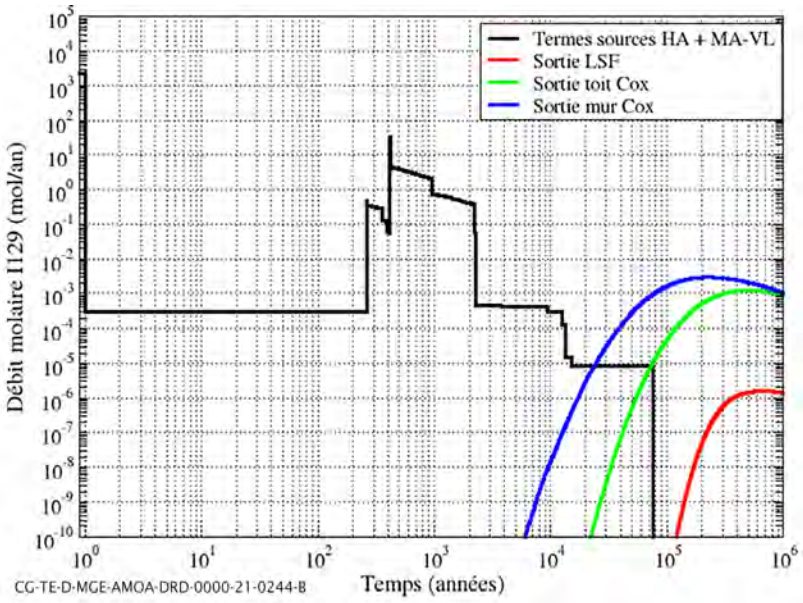
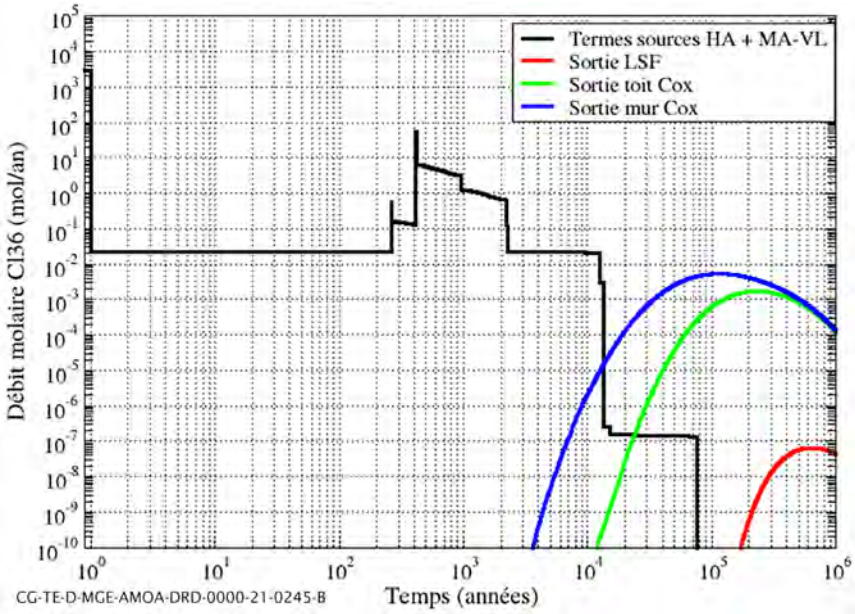
6.3.1.3.4 Le transfert des radionucléides dans les composants ouvragés et naturels du système de stockage - Cas d'un « stockage bas » implanté avec une garde de 50 mètres en partie inférieure du Callovo-Oxfordien

a) L'analyse des débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79

La figure 6-36 présente l'évolution des débits molaires en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79 au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Le tableau 6-14 présente les bilans des débits molaires cumulés sur un million d'années et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages ». Il en ressort les observations suivantes :

- en un million d'années, 59 % de l'iode 129 total initial, 35 % du chlore 36 total initial et 19 % du sélénium 79 total initial ont atteint les limites (toit + mur) de la couche du Callovo-Oxfordien. Le reste de l'inventaire en ces trois radionucléides est encore présent dans la couche du Callovo-Oxfordien ou a disparu par décroissance radioactive. Les différences obtenues entre ces trois radionucléides sont dues aux périodes respectives du chlore 36 et du sélénium 79, qui permettent de bénéficier d'une décroissance radioactive supérieure à celle de l'iode 129, ainsi qu'à la sorption du sélénium dans le béton de revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL et au coefficient de diffusion du sélénium dans la couche du Callovo-Oxfordien, deux fois plus faible que celui du chlore 36 ;
- les comportements de l'iode 129 et du sélénium 79 présentent de nombreuses similitudes. Par exemple, les débits molaires traversant le Callovo-Oxfordien atteignent leur maximum après environ 200 000 ans, soit plus tardivement que pour le chlore 36 (débit molaire maximum atteint à environ 100 000 ans). Cette similitude s'explique notamment par le fait que les paramètres de transfert de ces deux radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien sont similaires, en particulier un coefficient de diffusion effectif du même ordre (6×10^{-12} $m^2.s^{-1}$ pour l'iode et 5×10^{-12} $m^2.s^{-1}$ pour le sélénium) et environ deux fois inférieur à celui du chlore (1×10^{-11} $m^2.s^{-1}$) ;
- le débit molaire maximum de l'iode 129 par la voie ouvrages est d'environ trois ordres de grandeur inférieur à celui de l'iode 129 transitant par le Callovo-Oxfordien. Ce rapport est d'aux moins quatre ordres de grandeur pour le chlore 36 et le sélénium 79. En effet, outre la décroissance radioactive de ces deux radionucléides, la rétention du sélénium dans le béton de revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL, ainsi que la distribution des inventaire MA-VL effectuée sur la base du radionucléide « pilote » (l'iode 129), contribuent à la réduction de leur débit molaire par la voie ouvrages ;
- lorsque le stockage est représenté avec une garde inférieure de 50 mètres et un gradient de charge favorable aux transferts descendants (« stockage bas »), les débits d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 au toit de la couche du Callovo-Oxfordien (maximum d'environ 1×10^{-3} $mol.an^{-1}$) sont moins importants que ceux au mur et atteignent leur maximum plus tard (après environ 200 000 ans pour le chlore 36 et 400 000 ans pour l'iode 129 et le sélénium 79). Ces niveaux de débit molaire au toit sont comparables à ceux obtenus en situation de référence ;
- les conditions de transfert sont à diffusion dominante au niveau des gardes inférieure et supérieure de Callovo-Oxfordien. L'écart entre les débits molaires au toit et au mur de la formation est lié à la différence d'épaisseur entre la garde supérieure et la garde inférieure de Callovo-Oxfordien, respectivement environ 70 mètres en moyenne et 50 mètres ;
- par rapport à la situation de référence, les quantités cumulées sur 1 million d'années des principaux radionucléides mobiles qui atteignent les formations encaissantes inférieures (cas d'un « stockage bas ») sont environ trois fois plus importantes (pour iode 129 et chlore 36) et les débits molaires sont environ jusqu'à 10 fois plus importants. Ces différences sont notamment dues à la différence d'épaisseurs de garde retenues en situation enveloppe et en situation de référence (respectivement 50 mètres et environ 60 mètres à 80 mètres selon les quartiers de stockage), mais également aux propriétés de diffusion des anions considérées deux fois moins favorables en situation enveloppe ;

- comparant les deux déclinaisons de la situation enveloppe (sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien du cas d'un « stockage haut » et sortie au mur de la couche du Callovo-Oxfordien du cas d'un « stockage bas »), les débits molaires maximaux des principaux radionucléides mobiles ainsi que les quantités cumulées sur un million d'années, sont relativement similaires entre les deux cas, tout en étant légèrement inférieures pour le cas du « stockage bas ». Cette légère différence provient en partie du gradient de charge hydraulique vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien qui est 3,5 fois inférieur dans le cas d'un « stockage bas » (0,06 $m.m^{-1}$), comparativement à celui retenu dans le cas d'un « stockage haut » (0,21 $m.m^{-1}$).

	Situation enveloppe : « Stockage bas » implanté à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien
Iode 129	
Chlore 36	

Sélénium 79

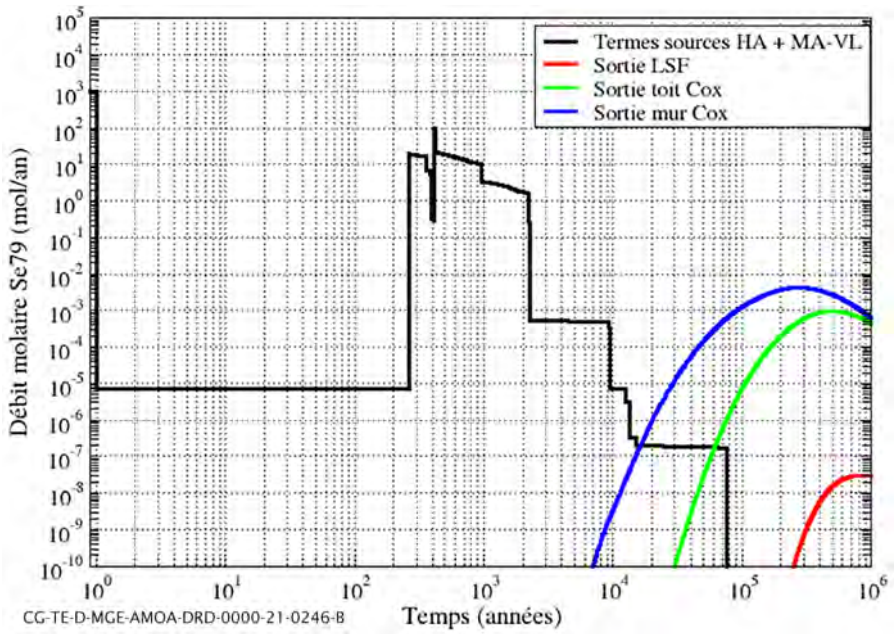


Figure 6-36 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)*

Tableau 6-14 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages »*

	Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
Inventaire initial total en moles HA/MA-VL	4 600 moles			6 800 moles			13 900 moles		
Dont HA	52 %			53 %			93 %		
Dont MA-VL	48 %			47 %			7 %		
Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	19,0 %	1 200	500	10,7 %	1 700	230	4,1 %	950	500
Dont HA	9,2 %	610	530	5,3 %	840	240	3,7 %	870	500
Dont MA-VL	9,8 %	640	460	5,4 %	880	220	0,4 %	830	400
Par la voie « ouvrages »	0,02 %	1,6	670	0,0005 %	0,07	640	0,0001 %	0,03	840
Dont HA	$<10^{-6}$ %	$2,5 \times 10^{-5}$	>1 000	$<10^{-6}$ %	$3,5 \times 10^{-5}$	560	$<10^{-7}$ %	10^{-5}	500
Dont MA-VL	0,02 %	1,6	670	0,0005 %	0,07	640	0,0001 %	0,03	840
Au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	39,4 %	3 000	230	23,8 %	5 400	120	15,1 %	4 300	270

	Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
Dont HA	22,2 %	1 800	200	14,1 %	3 500	100	14,3 %	4 000	270
Dont MA-VL	17,2 %	1 200	260	9,8 %	2 000	130	0,8 %	220	260

b) L'analyse des débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien pour les radionucléides présentant un débit molaire supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1} au mur de la couche du Callovo-Oxfordien

La figure 6-37 présente l'évolution des débits molaires au mur de la couche du Callovo-Oxfordien des radionucléides présentant un débit molaire supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1}, pour une implantation du stockage à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien.

Outre les trois principaux radionucléides mobiles analysés ci-avant (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), les radionucléides présentant un débit molaire supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1} au mur de la couche du Callovo-Oxfordien en situation enveloppe (implantation du stockage à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien) sont les suivants (il s'agit du même cortège de radionucléides que pour le cas d'un stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien) :

- le calcium 41 et le potassium 40, considérés faiblement sorbés dans les ouvrages cimentaires et dans la couche du Callovo-Oxfordien ; leur fort inventaire initial conduit à des débits molaires maximaux supérieurs à 10^{-4} mol.an^{-1}, entre 100 000 ans et 300 000 ans ;
- le carbone 14 (forme organique) et le molybdène 93, qui, malgré leurs faibles périodes radioactives, ont un inventaire radiologique initial suffisamment élevé pour conduire à des débits molaires respectivement d'environ 10^{-6} mol.an^{-1} et 3×10^{-9} mol.an^{-1}. Les débits molaires du carbone 14 et du molybdène 93 sont cependant à relativiser puisqu'à 100 000 ans, seulement 2×10^{-5} % à 10^{-4} % de leur inventaire total initial (HA + MA-VL) a atteint le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- le rubidium 87 et le césium 135, compte tenu des coefficients de partage conservatifs retenus dans la couche du Callovo-Oxfordien : à un million d'années, les débits molaires au mur de la couche du Callovo-Oxfordien sont d'environ 4×10^{-3} mol.an^{-1} pour le rubidium 87 et $6{,}5 \times 10^{-4}$ mol.an^{-1} pour le césium 135, et environ 0,2 % de l'inventaire total initial en rubidium 87 et 0,02 % de celui en césium 135 ont atteint le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les isotopes de l'uranium (uranium 238, uranium 235, uranium 236, puis uranium 233 et uranium 234 dans une moindre mesure), compte tenu des coefficients de partage conservatifs retenus dans la couche du Callovo-Oxfordien : à un million d'années, seulement de l'ordre de 6×10^{-5} % de l'inventaire total initial en chaque isotope de l'uranium a atteint le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- le manganèse 53 et le fer 60, relativement peu sorbés dans la couche du Callovo-Oxfordien et non sorbés dans les ouvrages cimentaires ; leur inventaire total initial et leur période longue conduisent à des débits molaires respectifs d'environ 1×10^{-5} mol.an^{-1} et 8×10^{-7} mol.an^{-1}, mais à des occurrences très tardives également ;
- dans une moindre mesure, le radium 226 et le protactinium 231.

Sur la durée de simulation retenue, tous les autres radionucléides présentent un débit molaire inférieur à 10^{-10} mol.an^{-1} au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, soit du fait de leur période, très inférieure au temps de transfert, soit du fait de leur sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien.

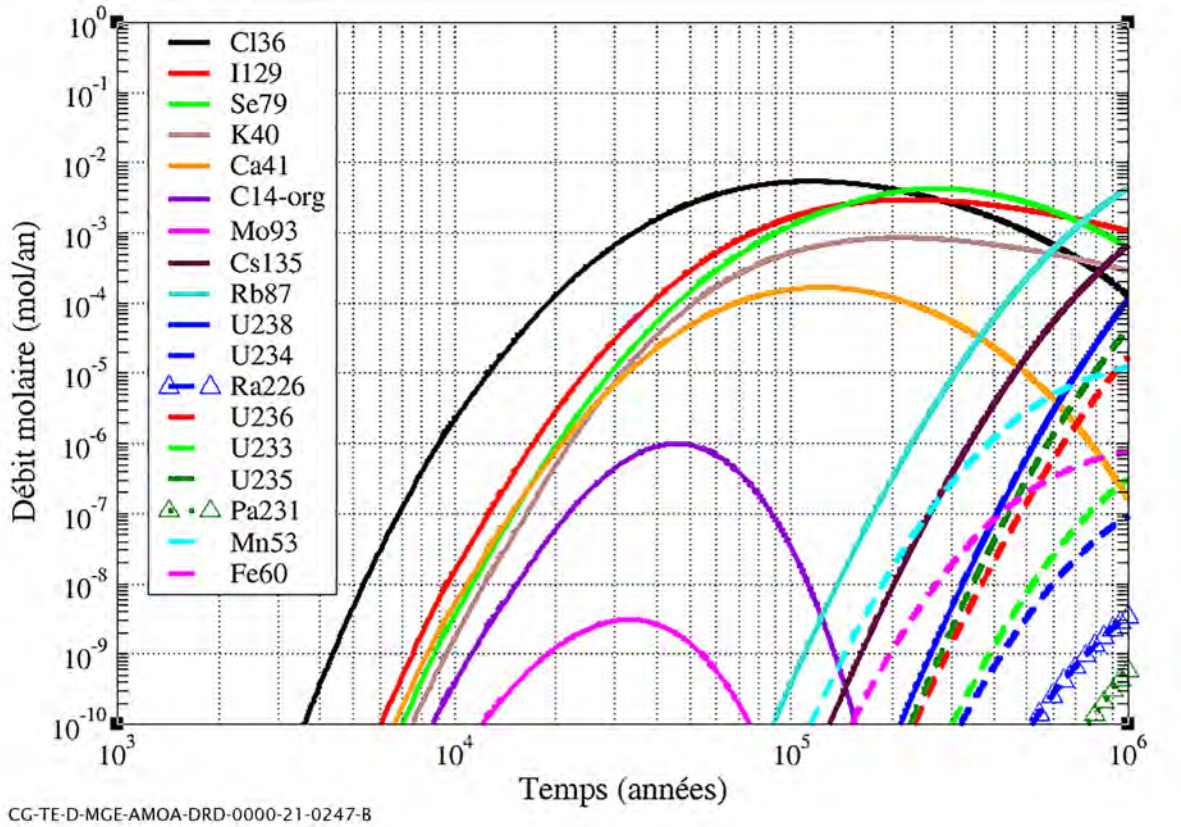


Figure 6-37 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : historiques des débits molaires des principaux radionucléides au mur de la couche du Callovo-Oxfordien*

c) L'analyse du transfert de l'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79, issus des zones HA et MA-VL

La figure 6-38 donne l'évolution des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 relâchés par les colis HA et MA-VL et migrant par le Callovo-Oxfordien et par la voie ouvrages. Les débits molaires sont déterminés au niveau des galeries d'accès (zone HA), des galeries de liaison, de la zone centrale et de la sortie des liaisons surface-fond.

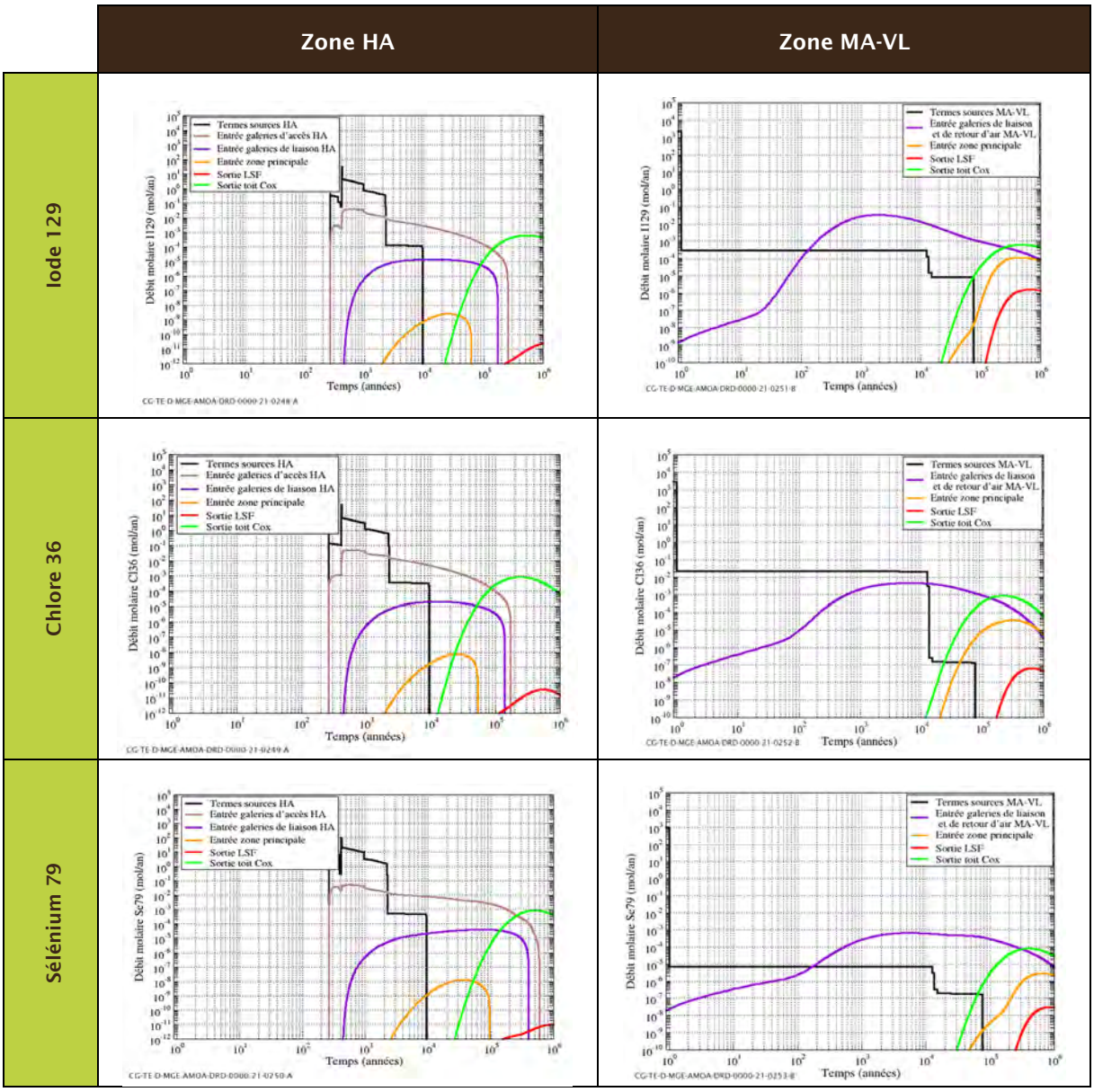


Figure 6-38 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), quartiers de stockage HA (à gauche) et quartier de stockage MA-VL (à droite) : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), en chlore 36 (au milieu) et en sélénium 79 (en bas), entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit)*

Les graphes de la figure 6-38 et le tableau 6-15 mettent en évidence les points suivants :

- en situation enveloppe (cas d'un « stockage bas »), les relâchements de l'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79 interviennent plus tôt qu'en situation de référence :
  - ✓ entre 300 ans et 10 000 ans dans la zone HA ;
  - ✓ avant 80 000 ans dans la zone MA-V ;
- les débits molaires des radionucléides transitant par la voie ouvrages sont significativement plus importants pour le quartier de stockage MA-VL que pour la zone HA. Cet écart est principalement dû au moteur hydraulique plus important qu'en situation de référence, et à l'orientation des écoulements dans l'installation souterraine, plus favorable aux transferts depuis le quartier de stockage MA-VL vers la zone centrale ; néanmoins, les débits molaires transitant par la voie ouvrages du cas « stockage bas » sont environ d'un ordre de grandeur inférieurs à ceux du cas « stockage haut », notamment du fait de la différence de sens et d'intensité du gradient de charge hydraulique vertical dans le Callovo-Oxfordien (gradient plus élevé et ascendant dans le cas du « stockage haut », gradient plus faible et descendant dans le cas du « stockage bas ») ;
- dans la zone HA, les débits molaires en iode 129 et en chlore 36 par la voie ouvrages diminuent brutalement, après environ 200 000 ans ou 300 000 ans en entrée de galerie d'accès et en entrée de galerie de liaison et 50 000 ans en entrée de zone centrale. Cette évolution est due aux écoulements lents orientés vers la zone HA. Aux dates identifiées ci-dessus, les flux convectifs vers la zone HA contrebalancent les flux diffusifs.

Le tableau 6-15 donne le bilan des débits molaires en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79, cumulés sur un million d'années en différents endroits au long de la voie ouvrages et en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien. Ces débits molaires cumulés, normés par rapport à l'inventaire total initial respectif des quartiers de stockage HA et du quartier de stockage MA-VL, conduisent aux observations suivantes :

- dans la zone HA, moins de 6 % de l'inventaire initial en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79 atteignent les galeries d'accès, le reste sortant des alvéoles radialement, par le Callovo-Oxfordien. Cette fraction est faible grâce à la longueur hectométrique des alvéoles HA et au régime hydraulique faible. Le transfert lent au long des galeries d'accès permet également aux radionucléides de traverser le revêtement et de diffuser dans la couche du Callovo-Oxfordien. Ainsi, au plus 0,1 % de l'inventaire initial en iode 129, chlore 36 ou sélénium 79, atteignent les galeries de liaison et le débit molaire maximal est atténué de deux ordres de grandeur. Seulement 0,00001 % de l'inventaire initial en iode 129, chlore 36 ou sélénium 79, atteignent la zone centrale, avec une atténuation supplémentaire de trois ordres de grandeur. *In fine*, une très faible fraction des inventaires en iode 129, chlore 36 ou sélénium 79 (moins de 0,000001 %), sortent par les liaisons surface-fond, avec une atténuation supplémentaire d'au moins deux ordres de grandeur. Le débit molaire maximal est alors d'au moins sept ordres de grandeur inférieur au débit molaire des radionucléides qui traversent le Callovo-Oxfordien ;
- dans le quartier de stockage MA-VL, 32 % de l'inventaire initial en iode 129, 10 % de celui en chlore 36 et 10 % de celui en sélénium 79 atteignent les galeries de liaison. Ces proportions tombent à 3,6 %, 0,6 % et 0,2 % respectivement en entrée de la zone centrale, avec une atténuation d'au moins un ordre de grandeur du débit molaire maximal. La cinétique lente des écoulements dans les galeries de liaison et le transfert vers le Callovo-Oxfordien permettent de limiter à 0,05 %, 0,001 % et 0,002 % les fractions d'iode 129 de chlore 36 et de sélénium 79 qui sortent des liaisons surface-fond, avec une atténuation supplémentaire des débits molaires maximaux d'environ un ordre de grandeur. Le débit molaire maximal est alors d'environ 2 à 3 ordres de grandeur inférieur au débit molaire des radionucléides qui migrent par le Callovo-Oxfordien.

Tableau 6-15 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : bilan des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (cumulés sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial respectif des quartiers de stockage HA et du quartier de stockage MA-VL) entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit)*

Débit cumulé en % de l'inventaire total initial de la zone HA	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone centrale	Sortie des liaisons surface-fond	Sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien
Iode 129	5,9 %	0,05 %	$<4 \times 10^{-6}$ %	$\sim 4 \times 10^{-7}$ %	17,8 %
Chlore 36	5,6 %	0,035 %	$\sim 6 \times 10^{-6}$ %	$<6 \times 10^{-7}$ %	10,1 %
Sélénium 79	5,5 %	0,07 %	$\sim 5 \times 10^{-6}$ %	$\sim 4 \times 10^{-8}$ %	4,0 %
Débit cumulé en % de l'inventaire total initial du quartier de stockage MA-VL	**Entrée dans les galeries de liaison/accès et de retour d'air**		**Entrée dans la zone centrale**	**Sortie des liaisons surface-fond**	**Sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien**
Iode 129	32,0 %		3,6 %	0,05 %	20,4 %
Chlore 36	10,3 %		0,6 %	$\sim 10^{-3}$ %	11,4 %
Sélénium 79	9,7 %		0,2 %	$<2 \times 10^{-3}$ %	5,1 %

6.3.1.3.5 Le transfert des radionucléides dans le milieu géologique (des formations encaissantes[78] aux exutoires) - Cas d'un « stockage bas » implanté avec une garde de 50 mètres en partie inférieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts horizontaux des solutés dans le Dogger (cas 3)

Pour mémoire, le cas 3[79] désigne une configuration maximisant les transferts horizontaux des solutés dans la partie transmissive du Dogger, vers l'exutoire Dogger (zone de fracturation diffuse), sur la base d'un transfert « enveloppe » dans toutes les formations du Dogger.

La figure 6-39 présente les débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 en sortie au mur de la couche du Callovo-Oxfordien et au niveau de la zone de fracturation diffuse dans le Dogger. Le tableau 6-16 compare les débits molaires à cet exutoire Dogger à l'inventaire total initial pour chaque radionucléide.

Le transfert par convection (et dispersion) dans les horizons poreux du Dogger, après traversée des semi-perméables, permet l'atténuation des débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien d'un facteur 4,5 pour l'iode 129, d'un facteur 6,5 pour le chlore 36 et d'un facteur 5 pour le sélénium 79, avec une date d'occurrence du débit molaire maximum après environ 340 000 ans pour l'iode 129, 210 000 ans pour le chlore 36 et 600 000 ans pour le sélénium 79. Les proportions de l'inventaire total initial en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79, qui atteignent la zone de fracturation diffuse dans le Dogger, sont d'environ 8 % pour l'iode 129, 4 % pour le chlore 36 et 3 % pour le sélénium 79.

[78] Comme indiqué au chapitre 4 du présent volume et rappelé au chapitre 5.2.7 du présent volume, bien que n'ayant pas de fonctions de sûreté après fermeture, les formations encaissantes sont toutefois représentées jusqu'aux exutoires afin de permettre la quantification des incidences potentielles sur l'homme.

[79] Configuration illustrée à la figure 5-48 du chapitre 5.3.7 du présent volume.

Tableau 6-16 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres),* ***exutoire Dogger (cas 3)*** *: bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à l'exutoire Dogger (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial)*

		Iode 129			Chlore 36			Sélénium 79		
		% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit molaire max. ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
	Inventaire initial total en moles HA/MA-VL	4 600 moles			6 800 moles			13 900 moles		
	Dont HA	52 %			53 %			93 %		
	Dont MA-VL	48 %			47 %			7 %		
Vers l'exutoire Dogger	**Au mur de la couche du Callovo-Oxfordien**	39,4 %	3 000	230	23,8 %	5 400	120	15,1 %	4 300	270
	Dogger (zone de fracturation diffuse)	8,1 %	610	340	4,1 %	790	210	3,1 %	860	370

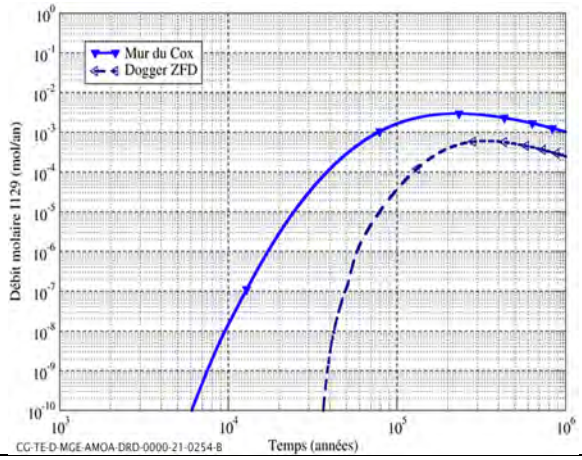
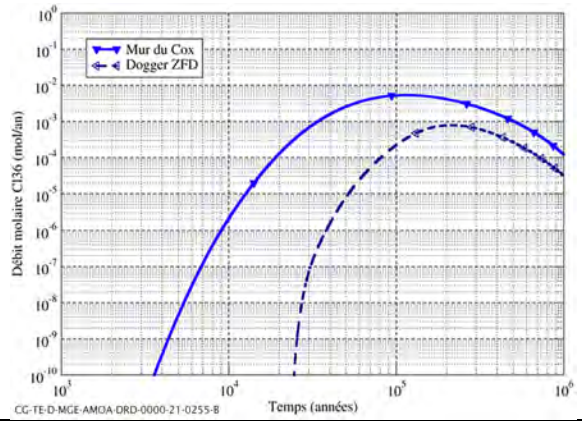
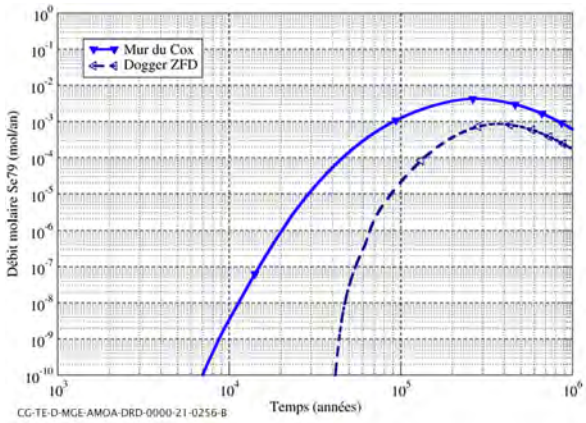
	Situation enveloppe : « Stockage bas » implanté à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien
Iode 129	
Chlore 36	
Sélénium 79	

Figure 6-39 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres),* ***exutoire Dogger (cas 3)*** *: historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à la zone de fracturation diffuse dans le Dogger*

6.3.2 Les résultats des incidences sanitaires sur l'homme liées au transfert potentiel de radionucléides aux exutoires

La présentation des résultats de ce chapitre est associée à la figure 5-48 du chapitre 5.3.7 du présent volume précisant les différents exutoires traités en situation enveloppe.

6.3.2.1 Cas 1 - Le transfert des radionucléides dans la biosphère - Cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts ascendants verticaux des solutés vers le Barrois

Les résultats des évaluations de dose aux personnes représentatives des groupes de référence hypothétiques « multi-activités » définis au chapitre 4 du présent volume sont présentés à la figure 6-40 et au tableau 6-17 pour l'exutoire « Pompage dans le Barrois ». Les résultats concernent l'incidence sanitaire relative au groupe de référence hypothétique « multi-activités » pour le cas des biosphères tempérée, chaude et froide, et des classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an), hormis pour la biosphère froide pour laquelle seule la classe d'âge adulte a été retenue (cf. Chapitre 4 du présent volume).

Pour cet exutoire, les résultats relatifs aux deux groupes de référence hypothétiques particuliers de sensibilité au régime alimentaire (« éleveur de bovins », « villageois jardinier ») sont présentés à la figure 6-41 et au tableau 6-18 pour une biosphère tempérée et la classe d'âge adulte.

L'ensemble des résultats relatifs au groupe de référence hypothétique « multi-activités » montre que pour l'exutoire « Pompage dans le Barrois » (cas 1) :

- les incidences radiologiques relatives aux biosphères tempérée et chaude, exprimées en termes de doses, sont principalement pilotées par le sélénium 79, et par le chlore 36 dans une moindre mesure. Les valeurs maximales de dose, obtenues pour une biosphère chaude, sont de l'ordre de $1{,}5 \times 10^{-2}$ mSv.an^{-1} pour l'adulte, 5×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans, et 6×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an ;
- les incidences radiologiques relatives à la biosphère froide (classe d'âge adulte) sont inférieures d'environ 40 % à celles obtenues avec la biosphère tempérée (classe d'âge adulte) ;
- en lien avec les dates d'occurrence respectives des débits molaires maximaux obtenus au toit du Kimméridgien (cf. Tableau 6-12 du chapitre 0 du présent volume), la valeur maximale du cumul de dose est globalement atteinte entre 550 000 ans et 600 000 ans, quelles que soient la biosphère type et la classe d'âge.

Les incidences radiologiques relatives aux groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier » en biosphère tempérée (classe d'âge adulte) sont légèrement supérieures à celles obtenues avec le groupe de référence « multi-activités » en biosphère tempérée (classe d'âge adulte), respectivement d'au plus 10 % et 50 %, soit de l'ordre de 2×10^{-2} mSv.an^{-1} pour le villageois jardinier.

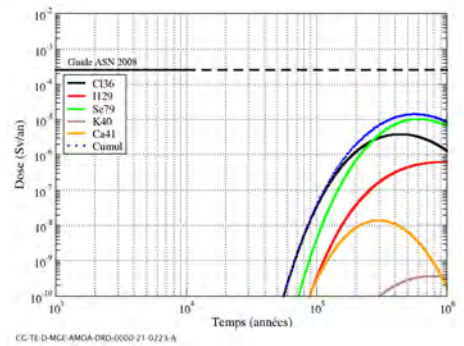
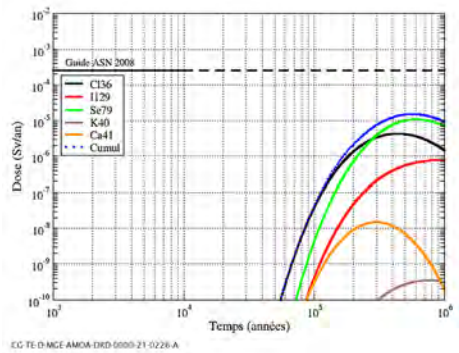
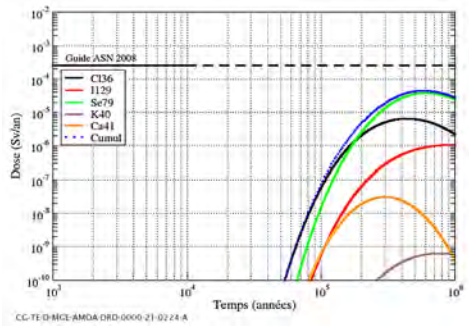
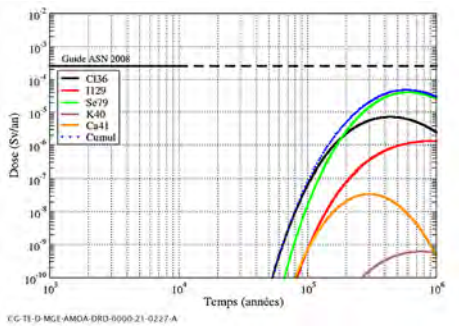
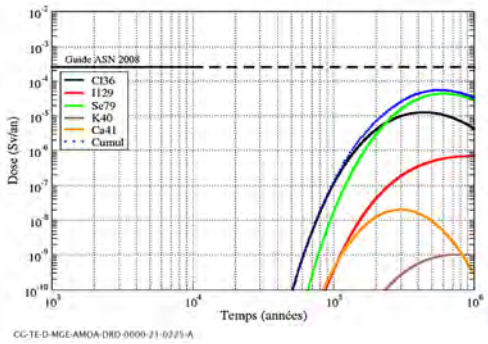
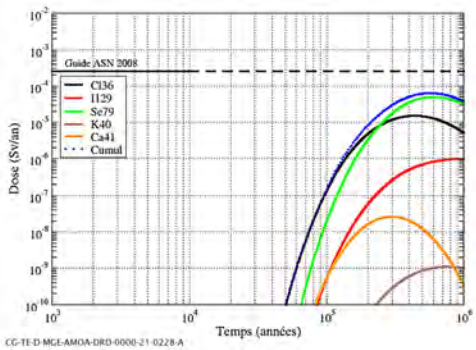
Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})		
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »		
	Biosphère tempérée	Biosphère chaude
Adulte		
Enfant 10 ans		
Enfant 1 an		

Figure 6-40 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Barrois (cas 1)*** *: historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Tableau 6-17 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Barrois (cas 1)*** *: doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée, chaude et froide et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

		Exutoire Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})					
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités »					
		Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère froide	
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	$3,8 \times 10^{-3}$	440	$4,3 \times 10^{-3}$	440	$3,0 \times 10^{-3}$	440
	^{129}I	$6,3 \times 10^{-4}$	960	$7,9 \times 10^{-4}$	960	$6,1 \times 10^{-4}$	960
	^{79}Se	$1,0 \times 10^{-2}$	600	$1,1 \times 10^{-2}$	600	$5,2 \times 10^{-3}$	600
	^{40}K	$3,7 \times 10^{-7}$	760	$3,5 \times 10^{-7}$	760	$2,3 \times 10^{-7}$	760
	^{41}Ca	$1,4 \times 10^{-5}$	300	$1,5 \times 10^{-5}$	300	$7,7 \times 10^{-6}$	300
	Cumul	$1,4 \times 10^{-2}$	560	$1,5 \times 10^{-2}$	560	$8,3 \times 10^{-3}$	550
Enfant 10 ans	^{36}Cl	$6,5 \times 10^{-3}$	440	$7,2 \times 10^{-3}$	440		
	^{129}I	$1,1 \times 10^{-3}$	960	$1,3 \times 10^{-3}$	960		
	^{79}Se	$3,8 \times 10^{-2}$	600	$4,0 \times 10^{-2}$	600		
	^{40}K	$6,3 \times 10^{-7}$	760	$6,1 \times 10^{-7}$	760		

		Exutoire Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})					
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités »					
		Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère froide	
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
	^{41}Ca	$3,1 \times 10^{-5}$	300	$3,4 \times 10^{-5}$	300		
	Cumul	$4,4 \times 10^{-2}$	580	$4,8 \times 10^{-2}$	580		
Enfant 1 an	^{36}Cl	$1,3 \times 10^{-2}$	440	$1,5 \times 10^{-2}$	440		
	^{129}I	$7,0 \times 10^{-4}$	960	$9,7 \times 10^{-4}$	960		
	^{79}Se	$4,4 \times 10^{-2}$	600	$4,9 \times 10^{-2}$	600		
	^{40}K	$1,0 \times 10^{-6}$	760	$1,1 \times 10^{-6}$	760		
	^{41}Ca	$2,0 \times 10^{-5}$	300	$2,6 \times 10^{-5}$	300		
	Cumul	$5,5 \times 10^{-2}$	570	$6,3 \times 10^{-2}$	570		

Tableau 6-18 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Barrois (cas 1)*** *: doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte*

		Exutoire Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})			
		Groupe de référence hypothétique « éleveur de bovins »		Groupe de référence hypothétique « villageois jardinier »	
		Biosphère tempérée			
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	4,4 × 10^{-3}	440	5,0 × 10^{-3}	440
	^{129}I	6,8 × 10^{-4}	960	6,6 × 10^{-4}	960
	^{79}Se	1,1 × 10^{-2}	600	1,5 × 10^{-2}	600
	^{40}K	3,9 × 10^{-7}	760	4,0 × 10^{-7}	760
	^{41}Ca	1,7 × 10^{-5}	300	1,5 × 10^{-5}	300
	Cumul	1,5 × 10^{-2}	560	2,0 × 10^{-2}	570

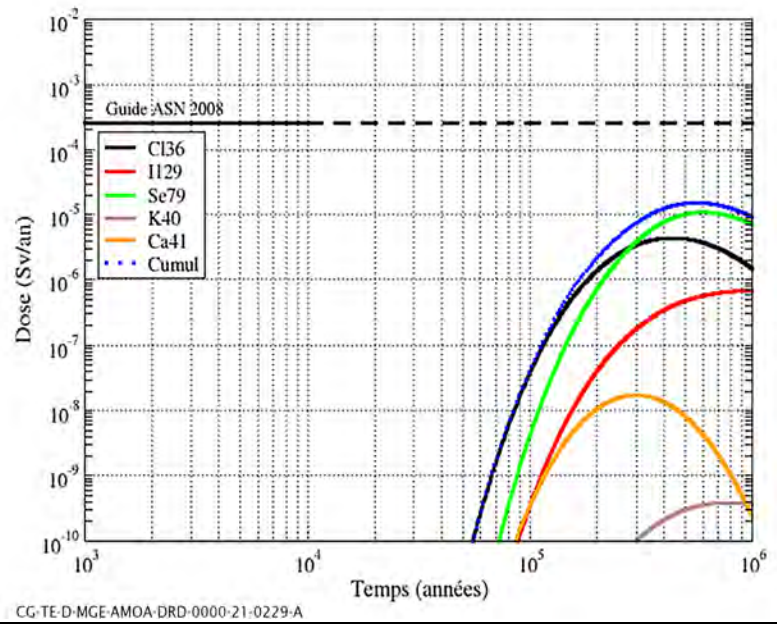
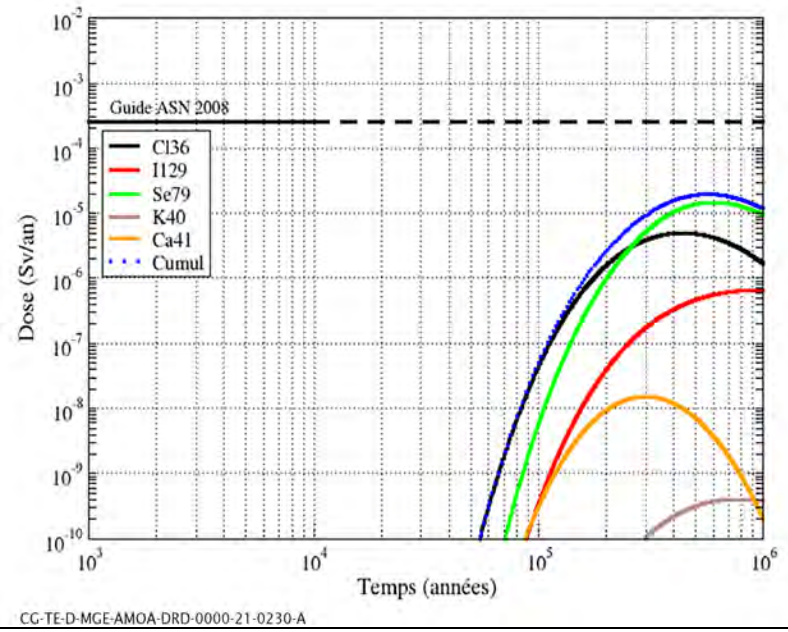
	Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})	
	Groupe de référence « éleveur de bovins »	Groupe de référence « villageois jardinier »
	Biosphère tempérée	
Adulte		

Figure 6-41 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Barrois (cas 1)*** *: historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte*

6.3.2.2 Cas 2 - Le transfert des radionucléides dans la biosphère - Cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts horizontaux des solutés dans l'Oxfordien calcaire

Pour mémoire, tel qu'indiqué au chapitre 2.10.3 du présent volume, deux exutoires de l'Oxfordien sont retenus pour la situation enveloppe : un exutoire pompage dans l'Oxfordien dans la zone de fracturation diffuse et un exutoire rivière au niveau de l'Ornain.

Les résultats des évaluations de dose aux personnes représentatives des groupes de référence hypothétiques sont respectivement présentés :

- à la figure 6-42 et au tableau 6-19 pour l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) ». Les résultats concernent l'incidence sanitaire relative au groupe de référence hypothétique « multi-activités », dans le cas des biosphères tempérée, chaude et froide, et des classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an), hormis pour la biosphère froide pour laquelle seule la classe d'âge adulte a été retenue (cf. Chapitre 4 du présent volume) ;
- à la figure 6-43 et au tableau 6-20 pour l'exutoire « Rivière Ornain ». Les résultats concernent l'incidence sanitaire relative au groupe de référence hypothétique « multi-activités (pêcheur chasseur) » dans le cas des biosphères tempérée et froide, et de la classe d'âge adulte ;
- à la figure 6-44 et au tableau 6-21 pour l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) ». Les résultats sont relatifs aux deux groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier » pour une biosphère tempérée et la classe d'âge adulte.

L'ensemble des résultats relatifs au groupe de référence hypothétique « multi-activités » (cf. Tableau 6-19) montre que pour l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » (cas 2) :

- les incidences radiologiques relatives aux biosphères tempérée et chaude, exprimées en termes de doses, sont pilotées par le sélénium 79. Les valeurs maximales de dose, obtenues pour une biosphère chaude, sont de l'ordre de $5{,}7 \times 10^{-2}$ mSv.an^{-1} pour l'adulte, 2×10^{-1} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans, et $2{,}5 \times 10^{-1}$ mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an ;
- les incidences radiologiques relatives à la biosphère froide (classe d'âge adulte) sont inférieures d'environ 45 % à celles obtenues avec la biosphère tempérée (classe d'âge adulte) ;
- en lien avec les dates d'occurrence respectives des débits molaires maximaux obtenus dans l'Oxfordien au niveau de la zone de fracturation diffuse (cf. Tableau 6-13 du chapitre 6.3.1.3.3 du présent volume), la valeur maximale du cumul de dose est atteinte à environ 600 000 ans, quelles que soient la biosphère type et la classe d'âge.

Pour l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » (cf. Tableau 6-21), les incidences radiologiques exprimées en termes de doses à l'adulte relatives aux groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier » en biosphère tempérée (classe d'âge adulte) sont légèrement supérieures à celles obtenues avec le groupe de référence « multi-activités » en biosphère tempérée (classe d'âge adulte), respectivement d'environ 10 % et 45 %, soit de l'ordre de $7{,}5 \times 10^{-2}$ mSv.an^{-1} pour le villageois jardinier.

Enfin, pour l'exutoire « Rivière Ornain » (cf. Tableau 6-20), les incidences radiologiques exprimées en termes de doses à l'adulte du groupe de référence hypothétique « multi-activités (pêcheur chasseur) » sont également pilotées par le sélénium 79, avec des valeurs maximales de l'ordre de 1×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'adulte en biosphère tempérée ou froide.

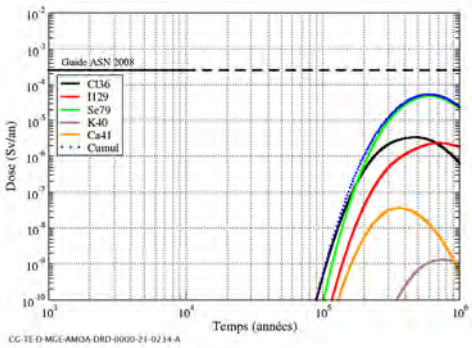
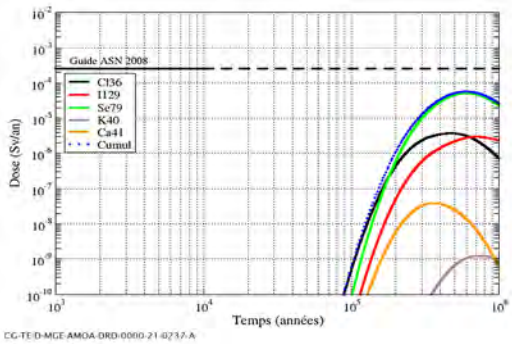
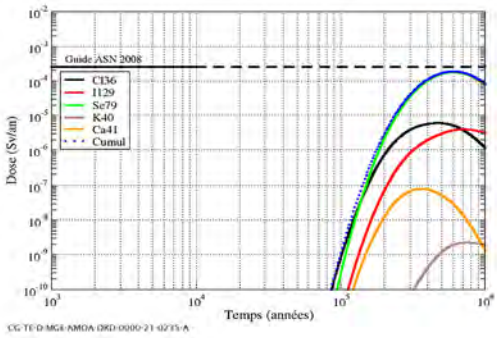
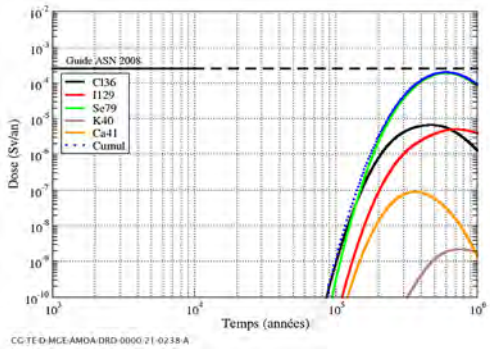
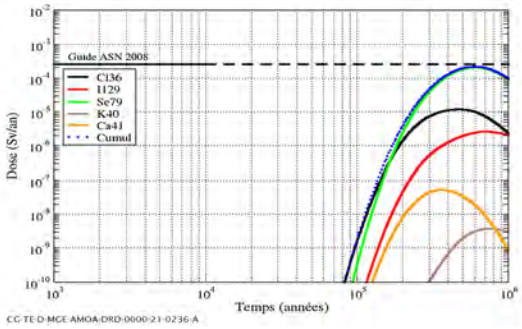
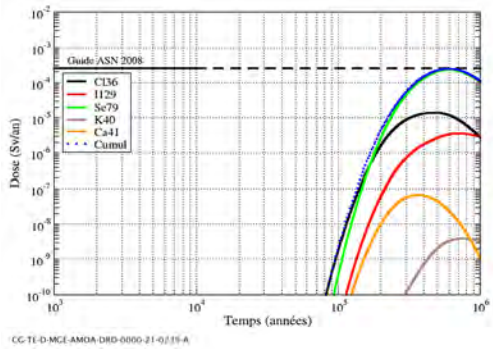
Pompage à l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) (100 L.min^{-1})		
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »		
	Biosphère tempérée	Biosphère chaude
Adulte		
Enfant 10 ans		
Enfant 1 an		

Figure 6-42 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Oxfordien (cas 2)*** *: historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Tableau 6-19 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Oxfordien (cas 2)*** *: doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée, chaude et froide et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

		Exutoire Pompage à l'Oxfordien (100 L.min^{-1})					
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités »					
		Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère froide	
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	$3,4 \times 10^{-3}$	470	$3,7 \times 10^{-3}$	470	$3,3 \times 10^{-3}$	470
	^{129}I	$2,4 \times 10^{-3}$	700	$3,0 \times 10^{-3}$	700	$2,3 \times 10^{-3}$	700
	^{79}Se	$4,8 \times 10^{-2}$	600	$5,1 \times 10^{-2}$	600	$2,4 \times 10^{-2}$	600
	^{40}K	$1,3 \times 10^{-6}$	750	$1,2 \times 10^{-6}$	750	$8,3 \times 10^{-7}$	750
	^{41}Ca	$3,6 \times 10^{-5}$	360	$3,9 \times 10^{-5}$	360	$2,0 \times 10^{-5}$	360
	Cumul	$5,3 \times 10^{-2}$	600	$5,7 \times 10^{-2}$	600	$2,9 \times 10^{-2}$	590
Enfant 10 ans	^{36}Cl	$6,1 \times 10^{-3}$	470	$6,6 \times 10^{-3}$	470		
	^{129}I	$4,0 \times 10^{-3}$	700	$5,0 \times 10^{-3}$	700		
	^{79}Se	$1,8 \times 10^{-1}$	600	$1,9 \times 10^{-1}$	600		
	^{40}K	$2,3 \times 10^{-6}$	750	$2,2 \times 10^{-6}$	750		
	^{41}Ca	$8,0 \times 10^{-5}$	360	$8,9 \times 10^{-5}$	360		

		Exutoire Pompage à l'Oxfordien (100 L.min^{-1})					
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités »					
		Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère froide	
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
	Cumul	$1,9 \times 10^{-1}$	600	$2,0 \times 10^{-1}$	600		
Enfant 1 an	^{36}Cl	$1,2 \times 10^{-2}$	470	$1,4 \times 10^{-2}$	470		
	^{129}I	$2,6 \times 10^{-3}$	700	$3,6 \times 10^{-3}$	700		
	^{79}Se	$2,1 \times 10^{-1}$	600	$2,3 \times 10^{-1}$	600		
	^{40}K	$3,7 \times 10^{-6}$	750	$3,9 \times 10^{-6}$	750		
	^{41}Ca	$5,2 \times 10^{-5}$	360	$6,8 \times 10^{-5}$	360		
	Cumul	$2,2 \times 10^{-1}$	600	$2,5 \times 10^{-1}$	600		

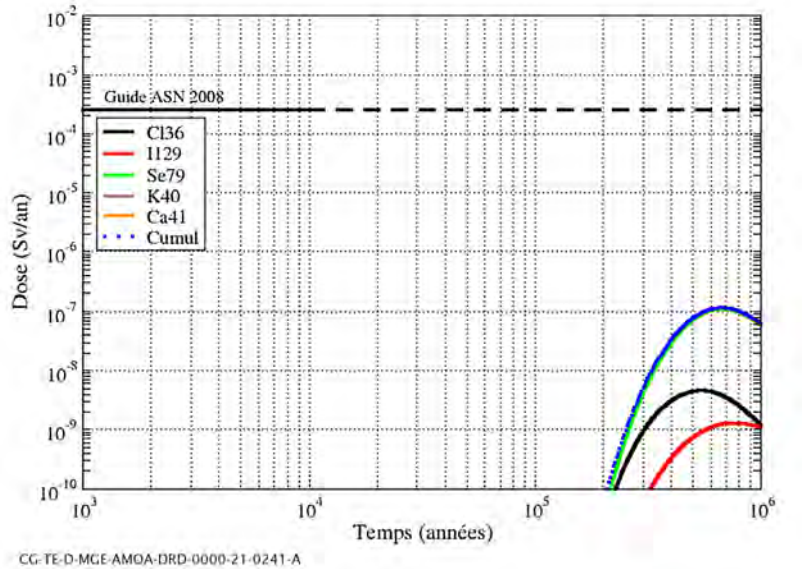
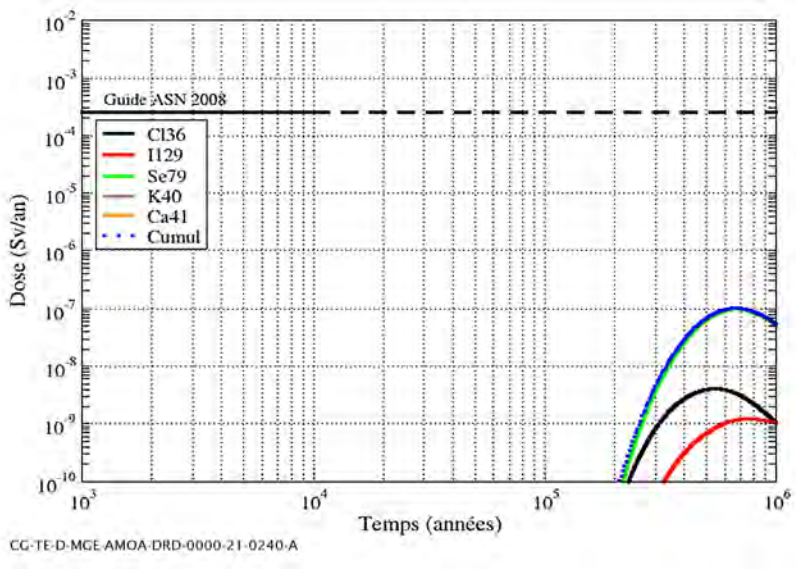
	Rivière Ornain (2,64 × 10^5 L.min^{-1})	
	Groupe de référence hypothétique « multi-activités (pêcheur chasseur) »	
	Biosphère tempérée	Biosphère froide
Adulte		

Figure 6-43 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Ornain (cas 2)*** *: historiques des doses à l'exutoire « Rivière Ornain » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités (pêcheur chasseur) », les biosphères tempérée et froide et la classe d'âge adulte*

Tableau 6-20 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Ornain (cas 2)*** *: doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Rivière Ornain » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités (pêcheur chasseur) », les biosphères tempérée et froide et la classe d'âge adulte*

		Exutoire Rivière Ornain (2,64 × 10^5 L.min^{-1})			
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités (pêcheur chasseur) »			
		Biosphère tempérée		Biosphère froide	
	Radionucléide	Dose maximale (mSv.an^{-1})	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv.an^{-1})	Date de dose maximale (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	4,6 × 10^{-6}	540	4,1 × 10^{-6}	540
	^{129}I	1,3 × 10^{-6}	760	1,2 × 10^{-6}	760
	^{79}Se	1,1 × 10^{-4}	670	9,8 × 10^{-5}	670
	^{40}K	8,8 × 10^{-9}	810	8,5 × 10^{-9}	810
	^{41}Ca	7,7 × 10^{-9}	450	4,3 × 10^{-9}	450
	Cumul	1,2 × 10^{-4}	670	1,0 × 10^{-4}	670

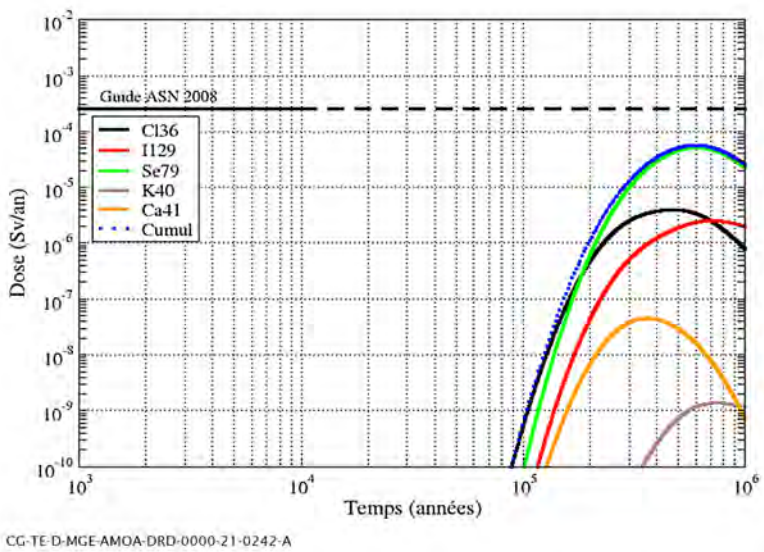
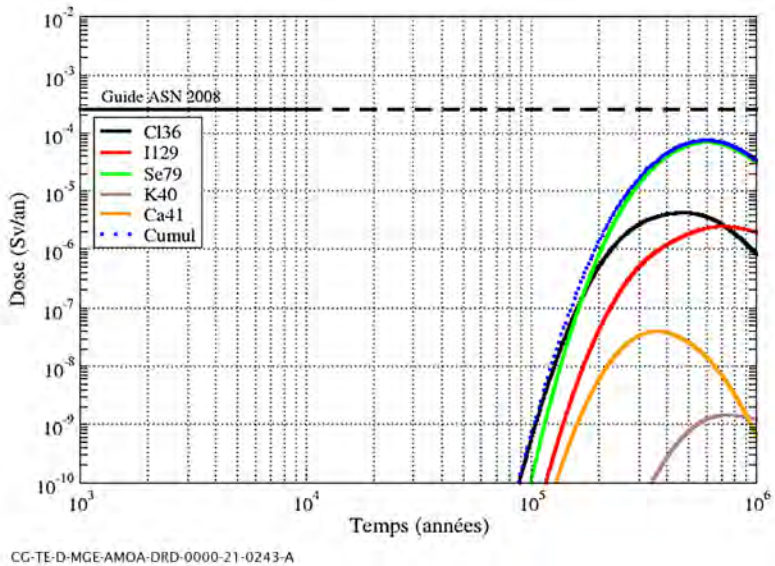
	Pompage à l'Oxfordien (100 L.min^{-1})	
	Groupe de référence « éleveur de bovins »	Groupe de référence « villageois jardinier »
	Biosphère tempérée	
Adulte		

Figure 6-44 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Oxfordien (cas 2)*** *: historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte*

Tableau 6-21 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Oxfordien (cas 2)*** *: doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte*

		Exutoire Pompage à l'Oxfordien (100 L.min^{-1})			
		Groupe de référence hypothétique « éleveur de bovins »		Groupe de référence hypothétique « villageois jardinier »	
		Biosphère tempérée			
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	$4,0 \times 10^{-3}$	470	$4,3 \times 10^{-3}$	470
	^{129}I	$2,5 \times 10^{-3}$	700	$2,5 \times 10^{-3}$	700
	^{79}Se	$5,1 \times 10^{-2}$	600	$6,9 \times 10^{-2}$	600
	^{40}K	$1,4 \times 10^{-6}$	750	$1,4 \times 10^{-6}$	750
	^{41}Ca	$4,5 \times 10^{-5}$	360	$4,0 \times 10^{-5}$	360
	Cumul	**$5,7 \times 10^{-2}$**	**600**	**$7,5 \times 10^{-2}$**	**600**

6.3.2.3 Cas 3 - Le transfert des radionucléides dans la biosphère - Cas d'un « stockage bas » implanté avec une garde de 50 mètres en partie inférieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts horizontaux des solutés dans le Dogger

Les résultats des évaluations de dose aux personnes représentatives des groupes de référence hypothétiques retenus pour l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » sont présentés à la figure 6-45 et au tableau 6-22. Les résultats concernent l'incidence sanitaire relative au groupe de référence hypothétique « multi-activités » dans le cas des biosphères tempérée, chaude et froide, et des classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an), hormis pour la biosphère froide pour laquelle seul l'adulte est retenu (cf. Chapitre 4 du présent volume).

Pour cet exutoire, les résultats relatifs aux deux groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier » sont présentés à la figure 6-46 et au tableau 6-23 pour une biosphère tempérée et la classe d'âge adulte.

L'ensemble des résultats relatifs aux personnes représentatives du groupe de référence hypothétique « multi-activités » (cf. Tableau 6-22) montre que pour l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » (cas 3) :

- les incidences radiologiques relatives aux biosphères tempérées et chaude, exprimées en termes de doses, sont pilotées par le sélénium 79, avec des valeurs maximales de dose, obtenues pour une biosphère chaude, de l'ordre de $2{,}2 \times 10^{-2}$ mSv.an^{-1} pour l'adulte, 8×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans, et 1×10^{-1} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an ;
- les incidences radiologiques relatives à la biosphère froide (classe d'âge adulte) sont inférieures d'environ 45 % à celles obtenues avec la biosphère tempérée (classe d'âge adulte), soit de l'ordre de 1×10^{-2} mSv.an^{-1} ;
- en lien avec les dates d'occurrence respectives des débits molaires maximaux obtenus dans le Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse (cf. Tableau 6-16 du chapitre 6.3.1.3.5 du présent volume), la valeur maximale du cumul de dose est atteinte entre 350 000 ans et 400 000 ans, quelles que soient la biosphère type et la classe d'âge.

Les incidences radiologiques relatives aux groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier » en biosphère tempérée (classe d'âge adulte) (cf. Tableau 6-23) sont légèrement supérieures à celles obtenues avec le groupe de référence « multi-activités » en biosphère tempérée (classe d'âge adulte), respectivement d'environ 10 % et 45 %, soit de l'ordre de 3×10^{-2} mSv.an^{-1} pour le villageois jardinier.

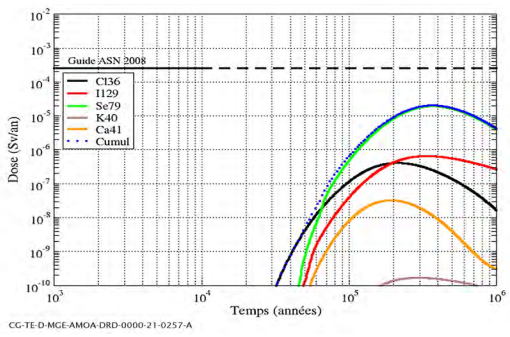
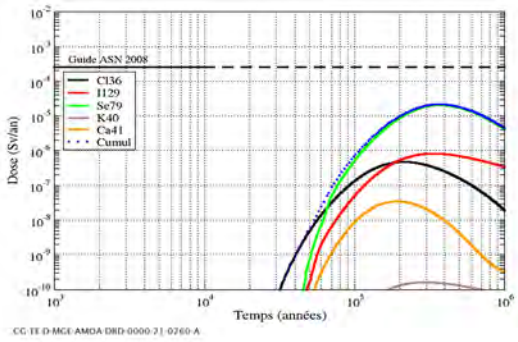
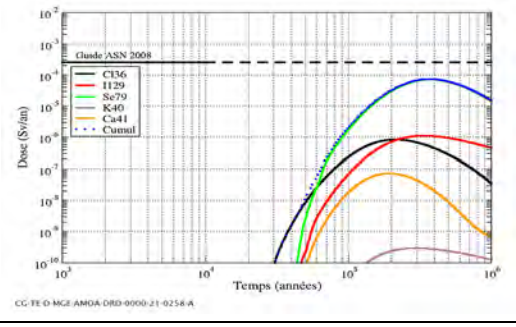
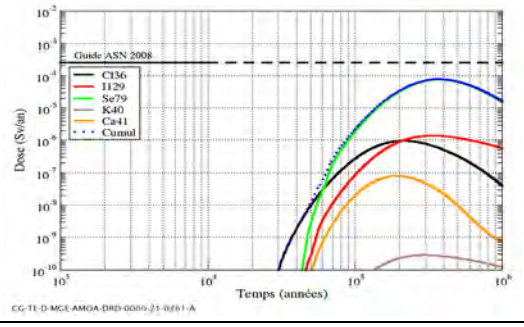
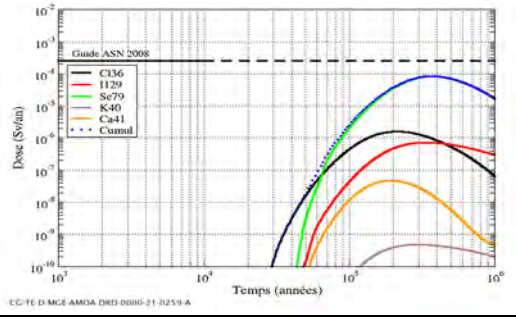
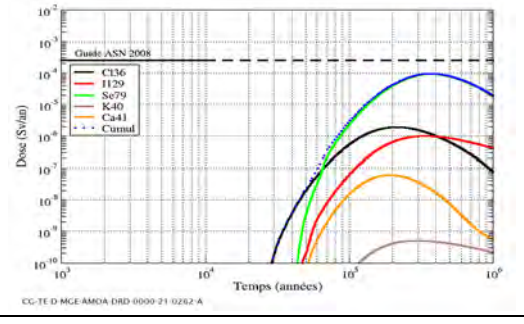
	Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})	
	Groupe de référence hypothétique « multi-activités »	
	Biosphère tempérée	Biosphère chaude
Adulte		
Enfant 10 ans		
Enfant 1 an		

Figure 6-45 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres),* ***exutoire Dogger (cas 3)*** *: historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Tableau 6-22 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres),* ***exutoire Dogger (cas 3)*** *: doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée, chaude et froide et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

		Exutoire Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})					
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités »					
		Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère froide	
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	4,1 × 10^{-4}	210	4,7 × 10^{-4}	210	4,1 × 10^{-4}	210
	^{129}I	6,5 × 10^{-4}	340	8,2 × 10^{-4}	340	6,3 × 10^{-4}	340
	^{79}Se	2,0 × 10^{-2}	370	2,1 × 10^{-2}	370	9,8 × 10^{-3}	370
	^{40}K	1,7 × 10^{-7}	300	1,6 × 10^{-7}	300	1,1 × 10^{-7}	300
	^{41}Ca	3,2 × 10^{-5}	190	3,5 × 10^{-5}	190	1,8 × 10^{-5}	190
	Cumul	2,0 × 10^{-2}	370	2,2 × 10^{-2}	370	1,1 × 10^{-2}	360
Enfant 10 ans	^{36}Cl	8,5 × 10^{-4}	210	9,7 × 10^{-4}	210		
	^{129}I	1,1 × 10^{-3}	340	1,4 × 10^{-3}	340		
	^{79}Se	7,2 × 10^{-2}	370	7,7 × 10^{-2}	370		
	^{40}K	2,9 × 10^{-7}	300	2,8 × 10^{-7}	300		
	^{41}Ca	7,2 × 10^{-5}	190	8,0 × 10^{-5}	190		
	Cumul	7,4 × 10^{-2}	370	7,9 × 10^{-2}	370		
Enfant 1 an	^{36}Cl	1,6 × 10^{-3}	210	1,9 × 10^{-3}	210		
	^{129}I	7,3 × 10^{-4}	340	1,0 × 10^{-3}	340		
	^{79}Se	8,3 × 10^{-2}	370	9,4 × 10^{-2}	370		
	^{40}K	4,8 × 10^{-7}	300	5,1 × 10^{-7}	300		
	^{41}Ca	4,7 × 10^{-5}	190	6,1 × 10^{-5}	190		
	Cumul	8,5 × 10^{-2}	370	9,6 × 10^{-2}	370		

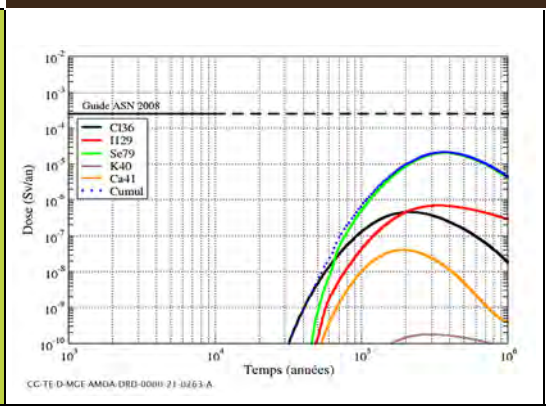
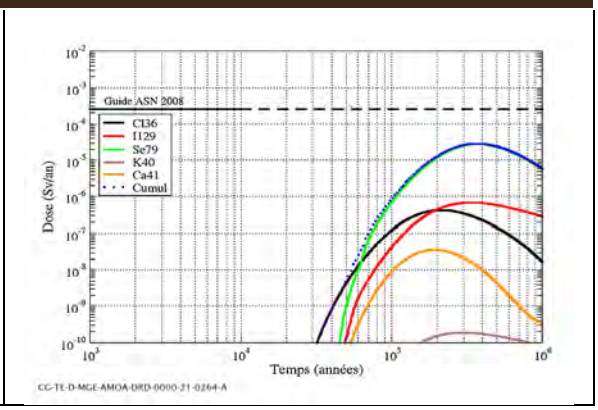
	Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})	
	Groupe de référence « éleveur de bovins »	Groupe de référence « villageois jardinier »
	Biosphère tempérée	
Adulte		

Figure 6-46 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres),* ***exutoire Dogger (cas 3)*** *: historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte*

Tableau 6-23 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres),* ***exutoire Dogger (cas 3)*** *: doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte*

		Exutoire Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})			
		Groupe de référence hypothétique « éleveur de bovins »		Groupe de référence hypothétique « villageois jardinier »	
		Biosphère tempérée			
	Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
Adulte	36Cl	4,6 × 10-4	210	4,3 × 10-4	210
	129I	7,1 × 10-4	340	6,9 × 10-4	340
	79Se	2,1 × 10-2	370	2,8 × 10-2	370
	40K	1,8 × 10-7	300	1,9 × 10-7	300
	41Ca	4,1 × 10-5	190	3,6 × 10-5	190
	Cumul	2,2 × 10-2	370	2,9 × 10-2	370

6.3.3 Les résultats des évaluations de performance relatives aux substances toxiques chimiques présentes dans les déchets

La présentation des résultats détaillés relatifs au transfert des substances toxiques chimiques en situation enveloppe du SEN est principalement axée sur les éléments mobiles, à savoir le bore (élément non sorbé en situation enveloppe) et les deux anions (sélénium et cyanure). Il s'agit des trois principales substances toxiques chimiques (bore et sélénium en particulier) présentant un débit massique en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien (toit ou mur) supérieur à 10^{-10} kg.an^{-1} (limite inférieure des graphes de débits massiques définie à la fin du chapitre 5.4 du présent volume) sur la période de simulation pour cette situation (cf. Figure 6-51 et figure 6-55 des chapitres 6.3.3.2.1 et 6.3.3.2.4 du présent volume).

6.3.3.1 Les résultats vis-à-vis de la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »

6.3.3.1.1 Le relâchement des substances toxiques chimiques dans les alvéoles de stockage HA

Les termes sources en bore et sélénium[80] dans les alvéoles de stockage HA (colis de déchet HA0[81], colis de déchets HA1 et HA2) en situation enveloppe, représentés sous forme de débits massiques en fonction du temps, sont présentés en figure 6-47 pour le quartier pilote HA et en figure 6-48 pour le quartier de stockage HA.

Comme pour le relâchement des radionucléides rappelé au chapitre 6.3.1.2 du présent volume, et après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage HA, l'application du modèle de relâchement « V_0.S » et les valeurs de paramètres associées à ce modèle en situation enveloppe du SEN (valeurs conservatives) aboutit à une durée globale de relâchement d'environ 9 000 ans pour les colis de déchets HA0 du quartier pilote HA et 2 000 ans pour les colis de déchets du quartier de stockage HA. Le bore, élément peu présent dans les déchets HA comme indiqué dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62), présente un relâchement de type labile.

[80] La seule substance toxique chimique de type anion mobile présente dans les déchets HA est le sélénium. En effet, comme indiqué dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62), le cyanure (autre anion mobile) n'est pas présent dans les déchets HA.

[81] Comme indiqué dans le document « Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture » (62), le bore n'est pas présent dans les déchets HA0 du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA.

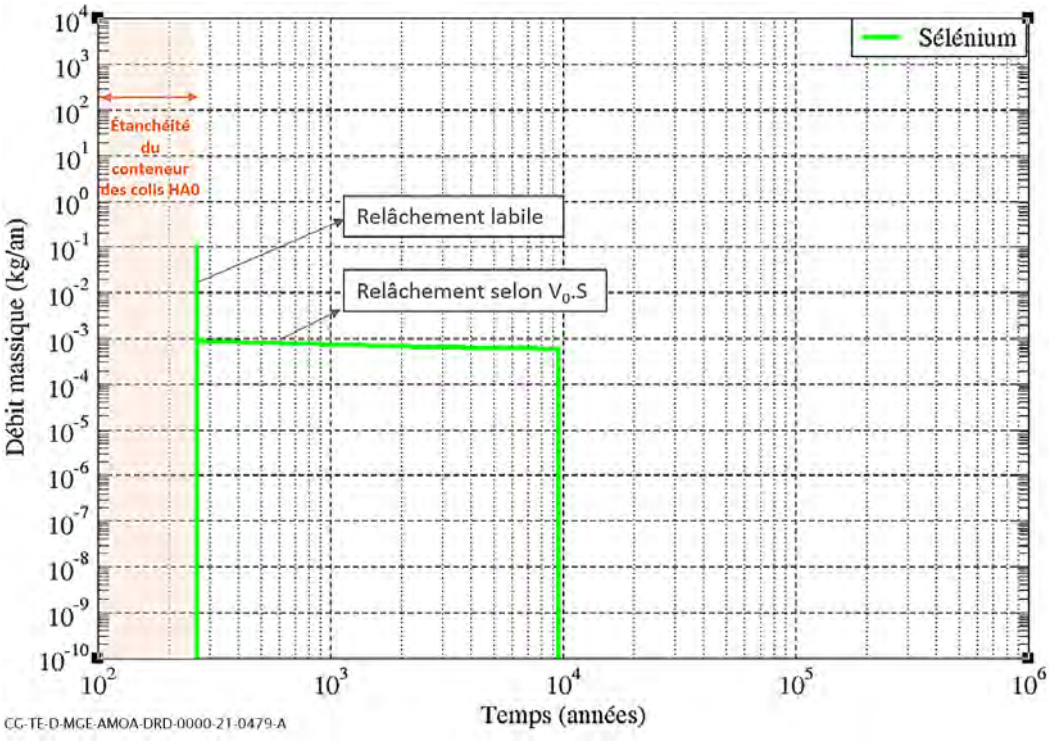


Figure 6-47 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : terme source en sélénium dans le quartier pilote HA*

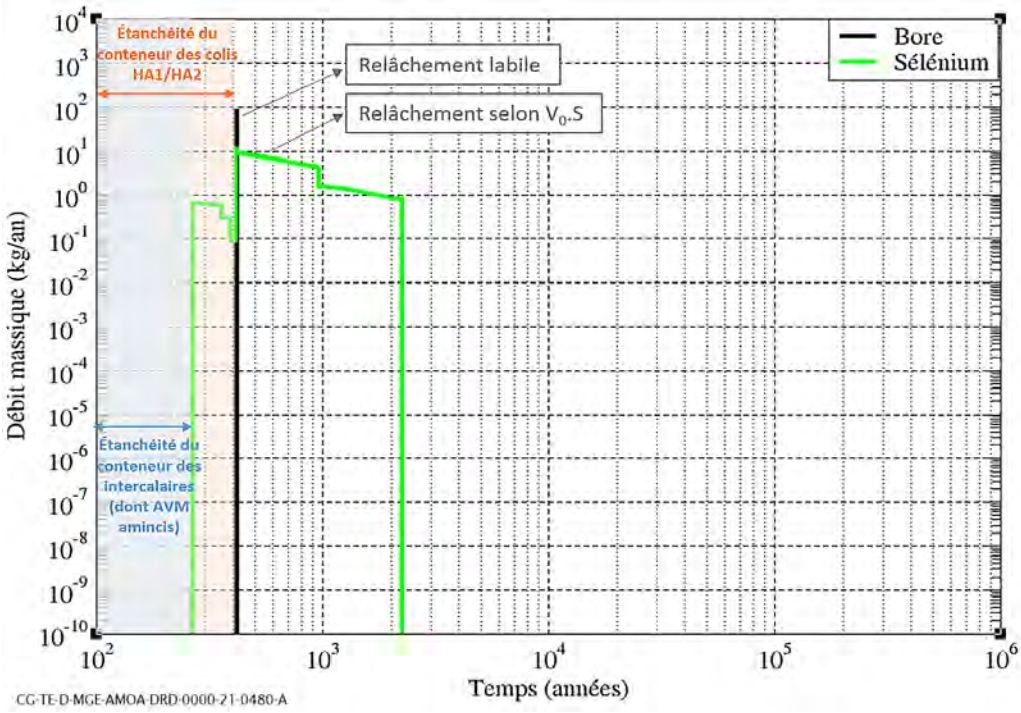


Figure 6-48 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : termes sources en bore et sélénium dans le quartier de stockage HA*

6.3.3.1.2 Le relâchement des substances toxiques chimiques dans les alvéoles de stockage MA-VL

La figure 6-49 présente les termes sources en bore, sélénium et cyanure dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL en situation enveloppe. Leur relâchement est de type labile.

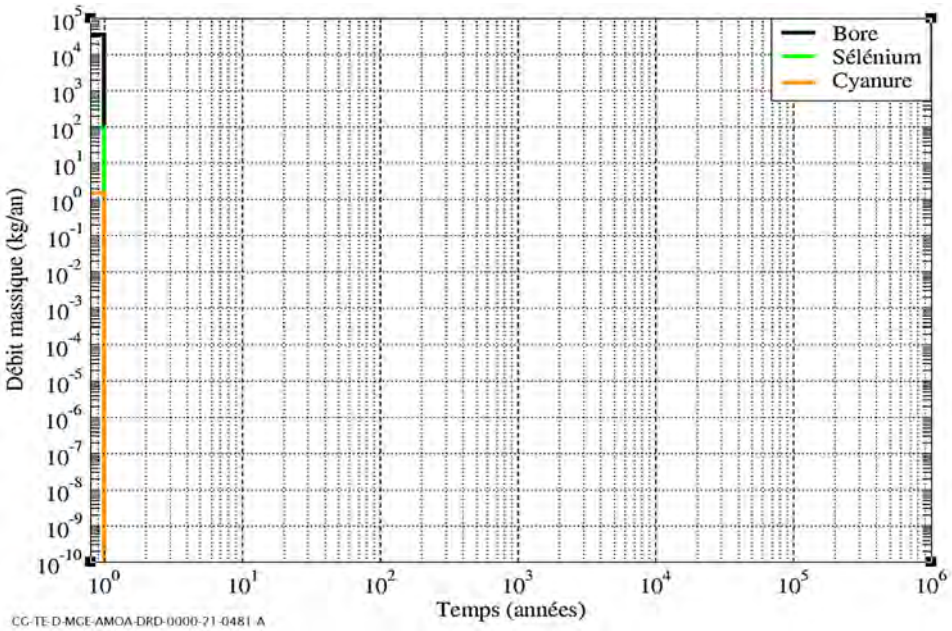


Figure 6-49 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : termes sources en bore, sélénium et cyanure dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL*

6.3.3.2 Les résultats vis-à-vis de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques »

Conformément à la démarche exposée au chapitre 1.4 du présent volume, l'incidence des substances toxiques chimique est évaluée en termes de performance par l'analyse des débits massiques en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien et en sortie des formations encaissantes.

6.3.3.2.1 Le transfert des substances toxiques chimiques dans les composants ouvragés et naturels du système de stockage - Cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien

a) L'analyse des débits massiques en sortie des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien pour le sélénium, le bore et le cyanure[82]

La figure 6-50 présente l'évolution des débits massiques en sélénium, bore et cyanure (éléments mobiles) au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Le tableau 6-24 présente les bilans des débits massiques cumulés sur un million d'années et des débits massiques maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages ».

[82] Le bore, considéré mobile en situation enveloppe, s'ajoute aux deux éléments mobiles déjà considérés pour la situation de référence (cf. Chapitre 6.2.3.2.1 du présent volume).

Il en ressort les observations suivantes :

- les débits massiques maximaux de sélénium, bore et cyanure, sommés au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, sont respectivement de l'ordre de 2×10^{-3} kg.an^{-1} à 1 000 000 ans, 6×10^{-2} kg.an^{-1} à 170 000 ans et 2×10^{-6} kg.an^{-1} à 200 000 ans ;
- en sortie des liaisons surface-fond, les débits massiques maximaux en sélénium, bore et cyanure, obtenus à 1 000 000 ans, sont très inférieurs aux débits massiques maximaux au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, et ce d'un facteur d'environ respectivement 7 000 pour le sélénium, 50 000 pour le bore et 100 000 pour le cyanure. Pour ce dernier, le débit massique maximal sortant des liaisons surface-fond reste inférieur à 10^{-10} kg.an^{-1} sur la durée de simulation retenue ;
- en un million d'années, environ 32 % du sélénium total initial, 86 % du bore total initial et 77 % du cyanure total initial ont atteint les limites (toit + mur) de la couche du Callovo-Oxfordien[83]. Le reste de l'inventaire en ces trois éléments est encore présent dans la couche du Callovo-Oxfordien.

[83] Les différences de comportement entre le sélénium et le bore sont imputables à la différence de mobilité de ces deux substances toxiques chimiques dans la couche du Callovo Oxfordien, notamment à la sorption du sélénium dans le béton de revêtement-soutènement des alvéoles MA-VL et à sa limite de solubilité dans la couche du Callovo-Oxfordien pour 80 % de son inventaire en situation enveloppe.

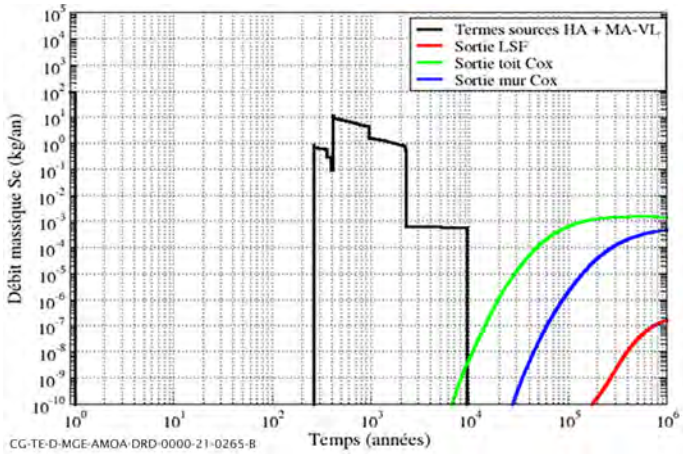
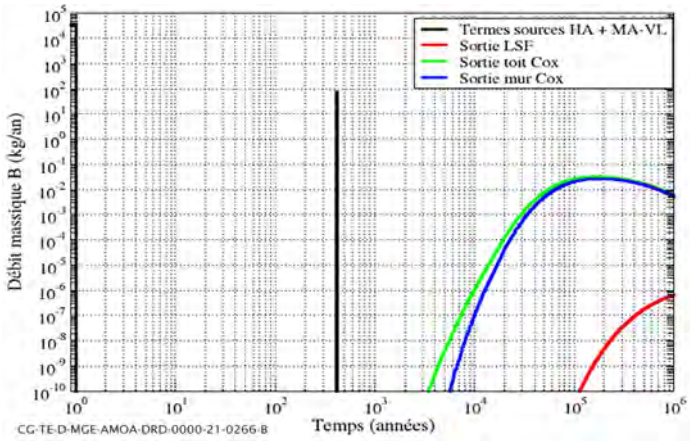
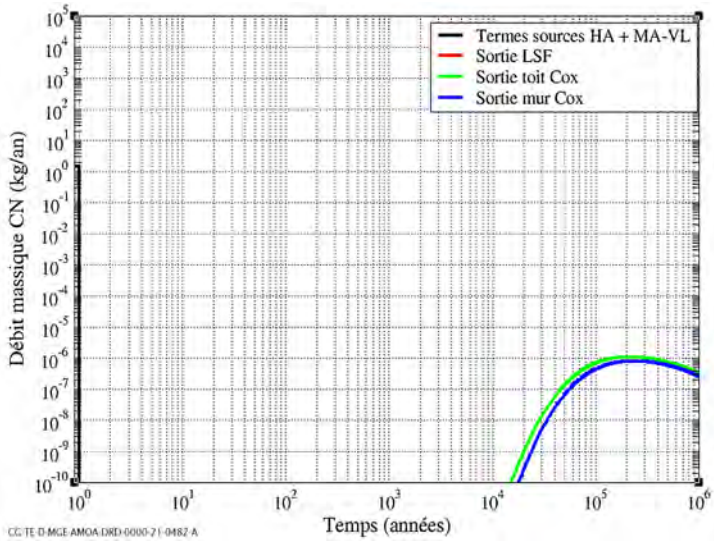
	Situation enveloppe : « Stockage haut » implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien
Sélénium	
Bore	
Cyanure	

Figure 6-50 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : historiques des débits massiques en sélénium (en haut), bore (au milieu) et cyanure (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)*

Tableau 6-24 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : bilan des débits massiques en sélénium, bore et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages »*

	Sélénium			Bore			Cyanure		
	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
Inventaire initial total en kilogrammes HA/MA-VL	4 900 kg			35 500 kg			1,5 kg		
Dont HA	98 %			0,2 %			0 %		
Dont MA-VL	2 %			99,8 %			100 %		
Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	26,6 %	1 500	550	46,3 %	34 000	160	44,0 %	1,1	210
Dont HA	26,2 %	1 500	570	0,1 %	140	85	---	---	---
Dont MA-VL	0,5 %	35	460	46,3 %	34 000	160	44,0 %	1,1	210
Par la voie « ouvrages »	~10^{-3} %	0,2	>1 000	<10^{-4} %	0,6	>1 000	~10^{-4} %	~10^{-5}	>1 000
Au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	5,1 %	470	>1 000	40,2 %	28 000	180	33,3 %	0,8	230
Dont HA	4,7 %	460	>1 000	0,1 %	40	280	---	---	---
Dont MA-VL	0,3 %	20	500	40,2 %	28 000	180	33,3 %	0,8	230

b) L'analyse des débits massiques en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien pour les substances toxiques chimiques présentant un débit massique supérieur à 10^{-10} kg.an^{-1} au toit de la couche du Callovo-Oxfordien

Hormis les éléments mobiles (sélénium, bore et cyanure) analysés ci-avant, d'autres substances toxiques chimiques présentent un débit massique supérieur à 10^{-10} kg.an^{-1} (limite inférieure des graphes de débit massique définie au chapitre 5.4 du présent volume) en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 6-51). Cependant, du fait de la sorption de ces éléments dans la couche du Callovo-Oxfordien, leurs débits massiques interviennent à des occurrences tardives et les maxima « théoriques » correspondants sont au-delà du million d'années.

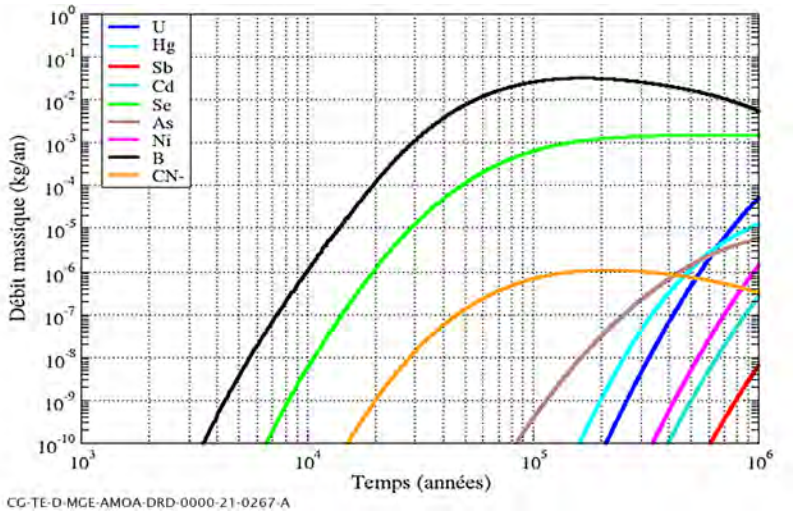


Figure 6-51 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : historiques des débits massiques des principales substances toxiques chimiques au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

6.3.3.2.2 Le transfert des substances toxiques chimiques dans le milieu géologique (des formations encaissantes[84] aux exutoires) - Cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts ascendants verticaux des solutés vers le Barrois (cas 1)

La figure 6-52 présente les débits massiques de sélénium, bore et cyanure au toit des formations encaissantes supérieures Oxfordien et Kimméridgien. Le tableau 6-25 compare ces débits massiques à l'inventaire total initial pour ces trois éléments. Il ressort de ces résultats :

- que le transfert dans l'Oxfordien permet de bénéficier d'une atténuation des débits massiques sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, d'un facteur 2 pour le sélénium, d'un facteur 3 pour le bore et d'un facteur 3,5 pour le cyanure. Les valeurs maximales des débits massiques au toit de l'Oxfordien sont d'environ 7×10^{-4} kg.an^{-1} pour le sélénium, 10^{-2} kg.an^{-1} pour le bore et $3,5 \times 10^{-7}$ kg.an^{-1} pour le cyanure. Les proportions de l'inventaire total initial en sélénium, en bore et en cyanure, atteignant les limites supérieures de l'Oxfordien, sont d'environ 7 % pour le sélénium, 20 % pour le bore et 16 % pour le cyanure ;

[84] Comme indiqué au chapitre 4 du présent volume et rappelé au chapitre 5.2.7 du présent volume, bien que n'ayant pas de fonctions de sûreté après fermeture, les formations encaissantes sont toutefois représentées jusqu'aux exutoires afin de permettre la quantification des incidences potentielles sur l'homme.

- qu'en situation enveloppe (cas d'un « stockage haut »), le transfert dans le Kimméridgien conduit à une atténuation supplémentaire très limitée des débits massiques, et les proportions de l'inventaire total initial en sélénium, en bore et en cyanure, atteignant le Barrois (toit du Kimméridgien), sont d'environ 5 % en sélénium, 18,5 % en bore et 12,5 % en cyanure.

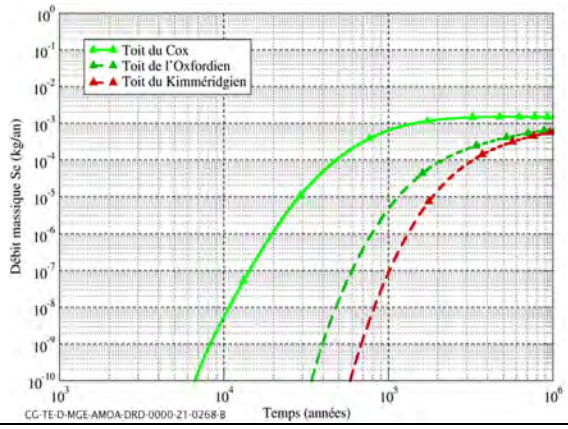
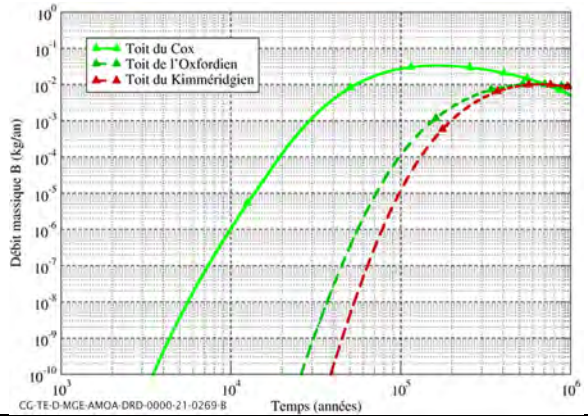
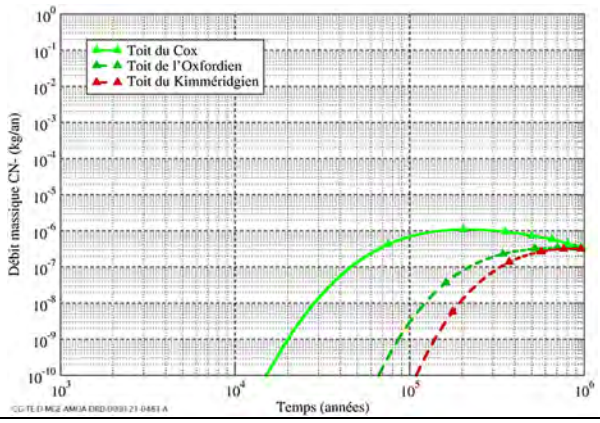
	Situation enveloppe : « Stockage haut » implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien
Sélénium	
Bore	
Cyanure	

Figure 6-52 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Barrois (cas 1)*** *: historiques des débits massiques en sélénium (en haut), bore (au milieu) et cyanure (en bas), depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusqu'aux toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien*

Tableau 6-25 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Barrois (cas 1)*** *: bilan des débits massiques en sélénium, bore et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à l'exutoire Barrois (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial)*

		Sélénium			Bore			Cyanure		
		% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
	Inventaire initial total en kilogrammes HA/MA-VL	4 900 kg			35 500 kg			1,5 kg		
	Dont HA	98 %			0,2 %			0 %		
	Dont MA-VL	2 %			99,8 %			100 %		
Vers l'exutoire au Barrois	Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	26,6 %	1 500	550	46,3 %	34 000	160	44,0 %	1,1	210
	Toit de l'Oxfordien	7,3 %	690	>1 000	19,9 %	10 000	600	16,0 %	0,34	740
	Toit du Kimméridgien	5,2 %	580	>1 000	18,4 %	10 000	660	12,6 %	0,32	860

6.3.3.2.3 Le transfert des substances toxiques chimiques dans le milieu géologique (des formations encaissantes[85] aux exutoires) - Cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts horizontaux des solutés dans l'Oxfordien calcaire (cas 2)

La figure 6-53 présente les débits massiques de sélénium, bore et cyanure au niveau de la zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien et au niveau de l'Ornain.

Le tableau 6-26 compare les débits massiques à ces exutoires (pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse), rivière Ornain), à l'inventaire total initial pour ces trois éléments.

Il ressort de ces résultats :

- pour l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » :
  - ✓ le transfert par convection (et dispersion) dans l'Oxfordien conduit à une faible atténuation des débits massiques sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, comprise entre un facteur 1,2 et 1,4 selon l'élément. Les valeurs maximales des débits massiques au niveau de la zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien sont d'environ $1,5 \times 10^{-3}$ kg.an^{-1} pour le sélénium, $2,5 \times 10^{-2}$ kg.an^{-1} pour le bore et 8×10^{-7} kg.an^{-1} pour le cyanure. Les proportions de l'inventaire total initial en sélénium, en bore et en cyanure, atteignant la zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien, sont d'environ 14 % pour le sélénium, 32 % pour le bore et 28 % pour le cyanure ;
- pour l'exutoire « Rivière Ornain » :
  - ✓ le transfert vers l'exutoire Ornain conduit également à une faible atténuation des débits massiques sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, comprise entre un facteur 1,2 et 1,6 selon l'élément. Les proportions de l'inventaire total initial en sélénium, en bore et en cyanure, atteignant l'exutoire Ornain, sont d'environ 10 % pour le sélénium, 27 % pour le bore et 24 % pour le cyanure.

[85] Comme indiqué au chapitre 4 du présent volume et rappelé au chapitre 5.2.7 du présent volume, bien que n'ayant pas de fonctions de sûreté après fermeture, les formations encaissantes sont toutefois représentées jusqu'aux exutoires afin de permettre la quantification des incidences potentielles sur l'homme.

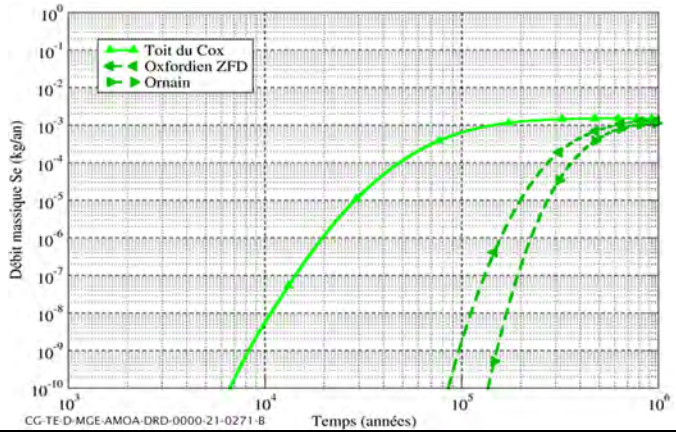
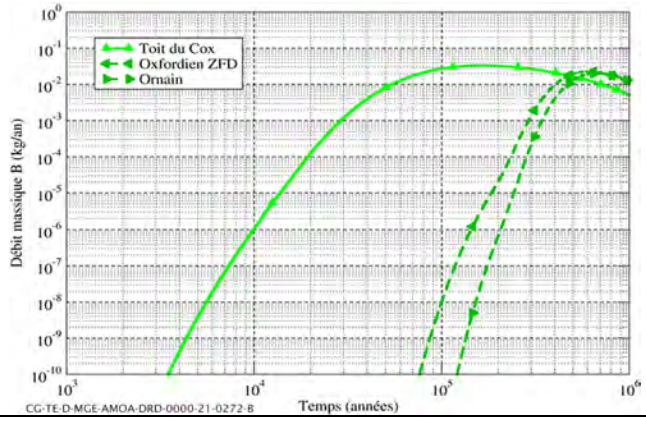
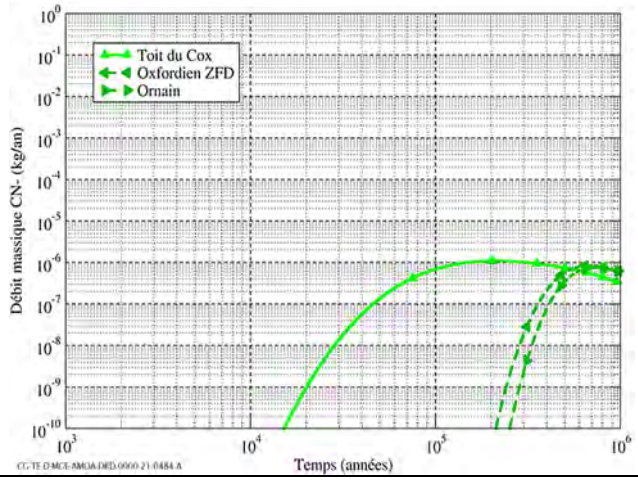
	Situation enveloppe : « Stockage haut » implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien
Sélénium	
Bore	
Cyanure	

Figure 6-53 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2)*** *: historiques des débits massiques en sélénium (en haut), bore (au milieu) et cyanure (en bas), depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires Oxfordien (zone de fracturation diffuse) et Ornain*

Tableau 6-26 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2)*** *: bilan des débits massiques en sélénium, bore et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires Oxfordien et Ornain (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial)*

		Sélénium			Bore			Cyanure		
		% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max.(milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max.(milliers d'années)
	Inventaire initial total en kilogrammes HA/MA-VL	4 900 kg			35 500 kg			1,5 kg		
	Dont HA	98 %			0,2 %			0 %		
	Dont MA-VL	2 %			99,8 %			100 %		
Vers les exutoires Oxfordien et Ornain	Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	26,6 %	1 500	550	46,3 %	34 000	160	44,0 %	1,1	210
	Oxfordien (zone de fracturation diffuse)	13,9 %	1 400	>1 000	32,2 %	23 000	600	28,2 %	0,8	670
	Ornain	10,3 %	1 200	>1 000	27,3 %	20 000	670	23,7 %	0,75	740

6.3.3.2.4 Le transfert des substances toxiques chimiques dans les composants ouvragés et naturels du système de stockage - Cas d'un « stockage bas » implanté avec une garde de 50 mètres en partie inférieure du Callovo-Oxfordien

a) L'analyse des débits massiques en sortie des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien pour le sélénium, le bore et le cyanure

La figure 6-54 présente l'évolution des débits massiques en sélénium, bore et cyanure (éléments mobiles) au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Le tableau 6-27 présente les bilans des débits massiques cumulés sur un million d'années et des débits massiques maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages ». Il en ressort les observations suivantes :

- les débits massiques maximaux de sélénium, bore et cyanure, sommés au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, sont respectivement de l'ordre de 2×10^{-3} kg.an^{-1} à 1 000 000 ans, 6×10^{-2} kg.an^{-1} à 130 000 ans et 2×10^{-6} kg.an^{-1} à 200 000 ans ;
- en sortie des liaisons surface-fond, les débits massiques maximaux en sélénium, bore et cyanure, obtenus à 1 000 000 ans, sont très inférieurs aux débits massiques maximaux au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, d'environ cinq ordres de grandeur pour le sélénium et le bore et six ordres de grandeur pour le cyanure. Pour ce dernier, le débit massique maximal sortant des liaisons surface-fond reste inférieur à 10^{-10} kg.an^{-1} sur la durée de simulation retenue ;
- en un million d'années, environ 28 % du sélénium total initial, 87 % du bore total initial et 77 % du cyanure total initial ont atteint les limites (toit + mur) de la couche du Callovo-Oxfordien. Le reste de l'inventaire en ces trois éléments est encore présent dans la couche du Callovo-Oxfordien.

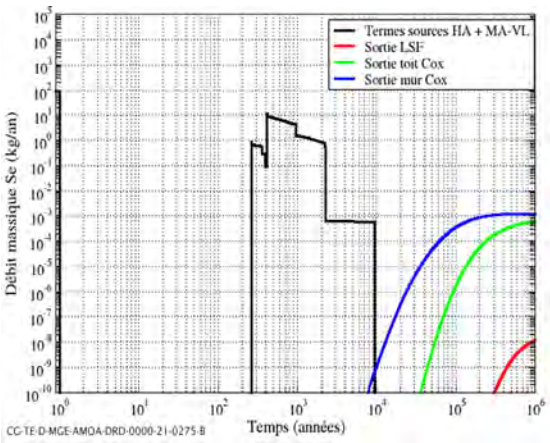
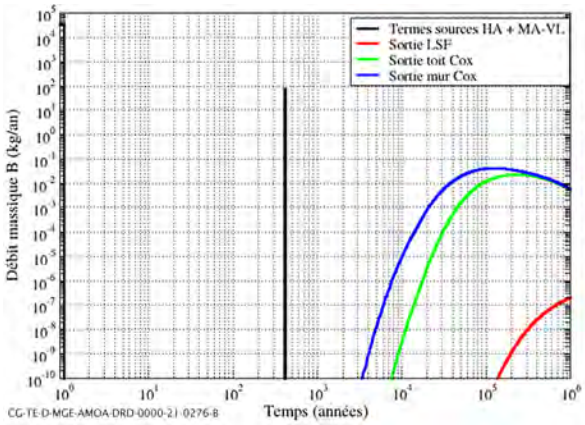
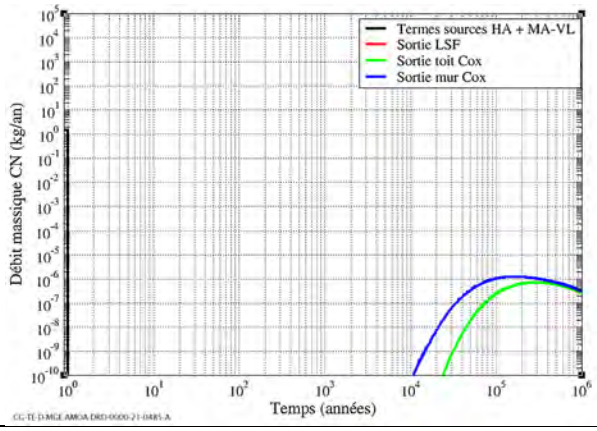
	Situation enveloppe : « Stockage bas » implanté à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien
Sélénium	
Bore	
Cyanure	

Figure 6-54 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : historiques des débits massiques en sélénium (en haut), bore (au milieu) et cyanure (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)*

Tableau 6-27 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : bilan des débits massiques en sélénium, bore et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages »*

	Sélénium			Bore			Cyanure		
	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max.(milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max.(milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max.(milliers d'années)
Inventaire initial total en kilogrammes HA/MA-VL	4 900 kg			35 500 kg			1,5 kg		
Dont HA	98 %			0,2 %			0 %		
Dont MA-VL	2 %			99,8 %			100 %		
Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	6,8 %	610	>1 000	35,8 %	23 000	230	30,9 %	0,7	290
Dont HA	6,5 %	600	>1 000	0,1 %	40	270	---	---	---
Dont MA-VL	0,3 %	20	620	35,7 %	23 000	230	30,9 %	0,7	290
Par la voie « ouvrages »	<10-4 %	0,01	>1 000	~10-4 %	0,2	>1 000	~10-5 %	~10-6	>1 000
Au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	21,3 %	1 300	760	51,0 %	42 000	120	46,3 %	1,2	170
Dont HA	20,7 %	1 200	830	0,1 %	130	90	---	---	---
Dont MA-VL	0,5 %	35	360	50,8 %	42 000	120	46,3 %	1,2	170

b) L'analyse des débits massiques en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien pour les substances toxiques chimiques présentant un débit massique supérieur à 10^{-10} kg.an^{-1} au mur de la couche du Callovo-Oxfordien

Hormis les éléments mobiles (sélénium, bore et cyanure) analysés ci-avant, d'autres substances toxiques chimiques présentent un débit massique supérieur à 10^{-10} kg.an^{-1} en sortie au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 6-55). Cependant, du fait de la sorption de ces éléments dans la couche du Callovo-Oxfordien, leurs débits massiques interviennent à des occurrences tardives et les maxima « théoriques » correspondants sont supérieurs au million d'années.

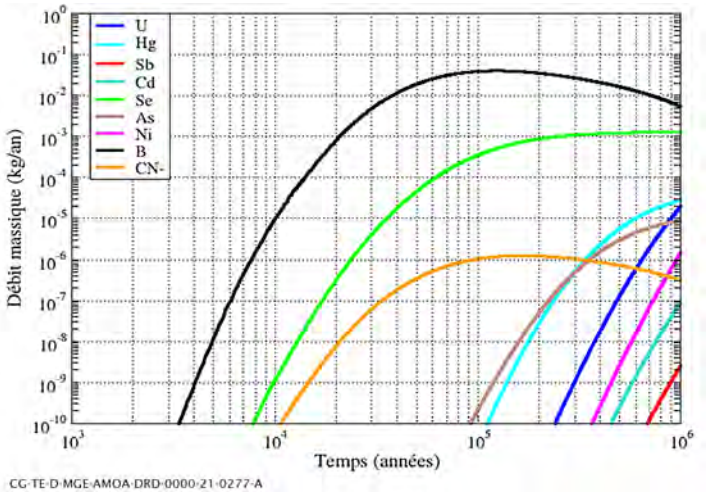


Figure 6-55 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : historiques des débits massiques des principales substances toxiques chimiques au mur de la couche du Callovo-Oxfordien*

6.3.3.2.5 Le transfert des substances toxiques chimiques dans le milieu géologique (des formations encaissantes[86] aux exutoires) - Cas d'un « stockage bas » implanté avec une garde de 50 mètres en partie inférieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts horizontaux des solutés dans le Dogger (cas 3)

La figure 6-56 présente les débits massiques de sélénium, bore et cyanure au niveau de la zone de fracturation diffuse dans le Dogger. Le tableau 6-28 compare ces débits massiques à l'inventaire total initial pour ces trois éléments. Il ressort de ces résultats :

- le transfert par convection (et dispersion) dans les horizons poreux du Dogger, après traversée des semi-perméables, permet de bénéficier d'une atténuation des débits massiques sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, respectivement d'un facteur 4 pour le sélénium, d'un facteur 12 pour le bore et d'un facteur 7,5 pour le cyanure. Les valeurs maximales des débits massiques au niveau de la zone de fracturation diffuse dans le Dogger sont d'environ 3×10^{-4} kg.an^{-1} pour le sélénium, $3{,}5 \times 10^{-3}$ kg.an^{-1} pour le bore et 2×10^{-7} kg.an^{-1} pour le cyanure. Les proportions de l'inventaire total initial en sélénium, en bore et en cyanure, atteignant la zone de fracturation diffuse dans le Dogger, sont d'environ 5 % pour le sélénium, 5 % pour le bore et 6 % pour le cyanure.

[86] Comme indiqué au chapitre 4 du présent volume et rappelé au chapitre 5.2.7 du présent volume, bien que n'ayant pas de fonctions de sûreté après fermeture, les formations encaissantes sont toutefois représentées jusqu'aux exutoires afin de permettre la quantification des incidences potentielles sur l'homme.

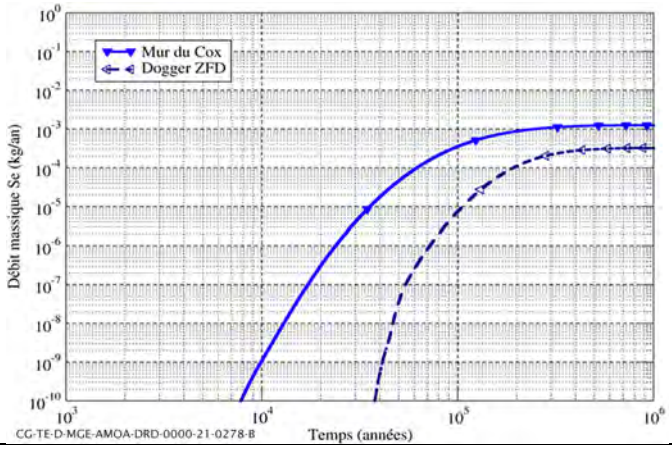
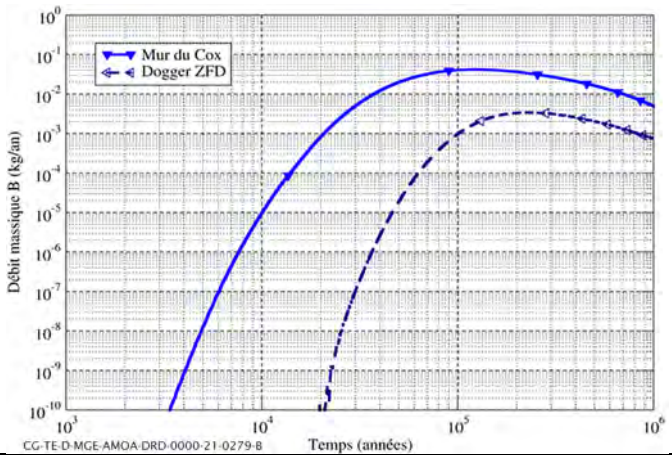
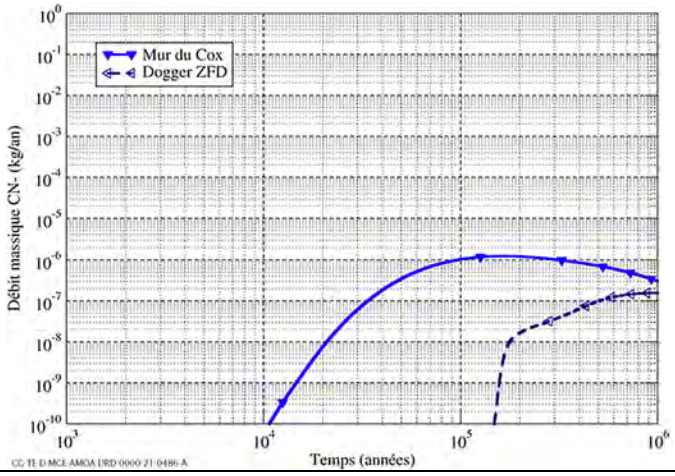
	Situation enveloppe : « Stockage bas » implanté à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien
Sélénium	
Bore	
Cyanure	

Figure 6-56 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres),* ***exutoire Dogger (cas 3)*** *: historiques des débits massiques en sélénium (en haut), bore (au milieu) et cyanure (en bas), depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à l'exutoire Dogger (zone de fracturation diffuse)*

Tableau 6-28 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres),* ***exutoire Dogger (cas 3)*** *: bilan des débits massiques en sélénium, bore et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à l'exutoire Dogger (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial)*

		Sélénium			Bore			Cyanure		
		% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)	% quantité initiale	Débit massique max. ($\times 10^{-6}$ kg.an^{-1})	Date du max. (milliers d'années)
	Inventaire initial total en kilogrammes HA/MA-VL	4 900 kg			35 500 kg			1,5 kg		
	Dont HA	98 %			0,2 %			0 %		
	Dont MA-VL	2 %			99,8 %			100 %		
Vers l'exutoire Dogger	Au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	21,3 %	1 300	760	51,0 %	42 000	120	46,3 %	1,2	170
	Dogger (zone de fracturation diffuse)	4,8 %	320	930	4,9 %	3 400	230	5,8 %	0,2	>1 000

6.3.4 Les résultats des incidences sanitaires sur l'homme liées au transfert potentiel de substances toxiques chimiques aux exutoires

6.3.4.1 Cas 1 - Le transfert des substances toxiques chimiques dans la biosphère - Cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts ascendants verticaux des solutés vers le Barrois

La figure 6-57 présente les évolutions de concentration en substances toxiques chimiques à l'exutoire « Pompage dans le Barrois ». Le tableau 6-29 donne les valeurs maximales de concentration associées et les occurrences de ces maxima.

Les concentrations à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » sont dominées par le bore avec un maximum de l'ordre de 10^{-1} µg.L^{-1} à 660 000 ans, soit quatre ordres de grandeur inférieur à la NQE de 1 000 µg.L^{-1}. La concentration maximale en sélénium est de l'ordre de 7,5 × 10^{-3} µg.L^{-1} à 10^{6} ans, soit plus de trois ordres de grandeur inférieure à la NQE de 10 µg.L^{-1}. Les concentrations maximales des autres substances toxiques chimiques sont inférieures à 10^{-4} µg.L^{-1}, et donc de plusieurs ordres de grandeur inférieures à leurs NQE respectives.

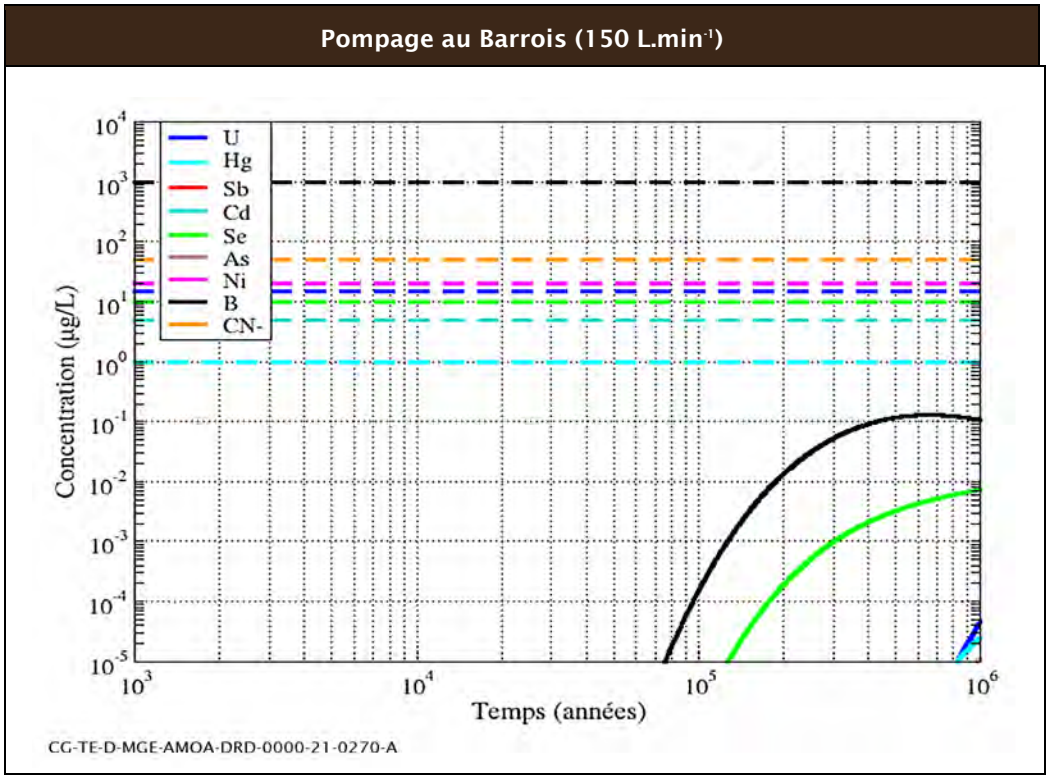


Figure 6-57 *Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Barrois (cas 1)*** *: historiques des concentrations en principales substances toxiques chimiques à l'exutoire « Pompage dans le Barrois »*

Tableau 6-29 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : concentrations maximales en principales substances toxiques chimiques et occurrences des concentrations maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois »*

		Exutoire Pompage au Barrois (150 L.min^{-1})	
Toxique chimique	**Norme qualité Environnementale (µg.L^{-1})**	**Concentration max.(µg.L^{-1})**	**Date de concentration ma.(milliers d'années)**
B	1 000	$1,3 \times 10^{-1}$	660
Se	10	$7,4 \times 10^{-3}$	≥1 000
U	15	$4,7 \times 10^{-5}$	≥1 000
Hg	1	$2,5 \times 10^{-5}$	≥1 000
As	10	$1,1 \times 10^{-5}$	≥1 000
CN	50	$4,1 \times 10^{-6}$	860
Ni	20	$1,1 \times 10^{-9}$	≥1 000
Sb	5	$<10^{-10}$	≥1 000
Cd	5	$<<10^{-10}$	≥1 000

6.3.4.2 Cas 2 - Le transfert des substances toxiques chimiques dans la biosphère - Cas d'un « stockage haut » implanté avec une garde de 50 mètres en partie supérieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts horizontaux des solutés dans l'Oxfordien calcaire

La figure 6-58 donne les évolutions de concentration en substances toxiques chimiques aux exutoires « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Rivière Ornain ». Le tableau 6-30 donne les valeurs maximales de concentration associées et les occurrences de ces maxima.

Les concentrations à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » sont dominées par le bore avec un maximum de l'ordre de $4,5 \times 10^{-1}$ µg.L^{-1} à 600 000 ans, inférieur d'un facteur environ 2 500 à la NQE de 1 000 µg.L^{-1}. La concentration maximale en sélénium est de l'ordre de $2,6 \times 10^{-2}$ µg.L^{-1} à 10^{6} ans, inférieure d'un facteur environ 400 à la NQE de 10 µg.L^{-1}. Les concentrations maximales des autres substances toxiques chimiques sont inférieures à 10^{-4} µg.L^{-1}, et donc de plusieurs ordres de grandeur inférieures à leurs NQE respectives.

Les concentrations à l'exutoire « Rivière Ornain » de l'ensemble des substances toxiques chimiques sont très faibles, largement inférieures à 10^{-3} µg.L^{-1}.

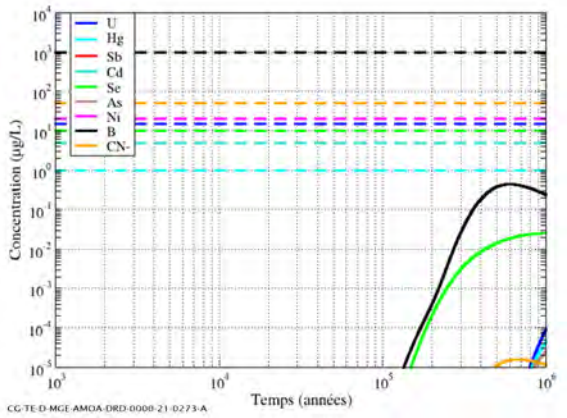
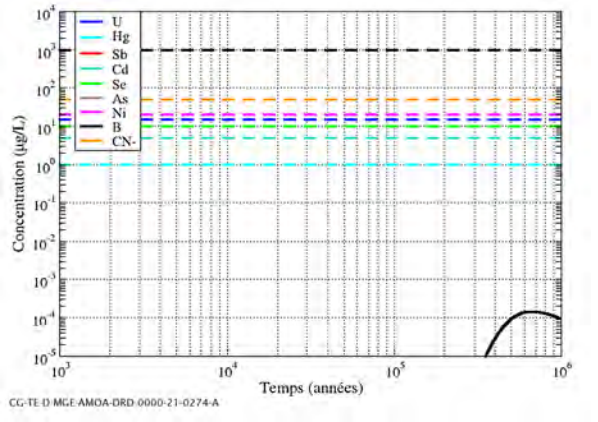
Pompage à l'Oxfordien (100 L.min^{-1})	Rivière Ornain (2,64 × 10^{5} L.min^{-1})
	

Figure 6-58 *Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2)****: historiques des concentrations en principales substances toxiques chimiques aux exutoires « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Rivière Ornain »*

Tableau 6-30 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2)*** *: concentrations maximales en principales substances toxiques chimiques et occurrences des concentrations maximales aux exutoires « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Rivière Ornain »*

		Exutoire Pompage à l'Oxfordien (100 L.min^{-1})		Exutoire Rivière Ornain (2,64 × 10^{5} L.min^{-1})	
Toxique chimique	Norme qualité Environnementale (µg.L^{-1})	Concentration max. (µg.L^{-1})	Date de concentration max. (milliers d'années)	Concentration max. (µg.L^{-1})	Date de concentration max. (milliers d'années)
B	1 000	4,4 × 10^{-1}	600	1,5 × 10^{-4}	670
Se	10	2,6 × 10^{-2}	≥1 000	8,3 × 10^{-6}	≥1 000
U	15	9,6 × 10^{-5}	≥1 000	1,7 × 10^{-8}	≥1 000
Hg	1	4,4 × 10^{-5}	≥1 000	1,2 × 10^{-8}	≥1 000
As	10	2,5 × 10^{-5}	≥1 000	6,9 × 10^{-9}	≥1 000
CN	50	1,6 × 10^{-5}	670	5,4 × 10^{-9}	740
Ni	20	<<10^{-10}	---	<<10^{-10}	---
Sb, Cd	5	<<10^{-10}	---	<<10^{-10}	---

6.3.4.3 Cas 3 - Le transfert des substances toxiques chimiques dans la biosphère - Cas d'un « stockage bas » implanté avec une garde de 50 mètres en partie inférieure du Callovo-Oxfordien et d'une configuration maximisant les transferts horizontaux des solutés dans le Dogger

La figure 6-59 donne les évolutions de concentration en substances toxiques chimiques à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) ». Le tableau 6-31 donne les valeurs maximales de concentration associées et les occurrences de ces maxima.

Les concentrations à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » sont dominées par le bore avec un maximum de l'ordre de $6{,}5 \times 10^{-2}$ µg.L^{-1} à 230 000 ans, soit quatre ordres de grandeur inférieur à la NQE de 1 000 µg.L^{-1}. La concentration maximale en sélénium est d'environ 6×10^{-3} µg.L^{-1} à 930 000 ans, soit plus de trois ordres de grandeur inférieure à la NQE de 10 µg.L^{-1}. Les concentrations maximales des autres substances toxiques chimiques sont inférieures à 10^{-4} µg.L^{-1}, et donc de plusieurs ordres de grandeur inférieures à leurs NQE respectives.

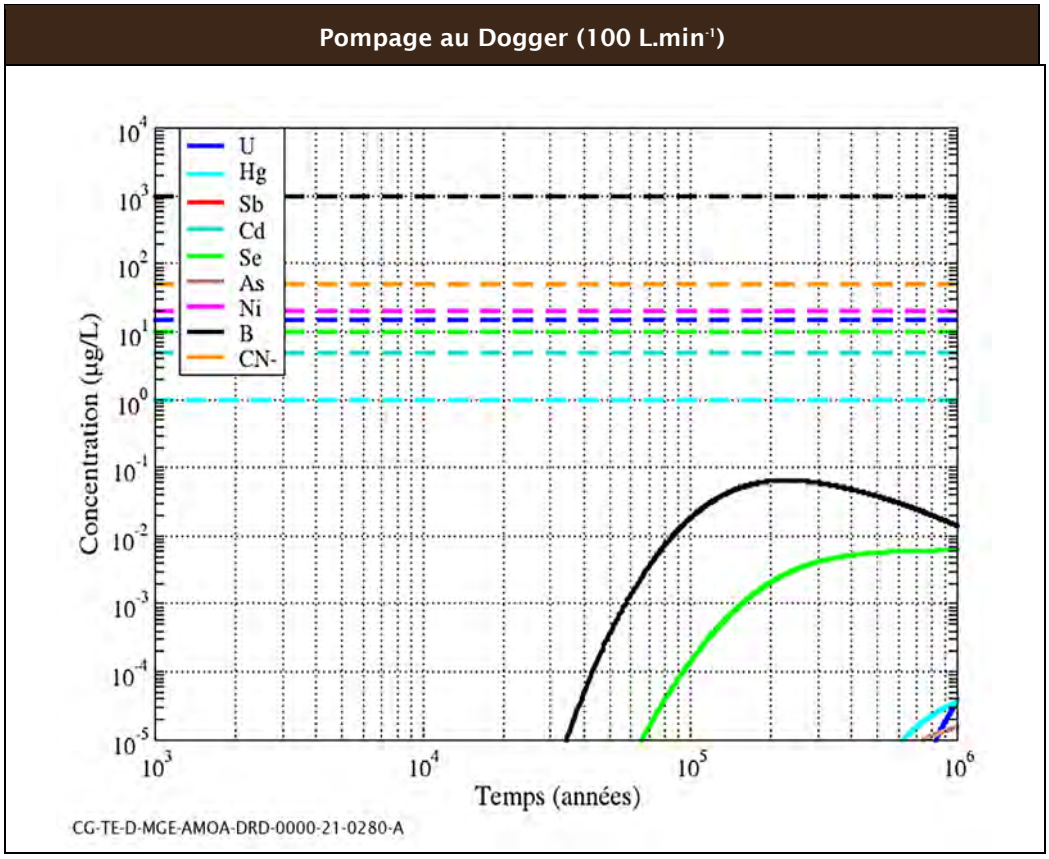


Figure 6-59 *Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres),* ***exutoire Dogger (cas 3)*** *: historiques des concentrations en principales substances toxiques chimiques à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »*

Tableau 6-31 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres),* ***exutoire Dogger (cas 3)*** *: concentrations maximales en principales substances toxiques chimiques et occurrences des concentrations maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »*

		Exutoire Pompage au Dogger (100 L.min^{-1})	
Toxique chimique	**Norme qualité Environnementale (µg.L^{-1})**	**Concentration max. (µg.L^{-1})**	**Date de concentration max. (milliers d'années)**
B	1 000	$6,5 \times 10^{-2}$	230
Se	10	$6,2 \times 10^{-3}$	930
U	15	$3,9 \times 10^{-5}$	≥1 000
Hg	1	$3,6 \times 10^{-5}$	≥1 000
As	10	$1,5 \times 10^{-5}$	≥1 000
CN	50	$3,0 \times 10^{-6}$	≥1 000
Ni	20	$3,0 \times 10^{-7}$	≥1 000
Sb, Cd	5	$<<10^{-10}$	---

7

Les enseignements tirés du scénario d'évolution normale

7.1 La vérification de la performance du système de stockage et de son environnement 426

7.2 La vérification des incidences sanitaires sur l'homme liées à un éventuel transfert à long terme de radionucléides dans la biosphère 437

7.3 La vérification des incidences sanitaires sur l'homme liées à un éventuel transfert de substances toxiques chimiques dans la biosphère 450

L'analyse détaillée des évaluations quantitatives des deux situations du scénario d'évolution normale permet de dégager divers enseignements en regard d'une part des objectifs de ce scénario (cf. Chapitre 1 du présent volume) et d'autre part, des données/hypothèses/modèles retenus pour décrire chacune de ces situations :

- vis-à-vis de la vérification de la performance des composants du système de stockage en regard des fonctions de sûreté auxquelles ils contribuent. Cette analyse conduit à examiner la bonne réalisation des fonctions de sûreté après fermeture du stockage à l'aide d'indicateurs appropriés et d'apporter des éléments sur le poids des composants, paramètres et processus dans la maitrise du comportement du système de stockage ;
- vis-à-vis des objectifs de protection de l'homme et de l'environnement vis-à-vis des radionucléides et des substances toxiques chimiques. Cette analyse conduit également à examiner les résultats des indicateurs appropriés et des situations retenues.

7.1 La vérification de la performance du système de stockage et de son environnement

Pour mémoire, afin de répondre à l'objectif fondamental de protection des personnes et de l'environnement envers les risques liés à la dissémination des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets, l'Andra décline cet objectif en fonctions de sûreté en après fermeture (cf. Chapitre 1.1.2.2 du présent volume).

Pour la réalisation de ces fonctions, les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien jouent un rôle fondamental et cette couche doit constituer la voie de migration privilégiée des radionucléides et des substances toxiques chimiques. Les colis, les composants ouvragés et l'architecture à terminaison dans son ensemble contribuent également à limiter le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques jusqu'à la biosphère.

Les indicateurs retenus pour vérifier le caractère favorable des performances des composants et la robustesse du système de stockage sont en lien avec des critères d'appréciation de l'atténuation et du retard du transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques offerts par chaque composant contribuant à la réalisation de fonctions de sûreté du système de stockage (cf. Chapitre 1.5.1 du présent volume). Ils permettent de s'assurer pour le scénario d'évolution normale et pour la sûreté après fermeture, du caractère favorable des performances des composants du système de stockage participant aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvragés, roche hôte) puis dans leur ensemble.

Les chapitres suivants présentent divers enseignements dégagés de l'analyse des résultats associés à ces indicateurs intermédiaires pour le scénario d'évolution normale en regard d'une part des dispositions mises en œuvre pour assurer les fonctions de sûreté et, d'autre part des hypothèses, modèles et données retenus pour décrire chacune de ces situations.

7.1.1 Le rappel des choix structurants du scénario d'évolution normale

Tel que décrit dans le chapitre 1.3.2.1 du présent volume, le scénario d'évolution normale vise à représenter l'évolution attendue (ou normale) sur le long terme du système de stockage et de son environnement en s'appuyant sur des argumentaires fondés sur le socle de connaissances scientifiques et technologiques et en considérant que toutes les fonctions de sûreté après fermeture sont réalisées. Il est décliné en deux situations dites l'une « de référence » et l'autre « d'enveloppe ».

La définition de la situation de référence repose sur un ensemble d'hypothèses et données dont la logique de sélection est de retenir celles qui sont le plus étayées scientifiquement dans la gamme de

valeurs disponible. Cela conduit en s'appuyant sur le panel des connaissances scientifiques et technologiques acquises, à retenir des représentations de composants et/ou de processus avec des modèles et données qualifiées de « au meilleur de la connaissance ».

Cette situation de référence, en cohérence avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN, intègre ainsi l'évolution phénoménologique du système de stockage et de son environnement en s'appuyant sur la description qui en est faite dans le volume 7 du présent rapport.

Le scénario d'évolution normale intègre toutefois des incertitudes résiduelles de connaissances. L'approche a conduit d'une part à intégrer des conservatismes dans la situation de référence pour prendre en compte ces incertitudes résiduelles et d'autre part à définir une situation qualifiée d'enveloppe. Celle-ci est définie sur la base des choix de sûreté qui permettent de structurer les hypothèses de représentation du système de stockage et son environnement en intégrant (cf. Chapitre 1.3.2.1 du présent volume) :

- les exigences de sûreté applicables à l'installation souterraine de Cigéo pour l'après fermeture ;
- la gestion d'incertitudes de connaissances résiduelles (de natures scientifique et/ou technologique) n'induisant pas de perte de fonctions de sûreté dans le scénario d'évolution normale.

Selon cette approche, pour les deux situations, le choix de représentation des composants et de leurs performances conduit au choix de valeurs de paramètres dans la gamme de valeurs disponibles. Selon le niveau de connaissances disponibles acquis à date, les choix retenus peuvent présenter, d'une part, des degrés de conservatismes communs ou d'autre part, des degrés de conservatismes différents en termes de relâchement et de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques par rapport à la représentation phénoménologique de l'évolution du système de stockage et de son environnement.

Par les modalités de choix retenues, ces conservatismes sont plus importants pour la situation enveloppe que pour la situation de référence. En effet, ces choix de sûreté conservatifs sont faits, tout en s'appuyant sur la connaissance scientifique et technologique et des incertitudes résiduelles associées, afin de majorer le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'à la biosphère. Cette situation peut également comporter des choix pénalisants, c'est-à-dire ne pas tenir compte de caractéristiques qui pourraient être favorables au retard et à l'atténuation des radionucléides et des substances toxiques chimiques pour des composants ne contribuant pas aux fonctions de sûreté.

Cette situation enveloppe qui majore le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'à la biosphère, comporte, à ce titre, un cumul de valeurs et d'hypothèses conservatives qui n'existeraient pas forcément de manière concomitante[87]. La situation enveloppe constitue de par le choix des hypothèses et données retenues pour la décrire, la limite du domaine d'évolution normale du système de stockage et de son environnement. Elle permet d'évaluer la robustesse du système de stockage et de son environnement au regard des incertitudes résiduelles de connaissances, en particulier sur le long terme, aux limites du domaine d'évolution normale. Les estimations quantifiées des expositions individuelles associées à cette situation sont considérées comme majorantes.

Ces deux situations sont définies, pour une même architecture illustrative de l'installation souterraine dite à terminaison[88], En s'appuyant sur l'évolution phénoménologique du système de stockage et de son environnement telle qu'attendue et retranscrite dans le socle de connaissances scientifiques et technologiques, notamment dans le volume 7 du présent rapport, on retient :

- en termes de conservatismes communs entre les deux situations :
  - ✓ une représentation « en tout saturé » du stockage dès sa fermeture, conduisant à considérer le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques par la voie eau, sans prendre en compte un transitoire de resaturation, de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers d'années selon le composant du stockage ;

[87] Elles visent toutefois à rester dans le domaine du physiquement possible.
[88] C'est-à-dire à la fin de la phase de fonctionnement (telle que construite) et fermée définitivement.

- ✓ la non prise en compte des niveaux marneux C3a et C3b à la base de l'Oxfordien, et donc une non prise en compte du retard et de l'atténuation des radionucléides et substances toxiques chimiques que peuvent offrir ces niveaux dans le transfert en solution vers les exutoires ;
- ✓ une représentation de l'exutoire Dogger par pompage dans la ZFD (zone de fracturation diffuse) visant à capter de manière conservative, la totalité du flux de solutés arrivant dans la zone, sur la base de la définition d'une « ligne d'exutoire » s'appuyant sur les trajectoires hydrauliques et panaches convectifs de solutés (cf. Figure 5-30 du chapitre 5.2.8.2.2 du présent volume) ;

- en termes de conservatismes spécifiques à la situation enveloppe par rapport à la situation de référence, qui conduisent à majorer le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques par la voie eau :
  - ✓ le choix d'une garde (supérieure et inférieure) de Callovo-Oxfordien sain à la valeur de l'exigence de 50 mètres au minimum, alors que *de facto*, l'épaisseur réelle de garde est plus importante ;
  - ✓ le choix de valeurs des paramètres de transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien dans la borne haute de la gamme de mesures (ce qui majore les transferts des radionucléides et substances toxiques chimiques vers le toit ou le mur du Callovo-Oxfordien), valeurs aux bornes du domaine, mesurées localement et affectées à toute l'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ le choix de paramètres de rétention (sorption et solubilité) dans la borne basse ou haute de la gamme disponible, pouvant être définies localement, mais affectées à toute l'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien, ce qui majore également les transferts des radionucléides et substances toxiques chimiques vers le toit ou le mur du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ le choix de valeurs des paramètres de transfert des solutés dans les formations encaissantes visant à maximiser le transfert des solutés vers chacun des exutoires retenus ;
  - ✓ un choix de la valeur maximale du gradient de charge hydraulique vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien sur la globalité de l'installation de stockage en considérant un modèle hydrogéologique basé sur une évolution géodynamique maximaliste ;
  - ✓ la prise en compte de deux exutoires supplémentaires par rapport à la situation de référence, en considérant un modèle hydrogéologique à un million d'années basé sur une évolution géodynamique maximaliste : un exutoire par pompage dans l'Oxfordien calcaire dans la zone de fracturation diffuse et un exutoire Oxfordien rivière ;
  - ✓ une représentation de l'exutoire Oxfordien par pompage dans la ZFD visant à capter de manière conservative, la totalité du flux de solutés arrivant dans la zone, sur la base de la définition d'une « ligne d'exutoire » s'appuyant sur les trajectoires hydrauliques et panaches convectifs de solutés (cf. Figure 5-30 du chapitre 5.2.8.2.2 du présent volume) ;
  - ✓ un choix de modèle de relâchement conservatif pour toutes les familles de déchets HA vitrifiés, ce qui majore le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques des déchets.

7.1.2 Les enseignements des résultats des évaluations quantitatives de la situation de référence du scénario d'évolution normale

Les indicateurs retenus sont la cartographie des concentrations en solution (dans la couche du Callovo-Oxfordien et/ou dans les formations encaissantes) et les débits molaires ou massiques instantanés (en particulier leurs valeurs maximales et les dates d'occurrence associées) ou les débits cumulés sur un million d'années, puis normés par rapport à l'inventaire total initial du soluté concerné (notamment en pourcentage) :

- transitant depuis les colis de déchets jusqu'aux toit et mur de la couche du Callovo-Oxfordien, en distinguant la voie de transfert « Callovo-Oxfordien » et la voie de transfert par les ouvrages ;
- transitant dans les formations encaissantes jusqu'aux exutoires du Barrois et du Dogger (dans la zone de fracturation diffuse pour ce dernier).

Les enseignements présentés dans les chapitres suivants s'appuient sur les résultats, détaillés au chapitre 6.2 du présent volume.

7.1.2.1 Les hypothèses et données relatives aux choix structurants de représentation des colis de déchets stockés

Pour mémoire, pour la situation de référence sont retenus les modèles de relâchement considérés au meilleur de la connaissance pour un milieu saturé et une durée d'étanchéité du conteneur de stockage conservative (cf. Chapitre 5.2.3.1 du présent volume).

7.1.2.1.1 Les colis de déchets HA vitrifiés

En s'appuyant sur les résultats des évaluations détaillés dans le chapitre 6 du présent volume, la perte d'étanchéité du conteneur de stockage estimée vers 3 800 ans puis l'application d'un modèle de relâchement « $V_0 \rightarrow V_R$ » en situation de référence pour certains colis de déchets HA, choix reflétant ainsi la connaissance acquise du comportement de ces colis en conditions de stockage, conduit à une durée de relâchement d'environ 230 000 ans.

Ces résultats illustrent l'apport du colis de déchets (la matrice vitrifiée) et du conteneur de stockage à la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage ».

7.1.2.1.2 Les colis de déchets MA-VL

Pour la situation de référence, en s'appuyant sur les résultats des évaluations détaillés dans le chapitre 6 du présent volume, il est noté que :

- l'application d'un modèle de cinétique de corrosion des composants métalliques (en particulier des colis de déchets CSD-C) conduit à une cinétique de relâchement d'au moins la dizaine de milliers d'années ;
- les dispositions qui consistent à retenir des matériaux cimentaires pour constituer le revêtement et le soutènement des alvéoles MA-VL permettent :
  - ✓ l'apport des phénomènes de rétention, en particulier la sorption dans les composants cimentaires des alvéoles de stockage MA-VL, qui contribuent à immobiliser les radionucléides et substances toxiques chimiques dans les alvéoles. C'est en particulier le cas des actinides pour lesquels leur sorption significative en milieu cimentaire permet de contribuer à immobiliser ces radionucléides dans le stockage et *in fine* à limiter très fortement leur migration vers la couche du Callovo-Oxfordien. Ce retard du transfert vers la couche du Callovo-Oxfordien par rapport à l'absence de rétention peut aller jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'années *a minima* pour certains actinides.

7.1.2.2 Les hypothèses et données relatives aux choix structurants de représentation des scellements

Les résultats montrent que pour la situation de référence, le transfert des solutés dans les ouvrages est diffusif dominant et illustrent ainsi le bon fonctionnement du stockage au regard de la fonction « S'opposer à la circulation d'eau ». Les écoulements dans les ouvrages souterrains sont ainsi très limités.

Ces résultats sont notamment liés :

- à l'efficacité des scellements, en particulier ceux des liaisons surface-fond ;
- aux propriétés hydrauliques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien (faible perméabilité et faible gradient de charge vertical) ;
- aux dispositions de conception de l'architecture d'ensemble (regroupement des liaisons surface-fond, borgnitude des quartiers de stockage), permettant de mobiliser uniquement l'eau venant de la couche du Callovo-Oxfordien, donc des flux d'eau très faibles compte tenu des propriétés hydrauliques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien (faible perméabilité et faible gradient de charge vertical).

7.1.2.3 Les hypothèses et données relatives aux choix structurants de représentation de la couche du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes jusqu'aux exutoires

Les résultats des évaluations quantitatives des indicateurs de performance de la situation de référence montrent que :

- la majeure partie des radionucléides et substances toxiques chimiques présentent une rétention importante dans la couche du Callovo-Oxfordien de sorte qu'ils restent dans les alvéoles de stockage et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des alvéoles de stockage sur le million d'années après fermeture. Seuls quelques radionucléides, dont les anions mobiles à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) et certains cations à vie longue (potassium 40, rubidium 87 et calcium 41), pour lesquels il n'y a pas ou très peu de rétention dans la couche du Callovo-Oxfordien, atteignent le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien sur le million d'années, en considérant des débits molaires supérieurs à 10^{-10} mole par an, mais de manière lente et étalée dans le temps ;
- en effet, les temps caractéristiques du transfert par diffusion dans la couche du Callovo-Oxfordien sont (i) pour les anions, de l'ordre de 400 000 ans (pour le chlore 36), 600 000 ans (pour le sélénium 79) et 800 000 ans (pour l'iode 129) et (ii) pour les trois cations à vie longue cités ci-avant, proches ou au-delà du million d'années[89] (cf. Figure 6-7 et figure 6-8 du chapitre 6.2.1.3.1 du présent volume) ;
- seuls les quelques radionucléides mobiles (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) migrent selon la voie de transfert par les ouvrages depuis les alvéoles de stockage vers les liaisons surface-fond (puits et descenderies), mais en quantité très limitée. Ce transfert est par diffusion dominante de sorte que les débits molaires maximaux en sortie des liaisons surface-fond sont très faibles et très inférieurs à ceux de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien. Le ratio des débits molaires maximaux entre la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien et la voie de transfert par les ouvrages est d'un facteur supérieur à plusieurs millions pour chacun des trois radionucléides mobiles, soulignant la nette dominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien.

Ceci est illustré par la figure 7-1 qui représente, pour la situation de référence le bilan de masse de l'iode 129 à un million d'années après la fermeture du stockage entre les voies de transfert dans les composants ouvragés et le milieu géologique depuis les colis jusqu'aux exutoires (à un million d'années). Elle souligne en particulier le fait qu'à un million d'années après la fermeture :

- environ 80 % de l'inventaire initial est resté soit dans le stockage (50 % environ), soit dans la couche du Callovo-Oxfordien (30 % environ) ;
- environ 20 % est parvenu au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, mais seul environ 2 % est parvenu aux exutoires, très majoritairement celui du Dogger, la formation encaissante sous-jacente de la couche du Callovo-Oxfordien, l'exutoire de surface, le Barrois, ne représentant que 0,2 % environ.

[89] Le million d'années correspond à la durée retenue pour les évaluations quantitatives à long terme des scénarios de sûreté (cf. Chapitre 1 du présent volume).

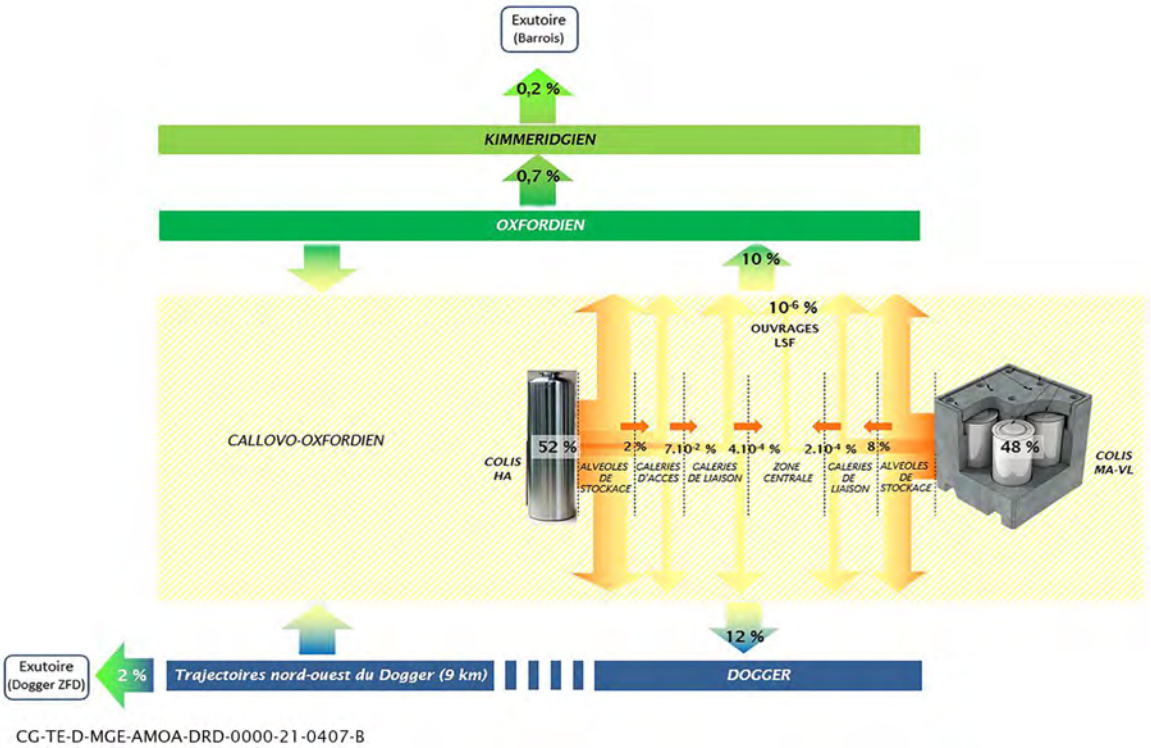


Figure 7-1 *Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan de masse de l'iode 129 à un million d'années après la fermeture du stockage exprimé en pourcentages de l'inventaire total initial dans les différents compartiments du système de stockage, ayant transité par le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ou ayant transité par les formations encaissantes sus-jacentes et sous-jacentes*

7.1.3 Les enseignements des résultats des évaluations quantitatives de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale

Les indicateurs retenus sont comme pour la situation de référence, la cartographie des concentrations en solution (dans la couche du Callovo-Oxfordien et/ou dans les formations encaissantes) et les débits molaires ou massiques instantanés (en particulier leurs valeurs maximales et les dates d'occurrence associées) ou les débits cumulés sur un million d'années, puis normés par rapport à l'inventaire total initial du soluté concerné (notamment en pourcentage) :

- transitant depuis les colis de déchets jusqu'aux toit et mur de la couche du Callovo-Oxfordien, en distinguant la voie de transfert « Callovo-Oxfordien » et la voie de transfert par les ouvrages ;
- transitant dans les formations encaissantes jusqu'aux exutoires du Barrois, de l'Oxfordien (pompage dans la zone de fracturation diffuse et exutoire rivière de l'Ornain) et du Dogger (pompage dans la zone de fracturation diffuse).

Les enseignements présentés dans les chapitres suivants s'appuient sur les résultats, détaillés au chapitre 6.3 du présent volume.

7.1.3.1 Les hypothèses et données relatives aux choix structurants de représentation des colis de déchets stockés

7.1.3.1.1 Les colis de déchets HA vitrifiés

La situation enveloppe comprend des degrés de conservatismes plus importants par rapport à la situation de référence, notamment en termes :

- de choix de modèles de relâchement ;
- d'hypothèse de perte d'étanchéité du conteneur de stockage (prise selon les exigences).

En s'appuyant sur les résultats des évaluations, il est noté que la perte d'étanchéité du conteneur de stockage de l'ordre de quelques centaines d'années (selon les exigences et le type de conteneur HA) puis l'application d'un modèle de relâchement « V_0.S » (conservatif par rapport au modèle « $V_0 \rightarrow V_R$ »), conduit à une durée de relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques qui s'effectue en quelques centaines à quelques milliers d'années.

Ces résultats basés sur des choix conservatifs illustrent également l'apport du colis de déchets (la matrice vitrifiée) et du conteneur de stockage à la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage », bien que cet apport soit plus limité qu'en situation de référence.

7.1.3.1.2 Les colis de déchets MA-VL

Comme pour la situation de référence, il est noté que l'application d'un modèle de cinétique de corrosion des composants métalliques (en particulier des colis de déchets CSD-C) conduit également à une cinétique de relâchement d'au moins la dizaine de milliers d'années.

Les dispositions qui consistent à retenir des matériaux cimentaires pour constituer le revêtement et le soutènement des alvéoles MA-VL permettent également l'apport de phénomènes de rétention, en particulier la sorption dans les composants cimentaires des alvéoles de stockage MA-VL, contribuant ainsi à immobiliser les radionucléides et substances toxiques chimiques dans les alvéoles. C'est en particulier le cas des actinides pour lesquels leur sorption significative en milieu cimentaire, y compris en situation enveloppe, permet de contribuer à immobiliser ces radionucléides dans le stockage et *in fine* à limiter fortement leur migration vers la couche du Callovo-Oxfordien.

7.1.3.2 Les hypothèses et données relatives aux choix structurants de représentation des scellements

Les résultats présentés au chapitre 6 du présent volume montrent que pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, le transfert des solutés dans les ouvrages est diffusif dominant et illustrent ainsi le bon fonctionnement du stockage au regard de la fonction « S'opposer à la circulation d'eau ».

Les écoulements dans les ouvrages souterrains sont également très limités, ces résultats étant notamment liés :

- à l'efficacité des scellements, en particulier ceux des liaisons surface-fond dont la performance correspond à celle des exigences amont spécifiées ;
- aux dispositions de conception de l'architecture d'ensemble (regroupement des liaisons surface-fond, borgnitude des quartiers de stockage), permettant de mobiliser uniquement l'eau venant de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- aux propriétés hydrauliques de la couche du Callovo-Oxfordien bien que les valeurs de perméabilité et gradient de charge vertical soient pris conservatifs par rapport à la situation de référence, tout en restant dans la gamme de valeurs disponibles.

7.1.3.3 Les hypothèses et données relatives aux choix structurants de représentation de la couche du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes jusqu'aux exutoires

Même en situation enveloppe, les grandes lignes de comportement sont globalement identiques à celles de la situation de référence : les temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien et dans le stockage sont plus courts, et les bilans de masse de solutés à un million d'années en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien sont plus importants. Les principales remarques sont les suivantes :

- la prise en compte de paramètres hydrodispersifs majorants dans la situation enveloppe (coefficient de diffusion, perméabilité, porosité), de coefficients de partage minimaux, et de limites de solubilité maximales conduit à des temps caractéristiques de transfert par diffusion dans le Callovo-Oxfordien qui sont significativement plus faibles que ceux de la situation de référence, soit de l'ordre de 100 000 ans à 200 000 ans (valeur correspondant au maximum de débit molaire pour les anions non sorbés) ;
- les radionucléides atteignant le toit et le mur du Callovo-Oxfordien (sur la base d'un débit molaire supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1}) sont ceux de la situation de référence (iode 129, chlore 36, sélénium 79, potassium 40, calcium 41, rubidium 87), en ajoutant les radionucléides suivants :
  - ✓ le césium 135, radionucléide à vie longue, soluble et relativement peu sorbé en situation enveloppe ;
  - ✓ les radionucléides à vie moyenne avec un inventaire élevé : carbone 14 (en considérant de manière pénalisante que tout l'inventaire est sous forme organique, donc sans rétention dans les composants cimentaires et dans les argilites, en l'état des connaissances) et molybdène 93 ;
  - ✓ les isotopes de l'uranium (uranium 238, uranium 235, uranium 236, uranium 233 et uranium 234 dans une moindre mesure), du fait de leurs inventaires très élevés. Néanmoins, les relâchements de ces radionucléides sont faibles et très tardifs ; les isotopes du thorium (thorium 230 et thorium 232), fortement sorbés en milieu argileux et dans les matériaux cimentaires, ont des débits molaires très faibles et tardifs ; enfin, pour des radionucléides descendants, sorbés au même niveau que l'uranium, seul respectivement de l'ordre de 4×10^{-4} % et 10^{-4} % de l'inventaire total initial en radium 226 et protactinium 231 a atteint les limites (toit ou mur) de la couche du Callovo-Oxfordien en un million d'années ;
  - ✓ le manganèse 53 et le fer 60, radionucléides à vie longue, relativement peu sorbés dans les argilites et non sorbés dans les ouvrages cimentaires ;
- les débits molaires maximaux en sortie des liaisons surface-fond sont faibles et inférieurs à ceux de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien : le ratio des débits molaires maximaux entre les deux voies de transfert est d'au moins un facteur 100 pour chacun des trois radionucléides mobiles. Ces ratios confirment également la dominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien.

Ceci est illustré sur la figure 7-2, la figure 7-3 et la figure 7-4 qui représentent, pour la situation enveloppe, la répartition des voies de transfert pour l'iode 129 dans les composants ouvragés et le milieu géologique depuis les colis jusqu'aux exutoires à un million d'années, respectivement pour les 3 cas d'exutoires (cf. Figure 5-48 du chapitre 5.3.7 du présent volume, respectivement pour le « cas 1 » maximisant le transfert vertical vers le Barrois, le « cas 2 » maximisant le transfert horizontal dans les horizons poreux de l'Oxfordien et le « cas 3 » maximisant le transfert horizontal dans les horizons poreux du Dogger).

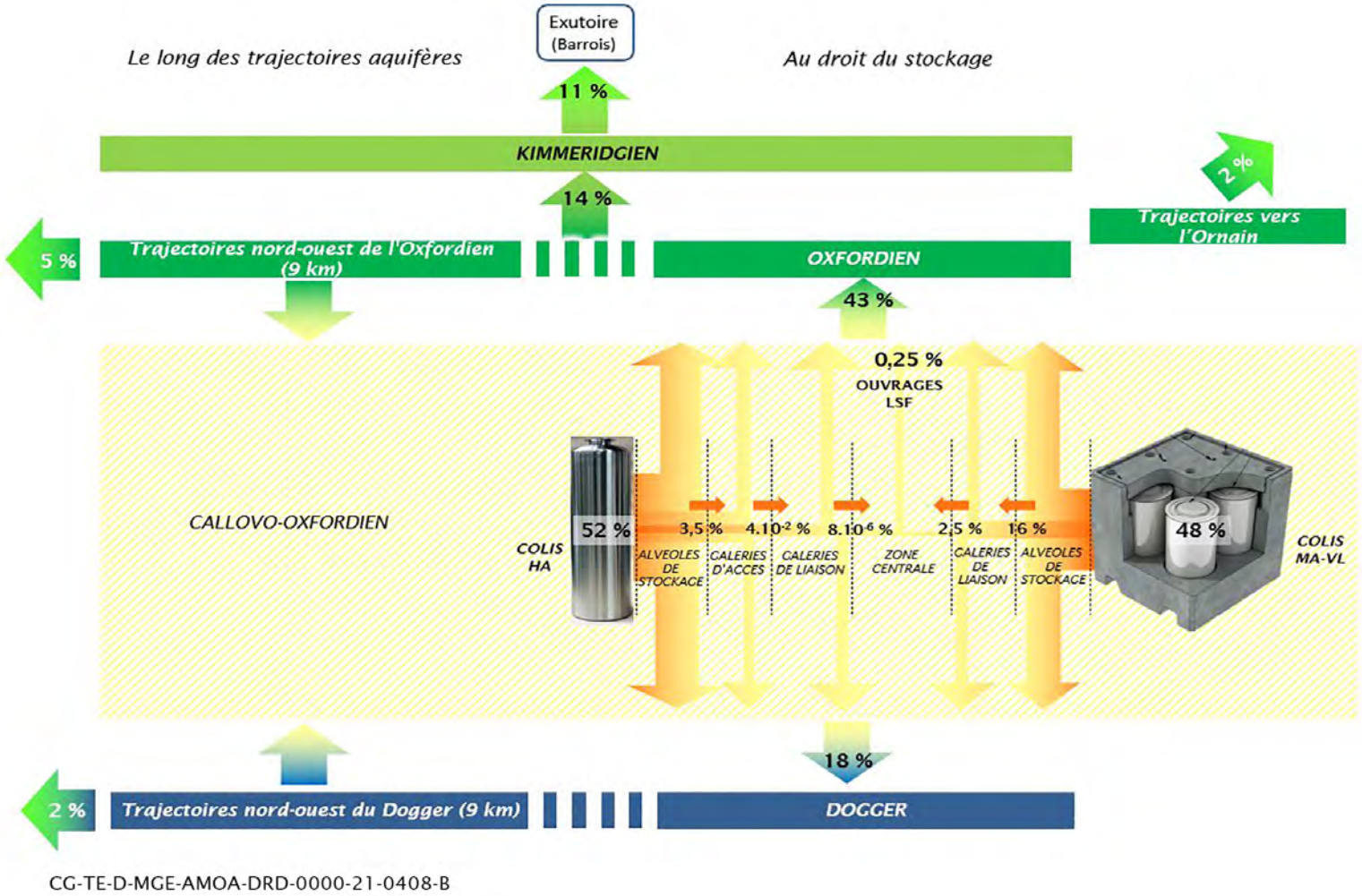
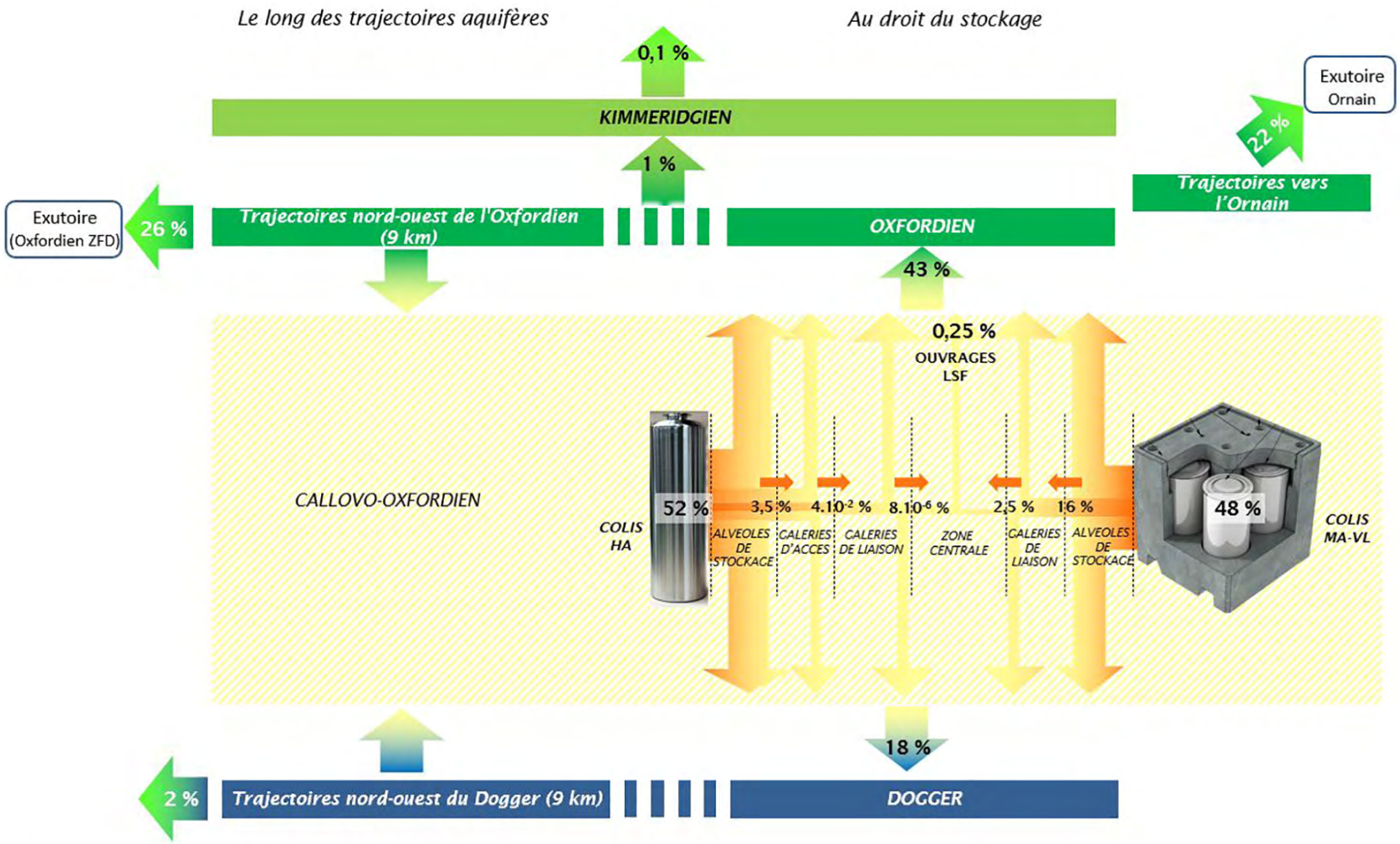


Figure 7-2 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien),* ***exutoire Barrois (« cas 1 »)*** *: bilan de masse de l'iode 129 à un million d'années après la fermeture du stockage exprimé en pourcentages de l'inventaire total initial dans les différents compartiments du système de stockage, ayant transité par le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ou ayant transité par les formations encaissantes sus-jacentes et sous-jacentes*



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0409-B

Figure 7-3 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien),* ***exutoires Oxfordien et Ornain (« cas 2 »)*** *: bilan de masse de l'iode 129 à un million d'années exprimé en pourcentages de l'inventaire total initial dans les différents compartiments du système de stockage, ayant transité par le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ou ayant transité par les formations encaissantes sus-jacentes et sous-jacentes*

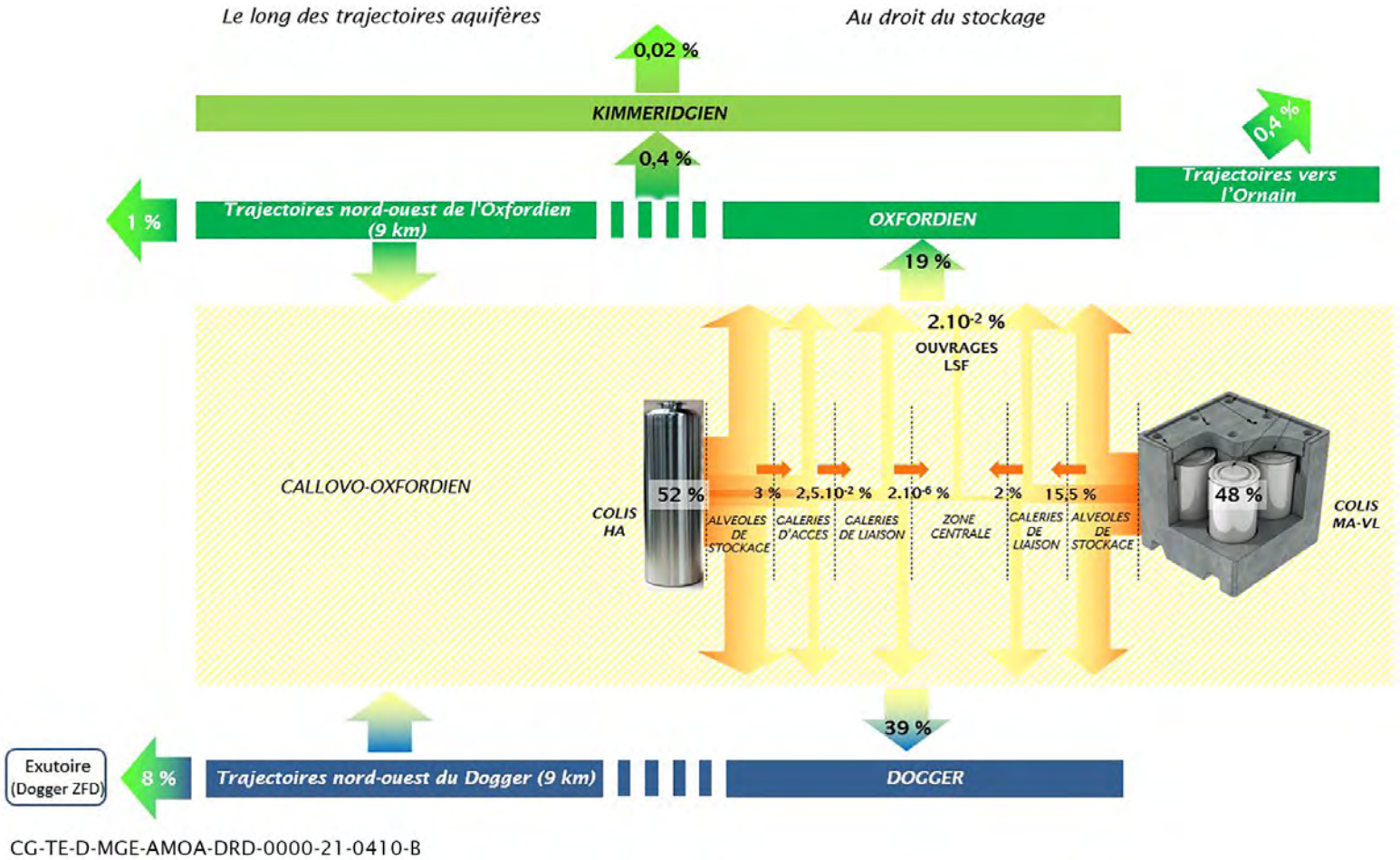


Figure 7-4 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien),* ***exutoire Dogger (« cas 3 »)*** *: bilan de masse de l'iode 129 à un million d'années après la fermeture du stockage exprimé en pourcentages de l'inventaire total initial dans les différents compartiments du système de stockage, ayant transité par le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ou ayant transité dans les formations encaissantes sus-jacentes et sous-jacentes*

7.2 La vérification des incidences sanitaires sur l'homme liées à un éventuel transfert à long terme de radionucléides dans la biosphère

Les évaluations des incidences résiduelles sur la santé de l'homme se fondent sur les quelques radionucléides qui parviennent à très long terme jusqu'aux exutoires retenus en supposant que les humains du futur viendraient utiliser les eaux de ces exutoires. Ces évaluations reposent sur la description de la biosphère qui représente le dernier maillon de la chaine de transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis de déchets jusqu'à l'homme.

La description du compartiment biosphère repose sur des principes de choix structurants des types de biosphères, des exutoires, des groupes de référence hypothétiques, de la classe d'âge, et du régime alimentaire (cf. Chapitre 1.5.2.2 du présent volume). Il s'agit donc d'une approche conventionnelle de « construction de modèles biosphères » nécessaires aux évaluations. Cette démarche vise ainsi à tenir compte d'incertitudes sur l'évolution de l'environnement du système de stockage sur le long terme en cohérence avec les recommandations du guide n° 1 de l'ASN.

Pour mémoire, l'objectif d'un modèle « biosphère » est de représenter tous les transferts de radionucléides vers l'homme depuis une eau potentiellement contaminée en considérant toutes les voies d'atteinte (exposition externe, inhalation et ingestion). Ce modèle permet de convertir une concentration en radionucléides ou activité volumique (en $Bq.L^{-1}$) dans l'eau à un exutoire donné en une dose annuelle pour un individu représentatif. Ce modèle permet ainsi de calculer un « **facteur de conversion biosphère** » qui est utilisé pour évaluer la dose annuelle associée à chacun des radionucléides qui parvient à un exutoire donné pour un individu représentatif spécifique.

La définition de ce facteur de conversion biosphère repose sur les caractéristiques des exutoires retenus pour les évaluations. Pour mémoire, le choix des exutoires a conduit à retenir (cf. Chapitre 2.10 du présent volume) :

- deux exutoires qui sont communs aux deux situations du scénario d'évolution normale : l'exutoire pompage dans le Barrois et l'exutoire pompage dans le Dogger dans la zone de fracturation diffuse ;
- pour la situation enveloppe deux exutoires supplémentaires en considérant un modèle hydrogéologique à un million d'années basé sur une évolution géodynamique maximaliste : l'exutoire pompage dans l'Oxfordien calcaire au niveau de la zone de fracturation diffuse et l'exutoire Oxfordien calcaire au niveau de la rivière Ornain.

7.2.1 Le rappel des choix structurants de la définition des biosphères retenues pour les évaluations

Pour un même exutoire et une même personne représentative, les facteurs de conversion biosphère sont identiques pour la situation de référence et la situation enveloppe (cf. Chapitre 4 du présent volume). Ils sont constants au cours du temps car les radionucléides sont supposés être à l'équilibre au vu des échelles de temps considérées dans l'évaluation des incidences à long terme.

Une fois l'exutoire, le groupe de référence hypothétique et la personne représentative identifiés, le facteur de conversion biosphère n'est sensible qu'à la chaine de transfert des radionucléides dans la biosphère et des voies d'atteinte à cette personne représentative. Il est donc dépendant :

- des biosphères types retenues (tempérée, chaude, froide (cf. Chapitre 2.11 du présent volume) qui peuvent induire par exemple des niveaux d'irrigation différents des cultures et jardins ;

- des activités du groupe de référence hypothétique retenu et du régime alimentaire associé :
  - ✓ ont ainsi été considérés plusieurs groupes représentatifs de multiples activités et qui prennent ainsi en compte l'ensemble des chaines de transfert vers l'homme (exposition externe, inhalation et ingestion) ;
  - ✓ ont été considérés en sensibilité des groupes avec un régime alimentaire particulier représentatif :
    - d'une consommation de viande augmentée au 95e percentile (groupe qualifié de multi-activités éleveur de bovins) ;
    - d'une consommation de produits du jardin et de la basse-cour augmentés au 95e percentile (groupe qualifié de multi-activités villageois) ;
    - d'une consommation de poisson et gibier pour l'exutoire rivière Ornain (groupe qualifié de multi-activités chasseur pêcheur) ;
- des classes d'âge de l'individu représentatif ont été considérées conformément à la démarche, trois classes d'âge pour le groupe de référence hypothétique multi-activités : l'adulte, l'enfant de 10 ans et l'enfant de 1 an ;
- des voies d'atteinte à l'homme ont été considérées dans tous les cas, les trois voies d'atteinte potentielles, c'est-à-dire l'exposition externe, l'inhalation et l'ingestion.

Les enseignements de l'analyse des incidences sur la santé humaine de radionucléides qui potentiellement atteindraient ces exutoires sont présentés ci-après en considérant ces hypothèses.

7.2.2 Les enseignements relatifs au compartiment biosphère

7.2.2.1 Les enseignements relatifs au passage du débit molaire à la concentration à l'exutoire

En préambule, il est rappelé que dans le présent volume 8 de la pièce 7, le terme de concentration à l'exutoire pour un radionucléide donné désigne l'activité volumique de ce radionucléide à cet exutoire, exprimée en $Bq.L^{-1}$.

Pour mémoire, les modalités du passage du débit molaire à la dose reçue par l'homme à l'exutoire sont présentées au chapitre 1.5.2.2 du présent volume.

Par analyse et comparaison des historiques des concentrations (en $Bq.L^{-1}$) en radionucléides à l'exutoire de la figure 7-5 avec les historiques des débits molaires (exemple de la figure 6-37 du chapitre 6 du présent volume présentant les débits molaires sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien), le passage d'un débit molaire à une concentration à l'exutoire conduit aux remarques suivantes :

- une modification importante dans la hiérarchie des trois radionucléides prépondérants (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), du fait de la prise en compte de la période radioactive des radionucléides lors du passage d'un débit molaire à la concentration (cf. Modalités présentées au chapitre 1.5.2.2 du présent volume). En effet, la période de l'iode 129, largement supérieure à celles du sélénium 79 et du chlore 36, réduit significativement sa concentration à l'exutoire comparativement à celles du chlore 36 et du sélénium 79 ;
- les radionucléides potassium 40 et rubidium 87 présentant des débits molaires au mur de la couche du Callovo-Oxfordien proches de ceux de l'iode 129, ne font plus partie du cortège des radionucléides prépondérants en termes de concentrations du fait de période radioactive respectivement 80 fois et 3 000 fois supérieure à celle de l'iode 129.

Les constats précédents sont applicables aux deux situations du scénario d'évolution normale et quel que soit l'exutoire considéré.

À titre illustratif, la figure 7-5 présente les historiques des concentrations à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour la situation enveloppe. Comparés aux historiques de débits molaires sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien présentés figure 6-37 du chapitre 6 du présent volume, le passage du débit molaire à la concentration à l'exutoire en $Bq.L^{-1}$, montre par exemple que les radionucléides potassium 40 et rubidium 87 ne font plus partie du cortège des radionucléides prépondérants en termes de concentrations du fait de leur période radioactive.

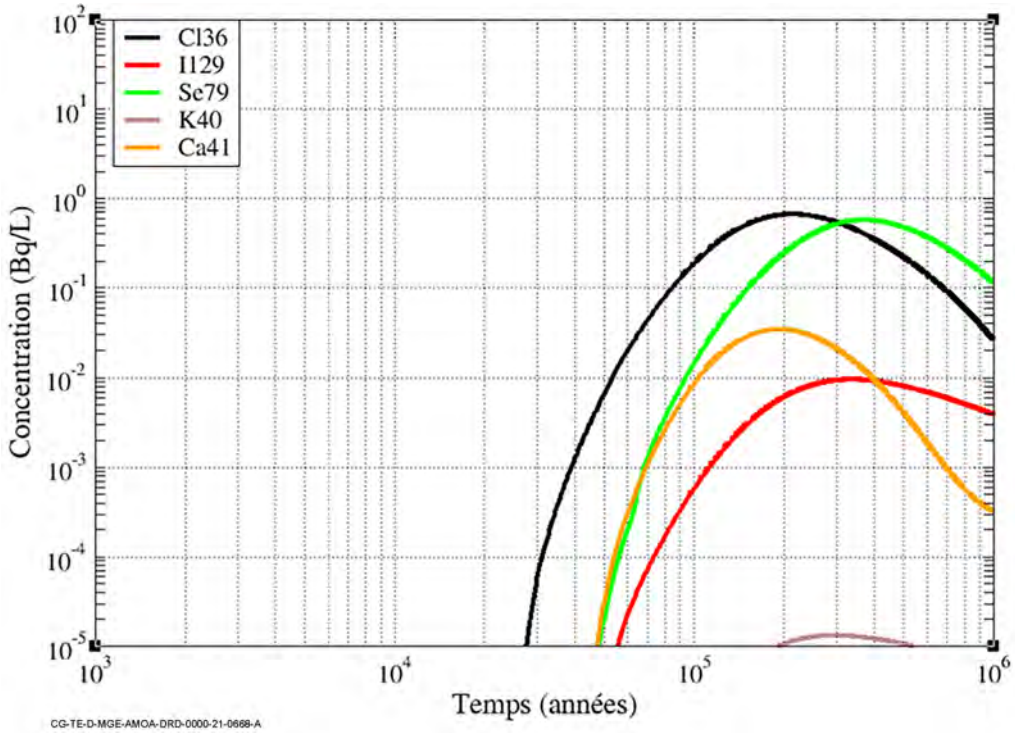


Figure 7-5 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : historiques des concentrations à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »*

7.2.2.2 Les enseignements relatifs à l'application des facteurs de conversion biosphère

L'analyse de l'ensemble de cas retenus permet de dégager les enseignements suivants :

- pour une même biosphère type, un même exutoire, et une même personne représentative, les facteurs de conversion biosphère de chacun des radionucléides sont identiques pour les deux situations (référence et enveloppe). C'est le cas pour les exutoires Dogger et Barrois qui sont tous deux retenus pour les situations de référence et enveloppe. Dans ces deux cas, la différence observée sur la dose annuelle reçue par le même individu représentatif entre la situation de référence et la situation enveloppe est liée à la différence de concentration à l'exutoire, plus élevée pour la situation enveloppe du fait de l'important degré de conservatisme de cette situation vis-à-vis de la chaîne de transferts des radionucléides depuis les colis jusqu'aux exutoires ;
- l'application du facteur de conversion biosphère peut avoir une influence sur la hiérarchie des radionucléides contributeurs à la dose. À titre illustratif, la figure 7-6 présente les historiques des doses reçues par l'homme à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour la situation enveloppe, le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée et un individu adulte.

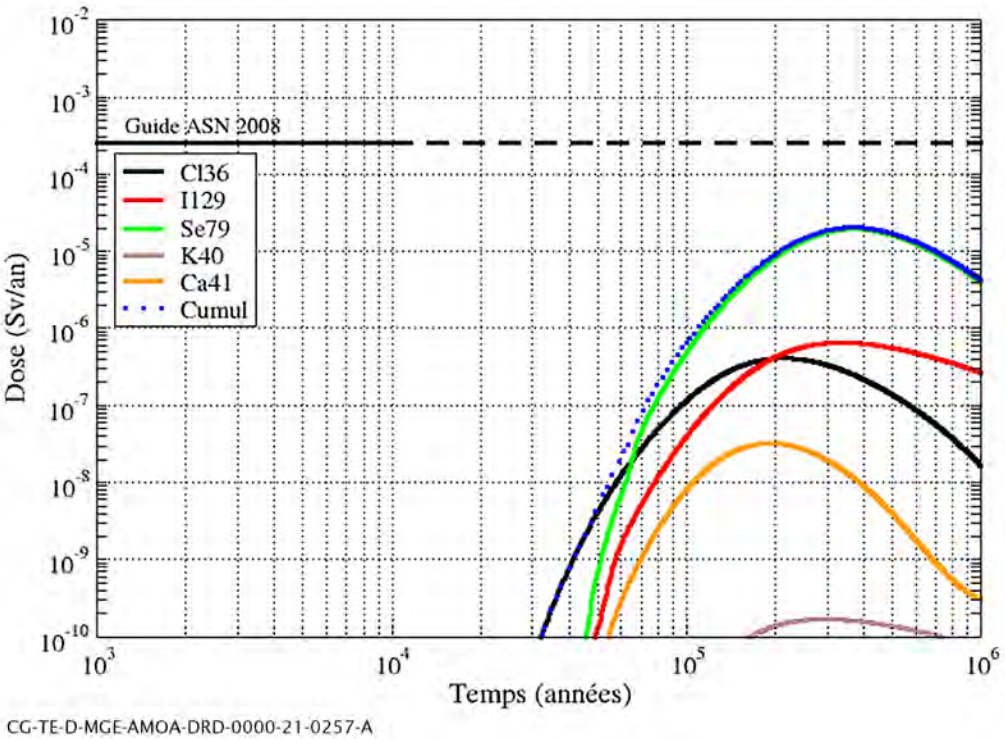


Figure 7-6 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée et un individu adulte*

La comparaison entre la figure 7-5 et la figure 7-6 illustre une modification importante dans la hiérarchie des trois radionucléides prépondérants lorsque l'on passe de la concentration à l'exutoire à la dose à l'exutoire par l'intermédiaire du facteur de conversion biosphère. La concentration maximale en chlore 36 à l'exutoire est du même ordre que celle en sélénium 79, alors que la dose reçue par l'homme est nettement inférieure pour le chlore 36 par rapport à celle en sélénium 79. Cet exemple illustre le fait que le facteur de conversion biosphère du chlore 36 est largement inférieur à celui du sélénium 79 (cf. Tableau 7-1 du chapitre 7.2.2.2 du présent volume).

- le facteur de conversion biosphère dépend de la biosphère type considérée, des activités du groupe de référence hypothétique considéré, de son régime alimentaire associé, de la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an) ;
- les facteurs de conversion biosphère sont également influencés par le choix des paramètres radioécologiques et de transfert. À titre illustratif, la prise en compte des évolutions de connaissances sur les paramètres de transfert sol/plante ont permis d'affiner la valeur du facteur de conversion biosphère.

Pour illustration, les valeurs des facteurs de conversion biosphère des trois principaux radionucléides contributeurs à la dose (iode 129, chlore 36, sélénium 79) du groupe de référence « multi-activités » sont présentés dans le tableau 7-1.

Tableau 7-1 *Valeurs des facteurs de conversion biosphère des trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36, sélénium 79) pour le groupe de référence « multi-activités », pour différentes biosphères types et différentes classes d'âge*

Facteur de conversion biosphère ($Sv.an^{-1}$ par $Bq.L^{-1}$)		Groupe de référence « multi-activités »						
		Biosphère tempérée			Biosphère chaude			Biosphère froide
		Adulte	Enfant 10 ans	Enfant 1 an	Adulte	Enfant 10 ans	Enfant 1 an	Adulte
^{36}Cl[90]	Barrois	$1,53 \times 10^{-05}$	$2,60 \times 10^{-05}$	$5,06 \times 10^{-05}$	$1,72 \times 10^{-05}$	$2,89 \times 10^{-05}$	$6,03 \times 10^{-05}$	$1,20 \times 10^{-05}$
	Oxfordien	$3,10 \times 10^{-06}$	$5,54 \times 10^{-06}$	$1,08 \times 10^{-05}$	$3,39 \times 10^{-06}$	$6,05 \times 10^{-06}$	$1,28 \times 10^{-05}$	$2,99 \times 10^{-06}$
	Dogger	$6,20 \times 10^{-07}$	$1,28 \times 10^{-06}$	$2,40 \times 10^{-06}$	$7,15 \times 10^{-07}$	$1,46 \times 10^{-06}$	$2,92 \times 10^{-06}$	$6,20 \times 10^{-07}$
^{129}I		$6,90 \times 10^{-05}$	$1,18 \times 10^{-04}$	$7,69 \times 10^{-05}$	$8,67 \times 10^{-05}$	$1,48 \times 10^{-04}$	$1,07 \times 10^{-04}$	$6,66 \times 10^{-05}$
^{79}Se		$3,41 \times 10^{-05}$	$1,26 \times 10^{-04}$	$1,45 \times 10^{-04}$	$3,60 \times 10^{-05}$	$1,34 \times 10^{-04}$	$1,64 \times 10^{-04}$	$1,71 \times 10^{-05}$

La figure 7-7 illustre l'influence des différents paramètres évoqués ci-avant sur la valeur du facteur de conversion biosphère : influence de la biosphère type, de la classe d'âge, de la voie d'exposition et du régime alimentaire.

[90] Prise en compte du modèle Cl36 basé sur les « ratios isotopiques » tenant compte de la teneur en chlore stable à l'exutoire.

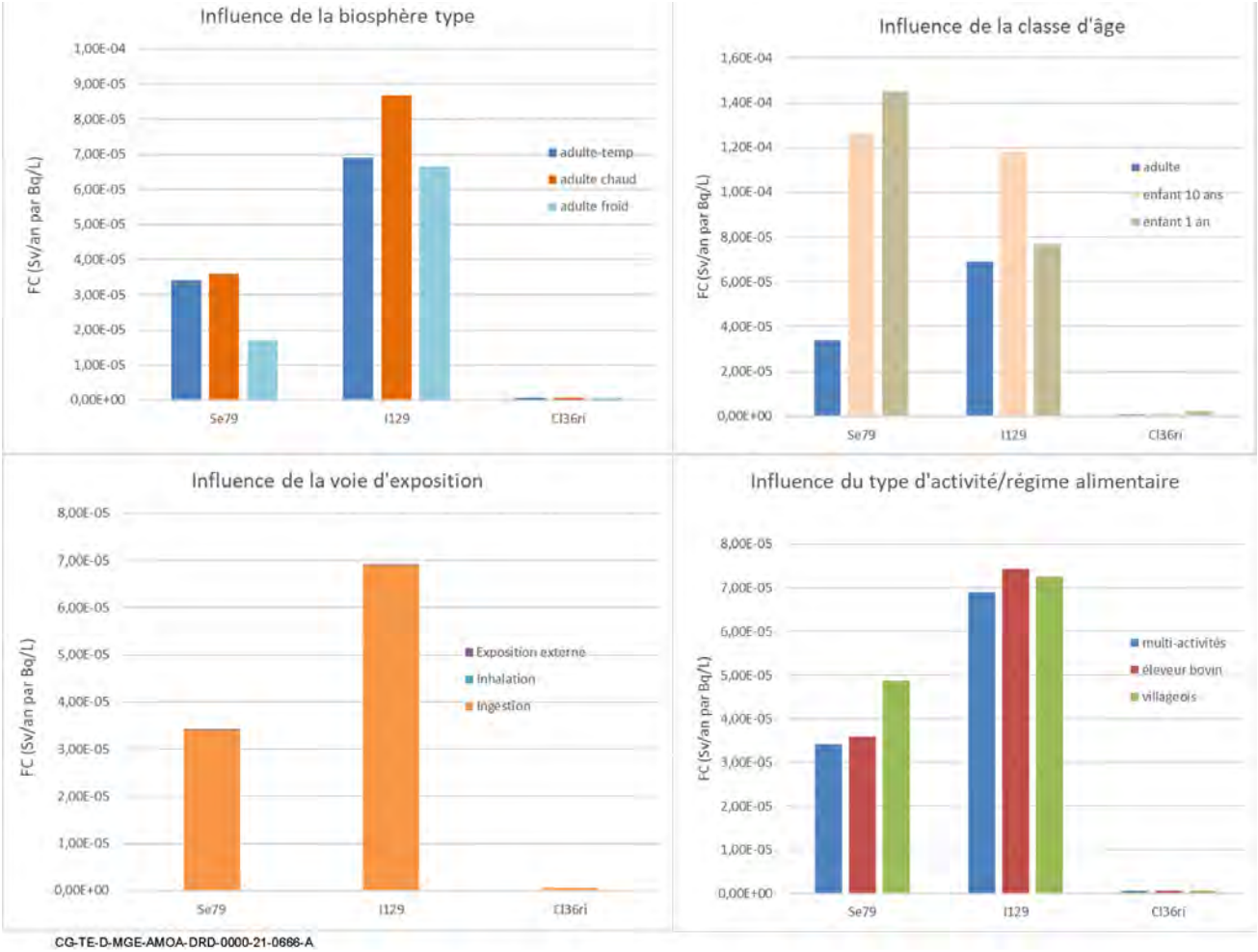


Figure 7-7 *Facteurs de conversion biosphère et influence de différents paramètres : biosphère type, classe d'âge, voies d'exposition et régime alimentaire pour les trois principaux radionucléides contribuant à l'incidence sanitaire sur l'homme*

La figure 7-8 présente, à titre illustratif, la répartition des aliments types qui contribuent à la voie d'exposition interne par ingestion pour les trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée et un individu adulte. Ces éléments déterminent *in fine* les facteurs de conversion biosphère de ces trois radionucléides.

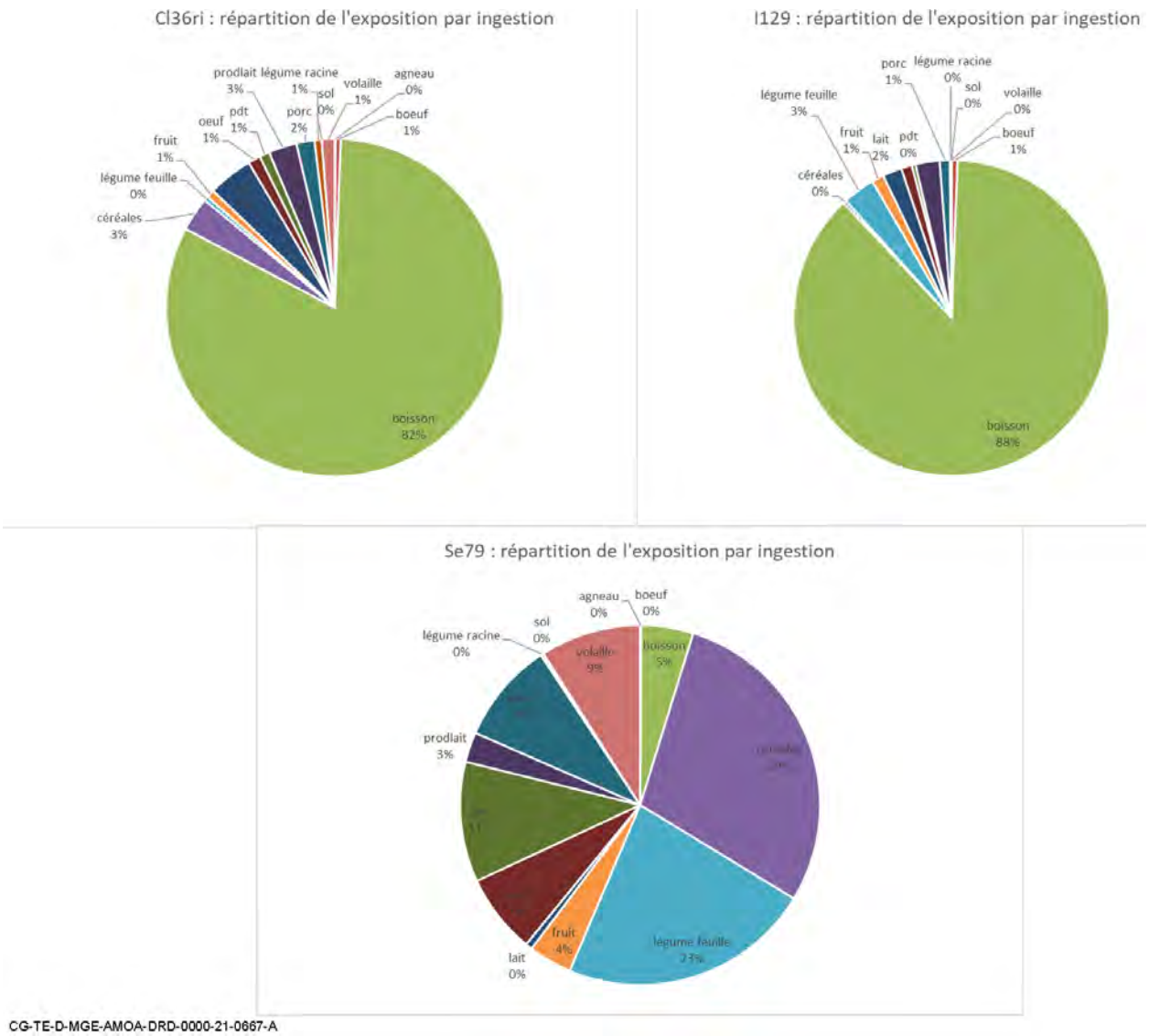


Figure 7-8 *Répartition de l'exposition interne par ingestion pour les trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36, sélénium 79), pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée et un individu adulte*

L'analyse des valeurs des facteurs de conversion biosphère et des illustrations présentées permettent de dégager les enseignements suivants :

- les facteurs de conversion biosphère sont légèrement plus élevés pour une biosphère type chaude que pour une biosphère type tempérée ou froide. Cet écart est néanmoins limité avec au maximum un facteur 1,3 entre une biosphère type chaude et une biosphère type tempérée, facteur que l'on retrouve dans les évaluations de doses à l'homme. Cet écart résulte pour partie du niveau d'irrigation plus élevé en biosphère chaude et du régime alimentaire adapté qui comporte plus de fruits et de légumes ;
- les trois voies de contamination sont prises en compte pour l'ensemble des calculs de la dose à l'homme, mais la voie exposition interne par ingestion (eau et aliments) contribue à la quasi-totalité de la dose, quels que soient la classe d'âge et le type de biosphère, et ce, pour les trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36, sélénium 79). La contribution des voies d'exposition par inhalation et exposition externe est négligeable ;
- les incidences sanitaires sur l'homme s'avèrent plus importantes pour les classes d'âge enfants de 1 an et enfants de 10 ans que pour la classe d'âge adulte, pour les trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36, sélénium 79), avec au maximum un facteur 4 pour le sélénium 79 entre l'adulte et l'enfant d'un an. Cet écart résulte pour partie des coefficients de dose par ingestion (DPUI) qui sont en général plus pénalisants pour les enfants que pour les adultes, en particulier pour le sélénium 79 (12) ;
- l'étude en sensibilité de deux groupes particuliers (régime alimentaire modifié avec une augmentation très importante de la consommation de viande pour l'éleveur de bovins et de fruits et légumes pour le villageois) montre une influence limitée sur le facteur de conversion biosphère, avec un effet un peu plus notable pour le sélénium 79 et le groupe villageois (facteur 1,4) ;
- pour les doses potentiellement induites par l'iode 129 et le chlore 36, la principale voie d'exposition est l'ingestion d'eau de boisson, quelle que soit la classe d'âge ;
- pour la dose potentiellement induite par le sélénium 79, la contribution à la voie d'exposition par ingestion est plus équitablement répartie entre l'ensemble des produits animaux et végétaux, avec une légère dominance de l'ingestion de céréales et de légumes feuilles. Ces tendances sont communes à l'ensemble des biosphères et des classes d'âge étudiées.

Le calcul des facteurs de conversion biosphère fait partie intégrante de l'application de la démarche biosphère et se base sur des choix conventionnels et des choix de valeurs de paramètres (57) incluant un degré de conservatisme. On peut notamment citer :

- un groupe de référence hypothétique aux activités multiples et variées (élevage bovin, basse-cour, cultures de céréales, jardin potager, verger) incluant la pêche et la chasse dans le cas du groupe associé à l'exutoire rivière Ornain ;
- des études de sensibilité aux régimes alimentaires particuliers (gros consommateurs de viande ou de fruits et légumes) ;
- une autarcie totale pour l'ensemble des produits animaux et végétaux ingérés ainsi que pour l'eau de boisson (100 % des produits consommés proviennent de l'exploitation) et ce pour l'ensemble des classes d'âge ;
- un régime diversifié pour l'enfant de 1 an incluant uniquement des produits issus de l'exploitation (y compris le lait et les produits laitiers) ;
- l'irrigation des cultures de céréales pour l'ensemble des biosphères type et l'ensemble des exutoires indépendamment de la qualité de l'eau ou des débits de pompage envisageables et même si ces pratiques ne sont pas observées actuellement.

7.2.3 Les enseignements des résultats relatifs aux incidences sanitaires sur l'homme aux différents exutoires

Le tableau 7-2, le tableau 7-3 et tableau 7-4 présentent à titre d'illustration les doses annuelles cumulées maximales (et leurs dates d'occurrence) évaluées pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités » commun à tous les exutoires, deux biosphères types tempérée ou chaude[91], et les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an) :

- aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » en situation de référence ;
- aux exutoires « Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » en situation enveloppe[92].

L'évaluation de l'exposition humaine en termes de dose annuelle totale dépend de l'ensemble des transferts dans les ouvrages souterrains, dans la couche du Callovo-Oxfordien et dans les formations encaissantes jusqu'aux exutoires (cf. Chapitre 7.1 du présent volume) et du facteur de conversion biosphère (cf. Chapitre 7.2.2.1 du présent volume) qui représente les transferts vers l'individu représentatif du groupe de référence hypothétique :

- ainsi les choix structurants de chacune des situations du scénario d'évolution normale induisent des enseignements spécifiques sur la valeur de la dose annuelle aux exutoires et de la date de dose annuelle cumulée maximale du fait des différences de débits molaires sortant de la couche du Callovo-Oxfordien et du transfert dans les formations encaissantes ;
- en conséquence, les principaux enseignements sont successivement retranscrits pour chacune des situations du scénario d'évolution normale sachant que les facteurs de conversion biosphère sont les mêmes pour les deux situations.

7.2.3.1 Pour la situation de référence

Les doses annuelles cumulées aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »[93] sont dans des ordres de grandeur très inférieurs à la valeur de référence fixée dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (1) pour les expositions individuelles associées au scénario d'évolution normale, soit de l'ordre de 0,25 $mSv.an^{-1}$ à long terme :

- le maximum de dose annuelle cumulée est très faible, de l'ordre de 10^{-4} à $1,5 \times 10^{-3}$ $mSv.an^{-1}$ selon la classe d'âge, que ce soit en biosphère type tempérée ou chaude. Sa date d'occurrence se situe entre 700 000 ans et autour ou au-delà du million d'années ;
- les radionucléides qui contribuent au cumul de dose annuelle sont les trois anions mobiles à vie longue, l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79. Pour l'exutoire « Pompage dans le Barrois », les incidences sanitaires exprimées en termes de dose annuelle sont pilotées par le chlore 36. Pour l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », les incidences sanitaires sont pilotées par le sélénium 79 et l'iode 129 pour la classe d'âge adulte, et principalement par le sélénium 79 pour les deux classes d'âge enfant (10 ans, 1 an) ;
- pour les radionucléides qui parviennent au Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse, la date d'occurrence du maximum de dose cumulée est d'environ 700 000 ans à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » avec une valeur maximale de l'ordre de 5×10^{-4} à 0,0015 $mSv.an^{-1}$ selon la classe d'âge, que ce soit en biosphère type tempérée ou chaude.

---

91 Les doses obtenues pour une biosphère type froide ne sont pas retranscrites dans cette synthèse car elles sont inférieures comparativement à celles des biosphères types tempérée et chaude.

92 Les doses à l'exutoire « Rivière Ornain » en situation enveloppe ne sont pas retranscrites dans cette synthèse, car elles sont très faibles comparativement à celles des autres exutoires.

93 Les exutoires retenus pour chacune des situations sont listés au chapitre 2.10 du présent volume.

7.2.3.2 Pour la situation enveloppe

Les doses cumulées aux exutoires « Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » sont faibles et inférieures à la valeur de 0,25 mSv.an^{-1} fixée dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (1) pour les expositions individuelles associées au scénario d'évolution normale :

- en considérant que l'épaisseur de garde saine de Callovo-Oxfordien pour tout le stockage correspondrait à l'exigence de 50 mètres (par rapport au toit ou au mur de la couche du Callovo-Oxfordien selon l'exutoire considéré), et des hypothèses et données toutes prises dans leur domaine « conservatif » :
  - ✓ les incidences radiologiques relatives aux biosphères tempérée et chaude, exprimées en termes de doses annuelles, sont principalement pilotées par le sélénium 79, et par le chlore 36 et l'iode 129 dans une moindre mesure ;
  - ✓ le maximum de dose cumulée à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » est de l'ordre de 0,01 mSv.an^{-1} à 0,05 mSv.an^{-1} selon la classe d'âge, que ce soit en biosphère type tempérée ou chaude. Sa date d'occurrence est autour de 550 000 ans à 600 000 ans ;
  - ✓ le maximum de dose cumulée à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » est de l'ordre de 0,05 mSv.an^{-1} à 0,25 mSv.an^{-1} selon la classe d'âge, que ce soit en biosphère type tempérée ou chaude. Sa date d'occurrence est d'environ 600 000 ans ;
  - ✓ le maximum de dose cumulée à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » est de l'ordre de 0,02 mSv.an^{-1} à 0,1 mSv.an^{-1} selon la classe d'âge, que ce soit en biosphère type tempérée ou chaude. Sa date d'occurrence est d'environ 370 000 ans.

Tableau 7-2 *Scénario d'évolution normale : doses cumulées maximales et occurrences des doses cumulées maximales aux principaux exutoires retenus en situation de référence (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans le Dogger ») et en situation enveloppe (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien », « Pompage dans le Dogger »), pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée ou chaude et la classe d'âge adulte*

		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
	Adulte	Dose cumulée max. ($mSv.an^{-1}$)	Date de dose cumulée max. (milliers d'années)	Dose cumulée max. ($mSv.an^{-1}$)	Date de dose cumulée max. (milliers d'années)
Situation de référence	Pompage au Barrois	$1,2 \times 10^{-04}$	990	$1,4 \times 10^{-04}$	≥1 000
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse)	$4,5 \times 10^{-04}$	700	$5,2 \times 10^{-04}$	710
Situation enveloppe	Pompage au Barrois Stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres	$1,4 \times 10^{-02}$	560	$1,5 \times 10^{-02}$	560
	Pompage à l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) Stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres	$5,3 \times 10^{-02}$	600	$5,7 \times 10^{-02}$	600
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse) Stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres	$2,0 \times 10^{-02}$	370	$2,2 \times 10^{-02}$	370

Tableau 7-3 *Scénario d'évolution normale : doses cumulées maximales et occurrences des doses cumulées maximales aux principaux exutoires retenus en situation de référence (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans le Dogger ») et en situation enveloppe (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien », « Pompage dans le Dogger »), pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée ou chaude et la classe d'âge enfant de 10 ans*

		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
	Enfant de 10 ans	Dose cumulée max. ($mSv.an^{-1}$)	Date de dose cumulée max. (milliers d'années)	Dose cumulée max. ($mSv.an^{-1}$)	Date de dose cumulée max. (milliers d'années)
Situation de référence	Pompage au Barrois	$2,3 \times 10^{-04}$	≥ 1 000	$2,6 \times 10^{-04}$	≥1 000
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse)	$1,2 \times 10^{-03}$	690	$1,3 \times 10^{-03}$	700
Situation enveloppe	Pompage au Barrois Stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres	$4,4 \times 10^{-02}$	580	$4,8 \times 10^{-02}$	580
	Pompage à l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) Stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres	$1,9 \times 10^{-01}$	600	$2,0 \times 10^{-01}$	600
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse) Stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres	$7,4 \times 10^{-02}$	370	$7,9 \times 10^{-02}$	370

Tableau 7-4 *Scénario d'évolution normale : doses cumulées maximales et occurrences des doses cumulées maximales aux principaux exutoires retenus en situation de référence (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans le Dogger ») et en situation enveloppe (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien », « Pompage dans le Dogger »), pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée ou chaude et la classe d'âge enfant de 1 an*

		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
	Enfant de 1 an	Dose cumulée max. ($mSv.an^{-1}$)	Date de dose cumulée max. (milliers d'années)	Dose cumulée max. (mSv.an-1)	Date de dose cumulée max. (milliers d'années)
Situation de référence	Pompage au Barrois	$3,6 \times 10^{-04}$	930	$4,3 \times 10^{-04}$	930
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse)	$1,2 \times 10^{-03}$	660	$1,5 \times 10^{-03}$	660
Situation enveloppe	Pompage au Barrois Stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres	$5,5 \times 10^{-02}$	570	$6,3 \times 10^{-02}$	570
	Pompage à l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) Stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres	$2,2 \times 10^{-01}$	600	$2,5 \times 10^{-01}$	600
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse) Stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres	$8,5 \times 10^{-02}$	370	$9,6 \times 10^{-02}$	370

7.3 La vérification des incidences sanitaires sur l'homme liées à un éventuel transfert de substances toxiques chimiques dans la biosphère

Pour les substances toxiques chimiques, une étude d'incidence sur la santé humaine n'est engagée que pour celles susceptibles d'engendrer des risques sanitaires.

Le comportement des substances toxiques chimiques est très proche de celui des radionucléides, en l'occurrence, la très grande majorité d'entre elles sont retenues par rétention chimique en champ proche des ouvrages de stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 6 du présent volume).

En effet, pour mémoire et comme le montrent les deux graphes de la figure 7-9 issus du chapitre 6 du présent volume, respectivement en situation de référence et en situation enveloppe, seules les substances toxiques chimiques mobiles, c'est-à-dire le sélénium (déjà présent en tant que radionucléide), le cyanure, ainsi que le bore en situation enveloppe uniquement, présentent des débits massiques significativement supérieurs à 10^{-10} kg.an^{-1} en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien.

Les autres substances toxiques chimiques présentent soit des débits massiques inférieurs à 10^{-10} kg.an^{-1}, soit des débits massiques avec des occurrences nettement plus tardives que celles des éléments mobiles cités ci-avant, du fait de leur sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien.

Historiques des débits massiques au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	
Situation de référence	Situation enveloppe

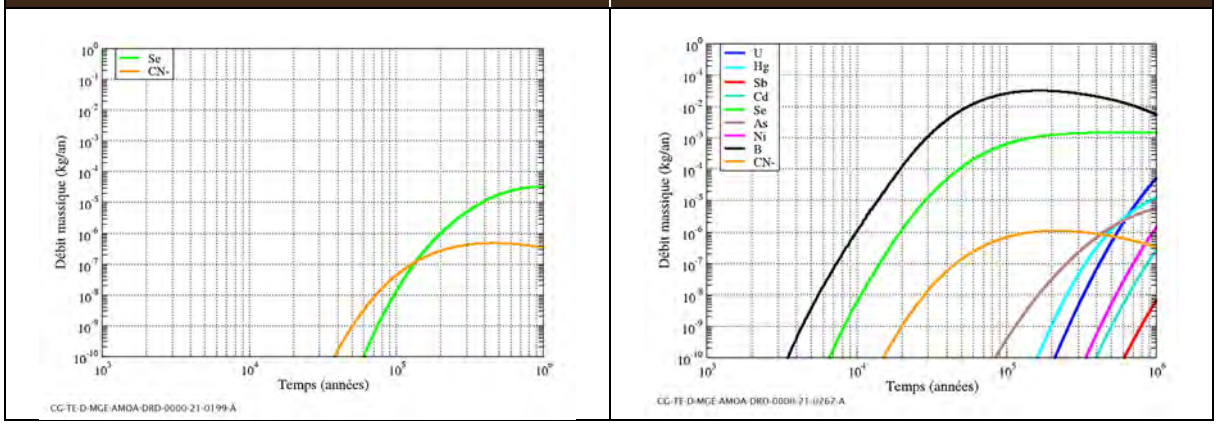


Figure 7-9 *Scénario d'évolution normale : historiques des débits massiques des principales substances toxiques chimiques au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, en situation de référence (à gauche) et en situation enveloppe (à droite)*

Conformément à la démarche présentée au chapitre 1 du présent volume, les incidences sanitaires relatives aux substances toxiques chimiques sont évaluées en termes de concentrations aux exutoires et celles-ci sont comparées aux normes réglementaires de qualité environnementale (NQE) qui correspondent aux concentrations limites de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine indiquées dans l'arrêté du 11 janvier 2007 (63).

Les concentrations maximales aux exutoires obtenues pour les substances toxiques chimiques sont inférieures de plusieurs ordres de grandeur aux NQE. À titre illustratif, les concentrations maximales des deux principales substances toxiques chimiques mobiles (sélénium, bore) sont détaillées ci-après[94].

- Pour la situation de référence :

  La concentration maximale en sélénium (principale espèce anionique mobile) est d'au moins quatre à cinq ordres de grandeur inférieure à la NQE de cet élément (10 $\mu g.L^{-1}$), pour les deux exutoires retenus (« Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »).

- Pour la situation enveloppe :

  La concentration maximale en bore (principale espèce mobile en situation enveloppe) est de trois à quatre ordres de grandeur inférieure à la NQE de cet élément (1 000 $\mu g.L^{-1}$), pour les trois principaux exutoires retenus (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »).

  La concentration maximale en sélénium (principale espèce anionique mobile) est d'environ trois ordres de grandeur inférieure à la NQE de cet élément (10 $\mu g.L^{-1}$), pour les trois principaux exutoires retenus (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »).

Conclusion

L'évaluation du scénario d'évolution normale confirme que les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien et les dispositions de conception permettent d'atténuer la migration de la majorité des substances toxiques chimiques vers la surface. Seuls les éléments mobiles, principalement le sélénium, et le bore en situation enveloppe uniquement, parviennent aux exutoires.

Les concentrations maximales aux exutoires obtenues pour ces substances toxiques chimiques sont inférieures de plusieurs ordres de grandeur aux Normes réglementaires de Qualité Environnementale (NQE).

[94] Pour mémoire (cf. Chapitre 6 du présent volume), les concentrations en cyanure aux exutoires sont très faibles, en lien notamment avec le faible inventaire dans les colis de déchets pour cet élément.

8

Les scénarios d'évolution altérée (SEA)

8.1 Les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface 454

8.2 Les SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) 490

8.3 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios d'évolution altérée 500

8.1 Les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface

8.1.1 La description et la conceptualisation des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface

Comme présenté au chapitre 3 du présent volume, il a été identifié trois scénarios de dysfonctionnement des scellements par l'interface de type SEA. Ces scénarios d'évolution altérée sont les suivants et les modalités de leur représentation associées sont synthétisées dans le tableau 8-1 :

- scénario de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (LSF) par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien (scellements des galeries opérants) ;
- scénario de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien (scellements des liaisons surface-fond opérants) ;
- scénario de dysfonctionnement de tous les scellements (liaisons surface-fond et galeries) par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien.

Comme présenté au chapitre 3 du présent volume, seuls les composants dysfonctionnant sont représentés de manière différente par rapport au scénario d'évolution normale (SEN) à partir duquel sont définis les scénarios d'évolution altérée (SEA). Il est ainsi défini deux cas d'évaluation pour chaque scénario d'évolution altérée identifié :

- un cas d'évaluation s'appuyant sur les hypothèses et données de la situation de référence du SEN ;
- un cas d'évaluation s'appuyant sur les hypothèses et données de la situation enveloppe du SEN.

Pour l'ensemble de ces scénarios, il est par ailleurs postulé le dysfonctionnement des scellements par l'interface dès la fermeture du stockage.

Tableau 8-1 Scénarios d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des scellements par l'interface

SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface	Typologie de scellements		
	Scellement de puits (LSF)	Scellement de descenderies (LSF)	Scellement des galeries
SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface »	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites non efficace	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites non efficace	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites efficace
SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites efficace	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites efficace	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites non efficace
SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites non efficace	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites non efficace	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites non efficace

Les SEA de dysfonctionnement des scellements définis sur la base de la situation enveloppe du SEN considèrent que le stockage est positionné au plus bas dans la couche du Callovo-Oxfordien (position qui se traduit par une garde saine de 50 mètres par rapport au mur de la couche du Callovo-Oxfordien). Cette hypothèse permet de maximiser la voie de transfert par les ouvrages et donc les possibilités de court-circuit de la couche du Callovo-Oxfordien par la voie « ouvrage ».

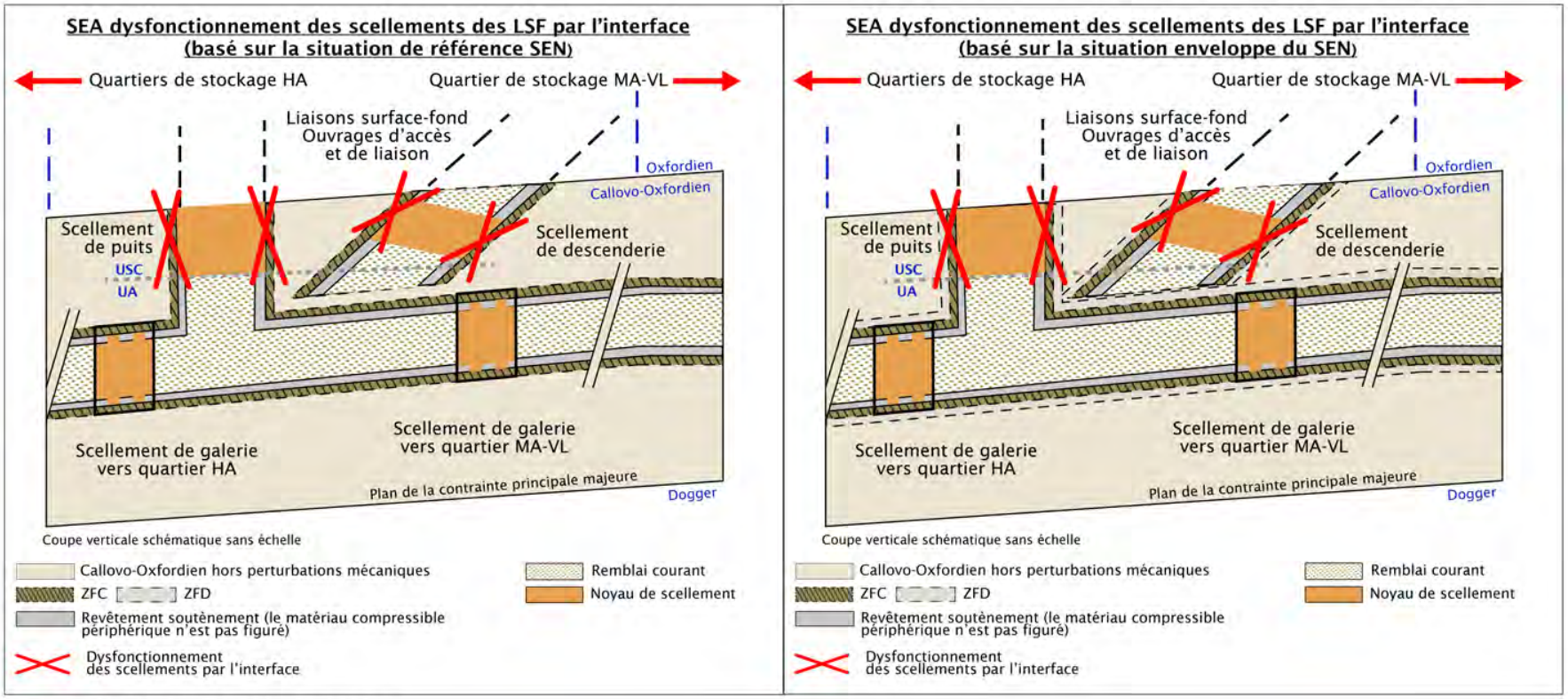
Comme en SEN, les champs hydrauliques en SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface sont établis en régime permanent (état stationnaire). Ce choix est associé au fait de considérer un état saturé dès l'instant initial, afin de maximiser les flux de radionucléides au sein des ouvrages.

8.1.1.1 La description du SEA « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface »

L'analyse des risques et incertitudes des scellements présentée au chapitre 2 du présent volume conduit à considérer un dysfonctionnement de tous les scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT) par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien. Les scellements des galeries de fond dans l'unité argileuse (UA) sont considérés comme efficaces (cf. Figure 8-1).

Ce dysfonctionnement de l'interface se traduit par la présence d'une zone de fracturation connectée (ZFC) au droit du noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies). Cette ZFC est également représentée au droit de l'ensemble des ouvrages dans l'USC/UT.

Le gonflement du noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond est considéré comme performant, ses caractéristiques hydrauliques sont donc celles considérées dans le SEN pour chaque situation.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0003-B

Figure 8-1 *Schéma illustratif du SEA de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)*

Les hypothèses et données pour la conceptualisation des scellements des liaisons surface-fond sont présentées dans les chapitres suivants et illustrées en figure 8-2 pour le SEA basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et en figure 8-3 pour le SEA basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN.

8.1.1.1.1 La représentation du dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond localisés dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT)

a) Extension de la ZFC considérée pour représenter le dysfonctionnement des scellements dans l'USC/UT

L'extension de la ZFC considérée pour représenter le dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface est définie sur la base des observations faites au Laboratoire souterrain Meuse/Haute-Marne, dans la niche au niveau -445 mètres. Ces observations ne correspondent pas à une ZFC (*i.e.* Fracturation connectée) mais à une fracturation éparse (microfissurée) et non connectée longitudinalement. Il est considéré une représentation de la ZFC sur une épaisseur équivalente.

L'extension radiale de la ZFC considérée est de 0,2 fois le rayon excavé conformément aux observations effectuées de la fracturation éparse au laboratoire souterrain dans l'USC/UT.

b) Propriétés hydrauliques, de transport et de rétention de la ZFC considérée pour représenter le dysfonctionnement des scellements

Il est fait le choix de prendre en compte un auto-colmatage (*i.e.* Cicatrisation hydraulique) imparfait le long des ouvrages dans l'USC/UT.

Il est considéré pour le SEA dont les paramètres sont basés sur la situation de référence du SEN et celui basé sur la situation enveloppe du SEN, une conductivité hydraulique de la ZFC augmentée d'un ordre de grandeur par rapport à celle définie au droit des galeries remblayées en situation de référence du SEN ($K = 10^{-8}$ $m.s^{-1}$).

Les propriétés de transport et de rétention chimique de la ZFC considérées pour représenter le dysfonctionnement des scellements des liaisons surface fond localisés dans l'USC/UT sont assimilées à celles de la ZFC au droit des galeries remblayées (qui sont, elles localisées dans l'UA) de la situation du SEN considérée (cf. Chapitre 5 du présent volume).

8.1.1.1.2 La représentation des sections courantes des descenderies, hors scellements

Il est considéré une ZFC continue le long de l'ensemble des scellements dans l'USC/UT (descenderies remblayées et scellements des liaisons surface-fond). À ce titre, la ZFC est représentée avec la même extension qu'au droit du noyau argileux.

La perturbation alcaline issue des composants en béton et son influence sur la ZFC sont traitées de la même manière que pour la ZFC au droit des galeries remblayées dans l'UA.

Il est donc considéré vis-à-vis des propriétés hydrauliques et de transport dans la ZFC au droit des ouvrages remblayés dans l'USC/UT :

- pour le SEA dont les paramètres sont basés sur la situation de référence du SEN, les propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique sont identiques à celles définies au droit du noyau argileux ;
- pour le SEA dont les paramètres sont basés sur la situation enveloppe du SEN, les propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique sont identiques aux valeurs définies au droit des galeries remblayées considérant une reminéralisation sur toute l'épaisseur de la ZFC.

8.1.1.1.3 La représentation des scellements des galeries (localisés dans l'unité argileuse (UA))

Les scellements des galeries sont considérés performants. Ils sont représentés de la même manière et avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique que dans la situation du SEN considérée (cf. Chapitre 5 du présent volume).

8.1.1.1.4 La représentation des ouvrages dans l'unité argileuse (UA) (hors scellements) et des composants naturels (couche du Callovo-Oxfordien et formations encaissantes)

Les autres composants du stockage sont représentés de la même manière et avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique que dans la situation du SEN considérée (cf. Chapitre 5 du présent volume).

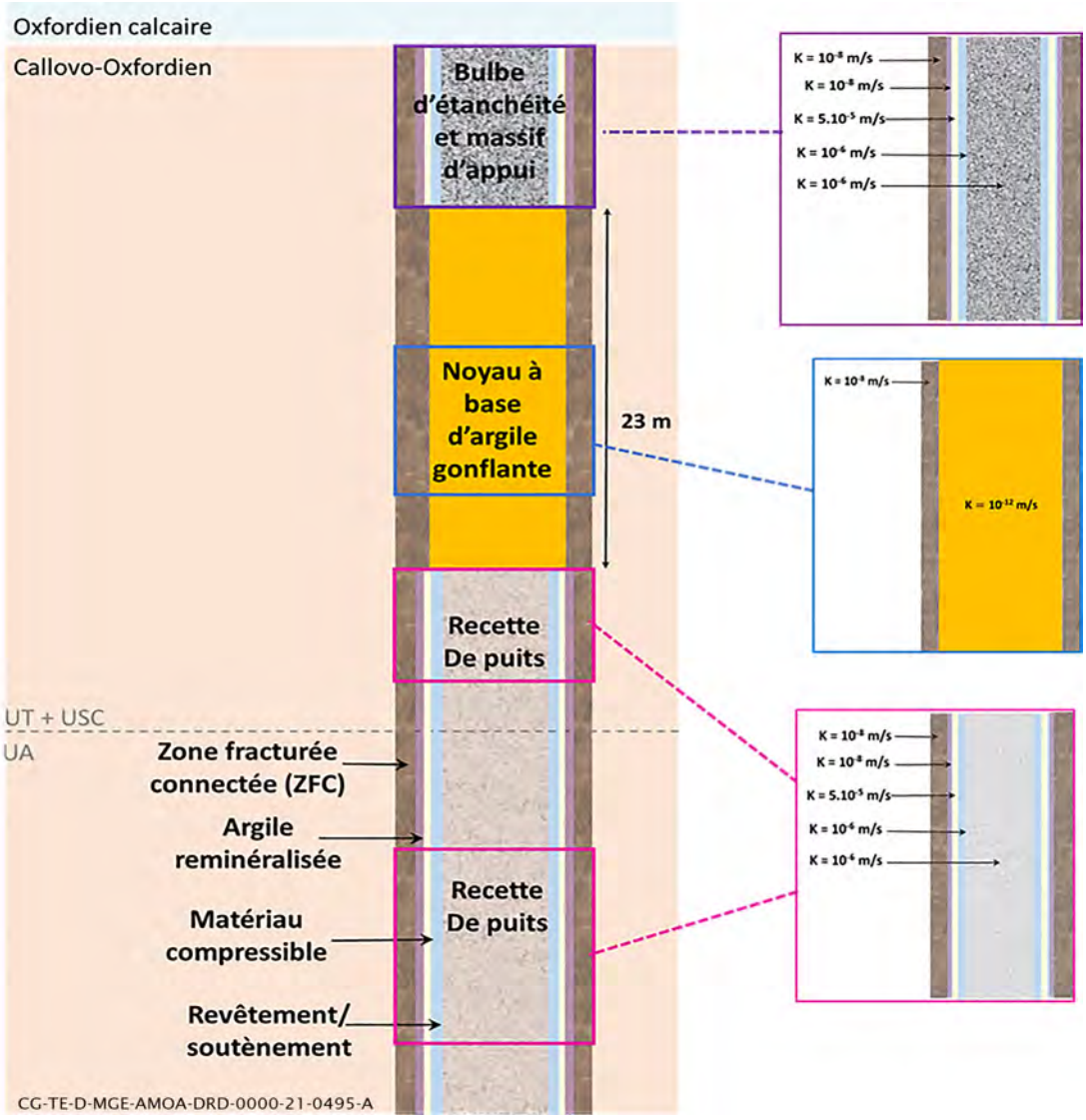


Figure 8-2 *Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en SEA de dysfonctionnement des LSF par l'interface (basé sur la situation de référence du SEN)*

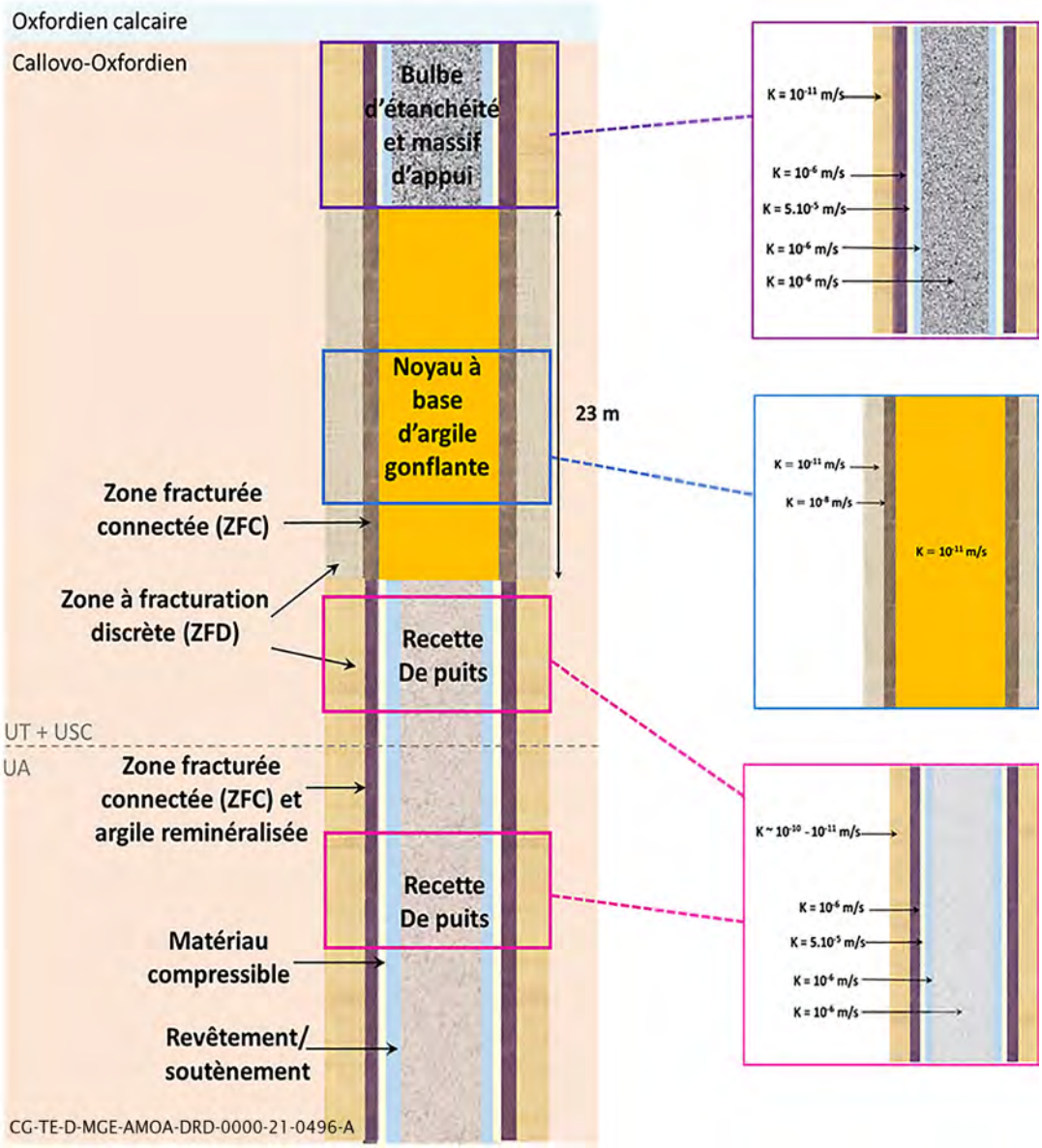


Figure 8-3 *Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en SEA de dysfonctionnement des LSF par l'interface (basé sur la situation enveloppe du SEN)*

8.1.1.2 La description du SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »

Ce SEA considère le dysfonctionnement de l'ensemble des scellements des galeries par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 3 du présent volume). Les scellements des liaisons surface-fond dans l'USC/UT sont considérés comme efficaces (cf. Figure 8-4).

L'analyse des risques et incertitudes des scellements, présentée au chapitre 2 du présent volume, conduit à considérer le dysfonctionnement de l'ensemble des scellements de galeries résultant d'une cicatrisation hydraulique non efficace de la ZFC dans l'UA et notamment au droit des zones de dépose du revêtement.

Le gonflement du noyau argileux des scellements des galeries dans l'UA est considéré comme performant, ses caractéristiques hydrauliques sont donc identiques à celles de la situation du SEN dont les paramètres servent de base au SEA.

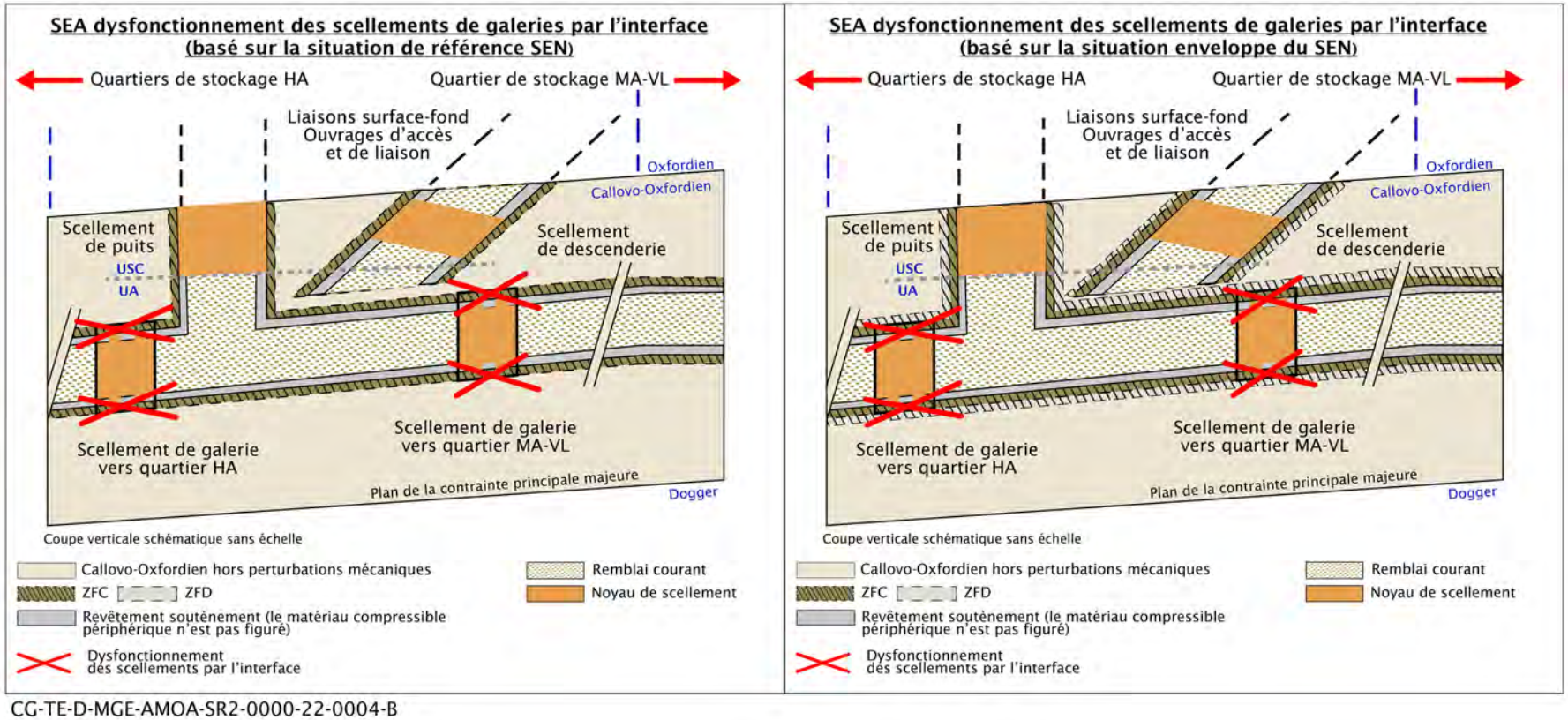


Figure 8-4 *Schéma illustratif du SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)*

Les hypothèses et données pour la conceptualisation des scellements des liaisons surface-fond sont présentées dans les chapitres suivants et illustrées en figure 8-5 pour le SEA basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et en figure 8-6 pour le SEA basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN.

8.1.1.2.1 La représentation du dysfonctionnement des scellements de galerie dans l'unité argileuse (UA)

a) Extension de la ZFC considérée pour représenter le dysfonctionnement des scellements

L'extension de la ZFC au droit des scellements est identique à celle définie au droit des ouvrages dans l'UA en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

b) Propriétés hydrauliques, de transport et de rétention de la ZFC considérée pour représenter le dysfonctionnement des scellements

Pour tenir compte d'une cicatrisation hydraulique non efficace, la conductivité hydraulique de la ZFC considérée pour représenter le dysfonctionnement des scellements est augmentée d'un ordre de grandeur par rapport à celle définie au droit des galeries remblayées en situation de référence du SEN, ce qui est représentatif d'une cicatrisation dégradée ($K = 10^{-8}$ $m.s^{-1}$).

Les propriétés de transport et de rétention chimique de la ZFC dans l'UA sont identiques à celles du SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

8.1.1.2.2 La représentation des ouvrages dans l'unité argileuse (UA) (hors scellements de galerie)

L'efficacité moindre de la cicatrisation hydraulique est également prise en compte dans la ZFC au droit des ouvrages réalisés dans l'UA (sections courantes de galerie, liaisons surface-fond, alvéoles de stockage ; cf. Chapitres 2 et 3 du présent volume).

8.1.1.2.3 La représentation des scellements des liaisons surface-fond dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT)

Les scellements des liaisons surface-fond sont considérés performants. Ils sont représentés de la même manière et avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique qu'en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

8.1.1.2.4 La représentation des ouvrages dans l'USC/UT (hors scellement) et des composants naturels (couche du Callovo-Oxfordien et formations encaissantes)

Les autres composants du stockage sont représentés de la même manière et avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique qu'en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

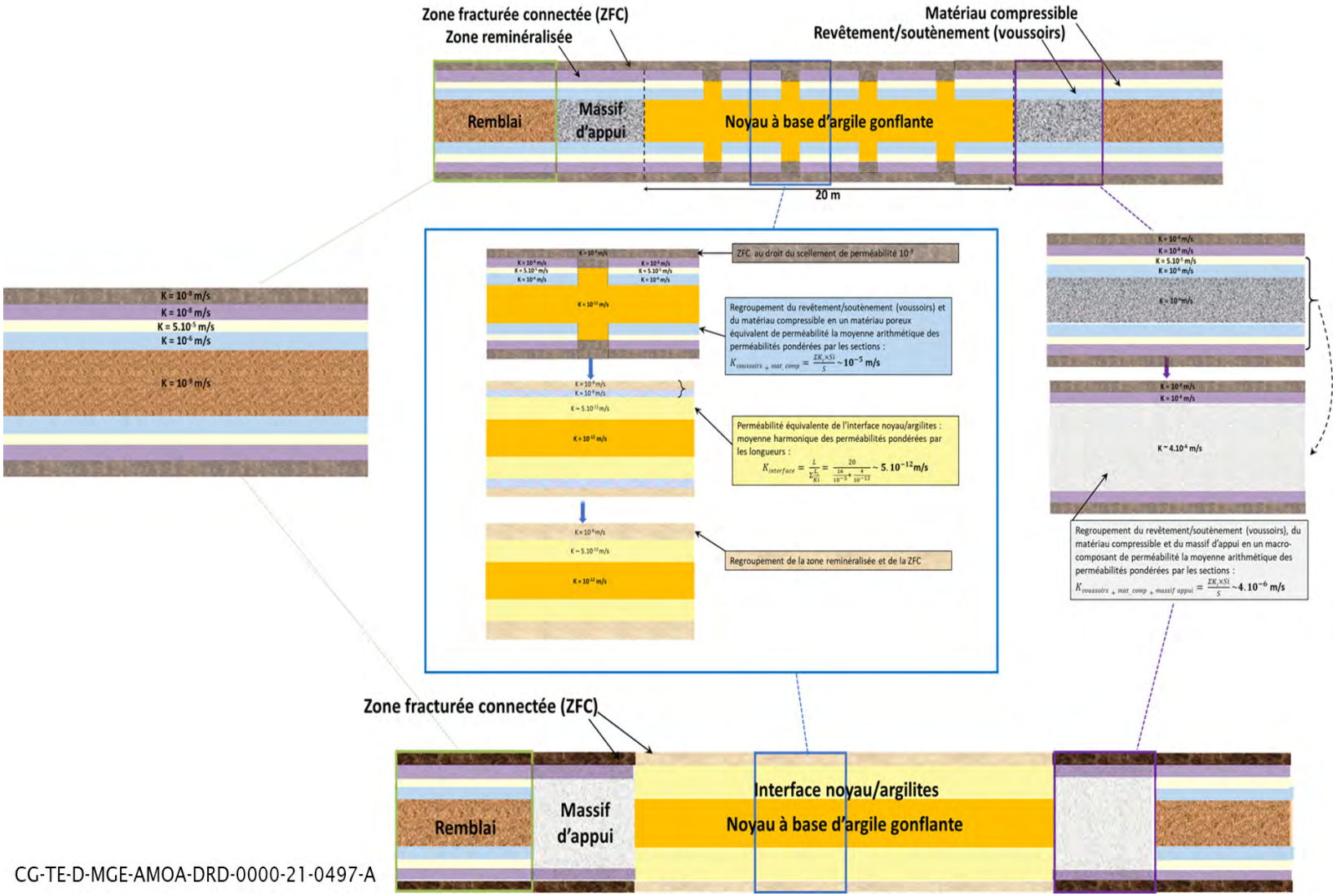


Figure 8-5 *Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de galerie en SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface (basé sur la situation de référence du SEN)*

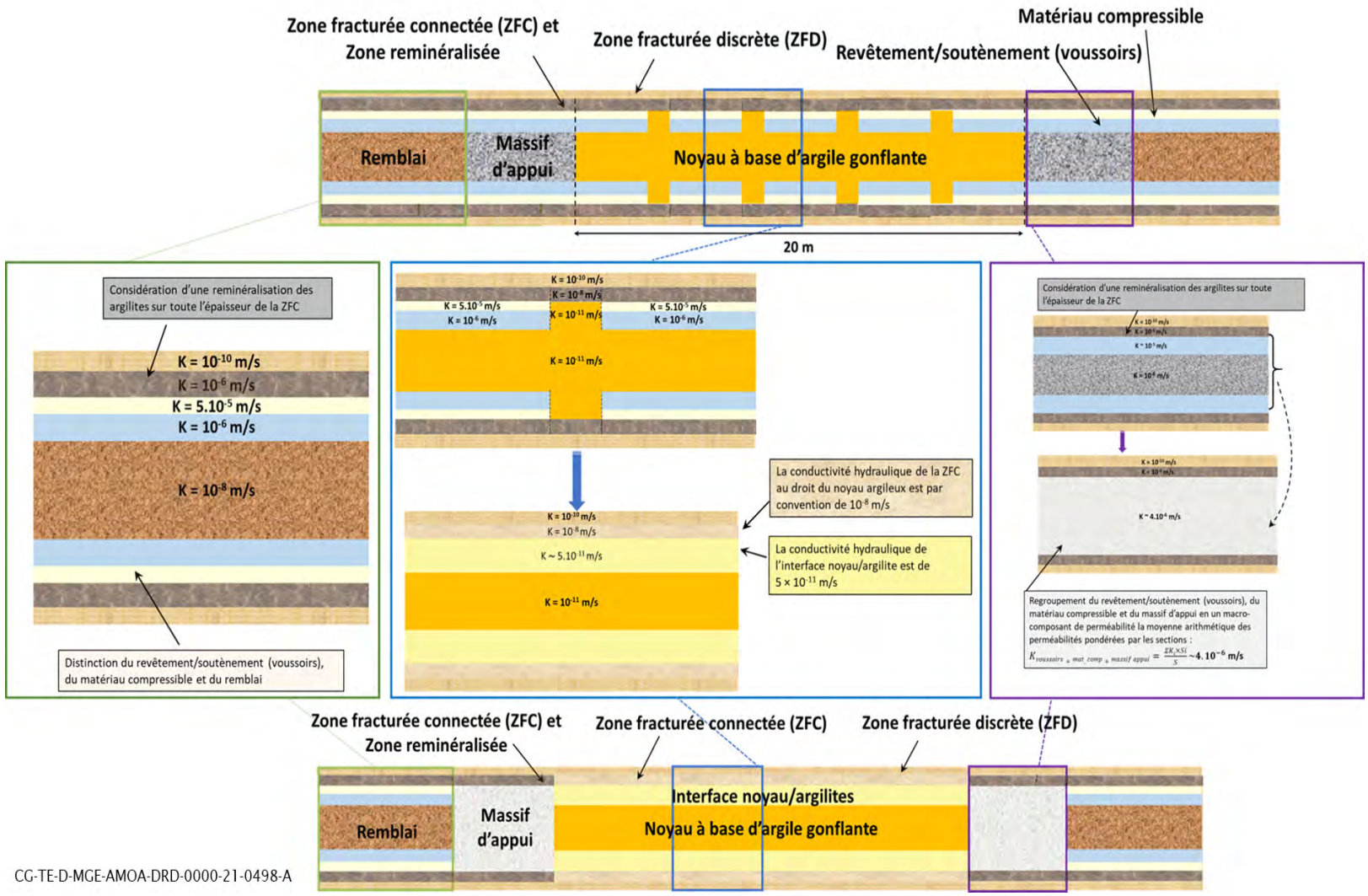
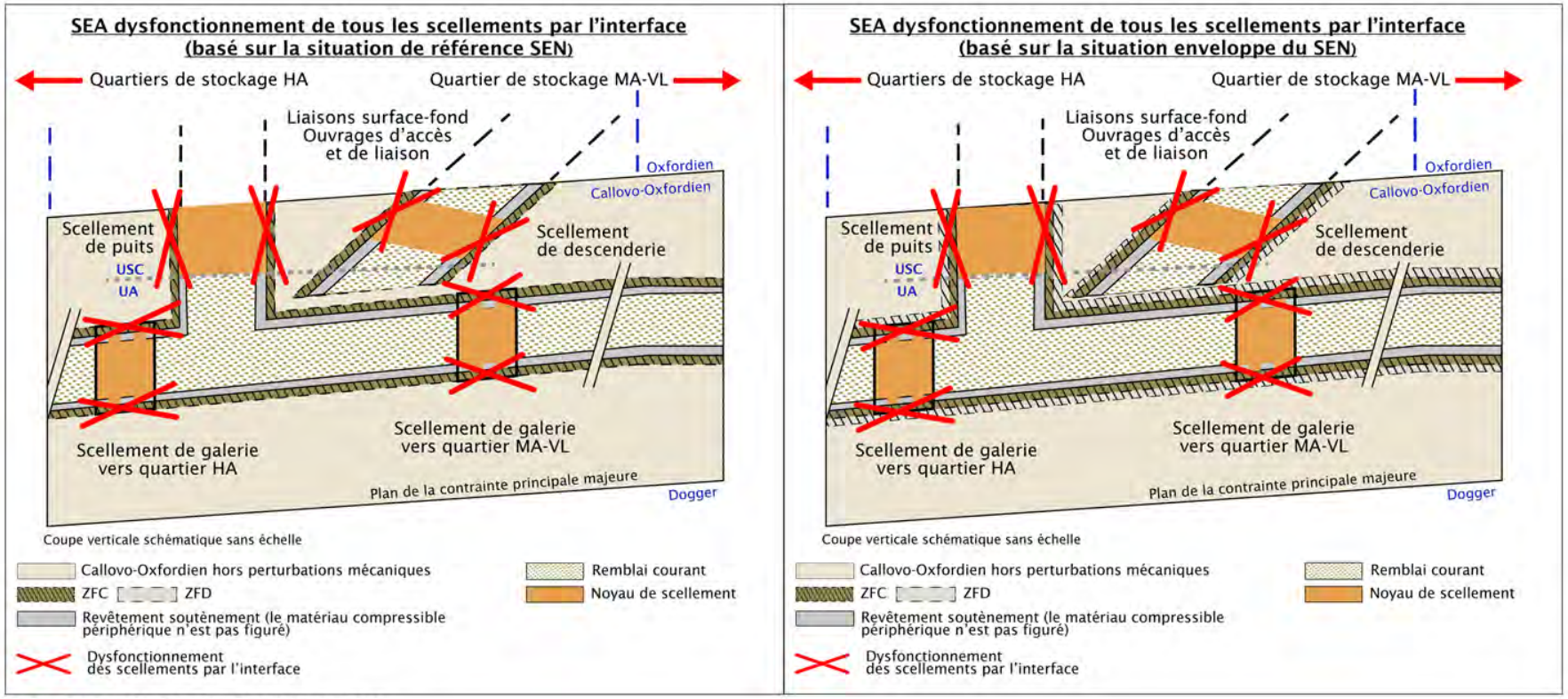


Figure 8-6 *Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de galerie en SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface (basé sur la situation enveloppe du SEN)*

8.1.1.3 La description du SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »

Ce SEA considère le dysfonctionnement par l'interface de tous les scellements (galeries et liaisons surface-fond) devant concourir à augmenter la résistance hydraulique des ouvrages du stockage. Il postule une cause commune de dysfonctionnement par l'interface (cf. Chapitre 3 du présent volume). Le noyau argileux des scellements des galeries et des liaisons surface-fond préserve ses performances et atteint la conductivité hydraulique retenue pour chaque situation du SEN.

La prise en compte de cette cause commune de dysfonctionnement, bien que peu vraisemblable, conduit à représenter une zone fracturée connectée (ZFC) continue le long de l'ensemble des scellements dans l'UA, l'UT et l'USC, depuis les alvéoles de stockage jusqu'au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, et dont les caractéristiques hydrauliques sont définies en prenant en compte une cicatrisation hydraulique dégradée (cf. Figure 8-7).



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0005-B

Figure 8-7 *Schéma illustratif du SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)*

8.1.1.3.1 La représentation du dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT) et des autres ouvrages dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT) (hors scellements)

Le dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond est représenté de la même manière que dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface » (cf. Chapitre 8.1.1.1 du présent volume).

Les autres ouvrages dans l'USC/UT sont représentés de la même manière que dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface » (cf. Chapitre 8.1.1.1 du présent volume).

8.1.1.3.2 La représentation du dysfonctionnement des scellements des galeries dans l'unité argileuse (UA) et des autres ouvrages dans l'unité argileuse (UA) (hors scellements)

Le dysfonctionnement des scellements des galeries est représenté de la même manière que dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface » (cf. Chapitre 8.1.1.2 du présent volume).

Les autres ouvrages dans l'UA (galeries remblayées, liaisons surface-fond et alvéoles) sont représentés de la même manière que dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface » (cf. Chapitre 8.1.1.2 du présent volume).

8.1.1.3.3 La représentation des composants naturels (couche du Callovo-Oxfordien et formation encaissantes)

Les autres composants du stockage sont représentés de la même manière et avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique qu'en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

8.1.1.4 Les indicateurs considérés

La performance et la robustesse du système de stockage en cas de dysfonctionnement des scellements par l'interface est évaluée par un ensemble d'indicateurs utilisés pour l'évaluation du SEN (cf. Chapitre 5.4 du présent volume), c'est-à-dire :

- les temps de transfert et la capacité de drainage du stockage : ces indicateurs permettent d'évaluer les temps de transfert diffusif/convectif dans la couche du Callovo-Oxfordien et dans les ouvrages (galeries et liaisons surface-fond). Cet indicateur est notamment approprié pour évaluer la fonction « S'opposer à la circulation d'eau » ;
- les quantités de radionucléides et des toxiques chimiques transitant le long et/ou dans les ouvrages et migrant par diffusion dans la couche du Callovo-Oxfordien. L'évaluation de ces deux voies de transfert permet d'une part, d'apprécier la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques », et d'autre part, de calculer le *ratio* des débits molaires afférents. L'évaluation de ce dernier indicateur permet d'apprécier l'impact du dysfonctionnement du scellement sur la dominance de la voie de transfert à travers la couche du Callovo-Oxfordien ;
- la dose et les concentrations en substances toxiques chimiques obtenues aux exutoires : ces indicateurs sont quantifiés lorsque nécessaires (si les résultats des indicateurs intermédiaires sont sensiblement différents de ceux du SEN, (cf. Chapitre 1 du présent volume), afin de vérifier que l'objectif de protection de l'homme soit toujours satisfait.

8.1.1.5 La synthèse des paramètres hydrauliques associés à la ZFC dans les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface

Les propriétés hydrauliques de la fracturation connectée (ZFC) considérées au droit des scellements pour représenter un dysfonctionnement des scellements par l'interface, sont dégradées par rapport à celles du SEN et sont résumées dans le tableau 8-2.

Tableau 8-2 Valeurs des conductivités hydrauliques des argilites endommagées mécaniquement (ZFC) pour les scénarios d'évolution altérée de dysfonctionnement des scellements par l'interface (les valeurs dégradées dans le cadre des SEA sont ombrées)

Unité	Zone d'argilites endommagées	Situation enveloppe				Situation de référence			
		SEN	SEA « Dysf. des scellements des LSF »	SEA « Dysf. des scellements des galeries »	SEA « Dysf. de tous les scellements »	SEN	SEA « Dysf. des scellements des LSF »	SEA « Dysf. des scellements des galeries »	SEA « Dysf. de tous les scellements »
UA	ZFC au droit des zones de dépose des scellements des galeries	5×10^{-9}	5×10^{-9}	10^{-8}	10^{-8}	10^{-11}	10^{-11}	10^{-8}	10^{-8}
	ZFC au droit du revêtement laissé en place des scellements des galeries					10^{-9}	10^{-9}		
	ZFC au droit du revêtement (hors scellements)	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-8}
	ZFD	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	N/A	N/A	N/A	N/A
USC/UT	ZFC au droit du noyau argileux des scellements des LSF	N/A	10^{-8}	N/A	10^{-8}	N/A	10^{-8}	N/A	10^{-8}
	ZFC au droit du revêtement (hors scellement)	N/A	10^{-6}	N/A	10^{-6}	N/A	10^{-8}	N/A	10^{-8}
	ZFD	10^{-11}	10^{-11}	10^{-11}	10^{-11}	N/A	N/A	N/A	N/A

8.1.2 Les résultats des évaluations des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface

8.1.2.1 Les effets du dysfonctionnement des scellements par l'interface (ZFC) sur les circulations d'eau dans le stockage

Pour mémoire, du fait de la position du quartier de stockage MA-VL en « amont hydraulique » par rapport aux liaisons surface-fond vis-à-vis des écoulements horizontaux dans l'Oxfordien, l'essentiel de l'eau drainée par les liaisons surface-fond provient du quartier de stockage MA-VL. La contribution hydraulique des quartiers de stockage HA est très faible.

8.1.2.1.1 Le SEA « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface (ZFC) »

Pour le SEA dont les paramètres sont basés sur la situation de référence du SEN, le dysfonctionnement par l'interface des seuls scellements des liaisons surface-fond, conduit à des débits d'eau plus importants à la sortie des liaisons surface-fond, d'environ quelques centaines de litres par an, provenant essentiellement de la zone centrale, et non des quartiers de stockage HA et MA-VL du fait des scellements de galeries efficaces.

L'efficacité des scellements de galeries leur permet en effet d'assurer des pertes de charges et ainsi de limiter les vitesses d'écoulement en sortie du quartier de stockage MA-VL, de l'ordre de 30 mètres par 100 000 ans au niveau du revêtement-soutènement des galeries et d'environ 1 km tous les 100 000 ans dans la zone d'interface plus perméable à l'extrados des voussoirs (cf. Tableau 8-3), soit des valeurs supérieures d'un facteur 3 à celles évaluées dans le cadre du scénario d'évolution normale (tous scellements efficaces).

Le SEA dont les paramètres sont basés sur la situation enveloppe du SEN conduit à des débits d'eau de l'ordre de 7 m^3 par an provenant de la zone centrale et d'une partie du quartier de stockage MA-VL (cf. Tableau 8-3). L'influence de la perturbation hydraulique reste néanmoins limitée du fait de l'efficacité des scellements de galeries (cf. Figure 8-8) qui leur permet d'assurer des pertes de charges encore significatives[95].

La vitesse d'écoulement de l'eau en sortie du quartier de stockage MA-VL est plus importante, de l'ordre de 800 m par 100 000 ans au niveau du revêtement-soutènement des galeries et d'environ 28 km tous les 100 000 ans dans la zone d'interface plus perméable, valeurs supérieures d'un facteur 4 à celles évaluées en scénario d'évolution normale (cf. Tableau 8-3). Ces vitesses d'écoulement, qui apparaissent importantes intrinsèquement, sont néanmoins suffisamment faibles pour permettre la diffusion des solutés depuis les galeries vers la couche du Callovo-Oxfordien.

8.1.2.1.2 Le SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »

Pour le SEA dont les paramètres sont basés sur la situation de référence du SEN, le dysfonctionnement des seuls scellements des galeries (c'est-à-dire les scellements des liaisons surface-fond étant efficaces), conduit à des débits d'eau de l'ordre du litre par an à la sortie des liaisons surface-fond, similaires à ceux évalués en SEN (tous scellements efficaces). L'efficacité des scellements des liaisons surface-fond permet d'assurer à elle seule, la limitation des débits d'eau dans les ouvrages souterrains (cf. Tableau 8-3).

[95] De l'ordre de deux mètres.

Pour le SEA dont les paramètres sont basés sur la situation enveloppe du SEN, le dysfonctionnement des scellements de galeries par l'interface se traduit par des débits d'eau à la sortie des liaisons surface-fond à peine supérieurs à ceux évalués en situation enveloppe du scénario d'évolution normale (cf. Tableau 8-3). Ce faible écart tient au fait que les circulations d'eau au sein des ouvrages du stockage sont alors pilotées par le gradient hydraulique horizontal de l'Oxfordien (vers le nord, depuis le quartier de stockage MA-VL vers les quartiers de stockage HA) et se compensent mutuellement. La vitesse d'écoulement de l'eau est ainsi de l'ordre de 300 mètres par 100 000 ans au niveau du revêtement-soutènement et d'environ 8 km tous les 100 000 ans dans la zone d'interface des galeries en sortie du quartier de stockage MA-VL, et de l'ordre de 100 mètres par 100 000 ans au niveau du revêtement-soutènement et d'environ 4 km tous les 100 000 ans dans la zone d'interface au niveau des galeries de liaison principales du quartier de stockage HA.

8.1.2.1.3 Le SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »

Ce scénario se traduit par une perturbation hydraulique dans le stockage plus importante que pour les deux autres SEA, dans la mesure où tous les scellements contribuant à générer une résistance hydraulique dans le stockage (galeries et liaisons surface-fond) présentent un dysfonctionnement par l'interface. La charge hydraulique de l'Oxfordien se propage ainsi plus facilement depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusque dans le stockage.

Cette propagation est accentuée avec les paramètres de la situation enveloppe du SEN (cf. Figure 8-8). La charge hydraulique de l'Oxfordien calcaire se propage alors dans l'ensemble du stockage et engendre un transfert convectif dominant depuis les quartiers de stockage vers les liaisons surface-fond : le débit d'eau en sortie des liaisons surface-fond est donc plus important, de l'ordre de 8 m^3 par an, et provient de l'ensemble du stockage (zone centrale et quartiers de stockage HA et MA-VL) (cf. Tableau 8-3).

Tableau 8-3 *Débits d'eau sortant des liaisons surface-fond (LSF) et vitesses d'écoulement en sortie de quartier de stockage MA-VL pour le SEN et les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface (paramètres des situations de référence et enveloppe du SEN)*

Scénario	Débit d'eau sortant des LSF ($L.an^{-1}$)		Vitesse d'écoulement en sortie de quartier de stockage MA-VL ($mm.an^{-1}$)	
	Situation de référence	Situation enveloppe	Situation de référence	Situation enveloppe
SEN (tous scellements efficaces)	1	330	0,1 (revêtement-soutènement) 3 (zone d'interface)	2 (revêtement-soutènement) 70 (zone d'interface)
SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface »	400	7 300	0,3 (revêtement-soutènement) 10 (zone d'interface)	8 (revêtement-soutènement) 280 (zone d'interface)
SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »	1	450	1 (revêtement-soutènement) 40 (zone d'interface)	3 (revêtement-soutènement) 80 (zone d'interface)

Scénario	Débit d'eau sortant des LSF ($L.an^{-1}$)		Vitesse d'écoulement en sortie de quartier de stockage MA-VL ($mm.an^{-1}$)	
	Situation de référence	Situation enveloppe	Situation de référence	Situation enveloppe
SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »	300	8 000	1 (revêtement-soutènement) 40 (zone d'interface)	8 (revêtement-soutènement) 280 (zone d'interface)

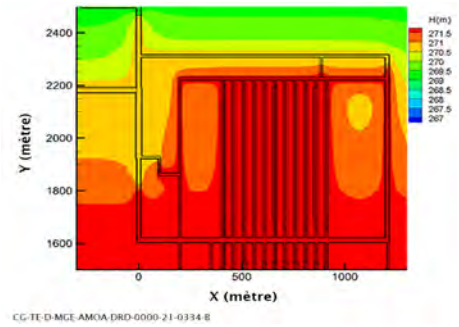
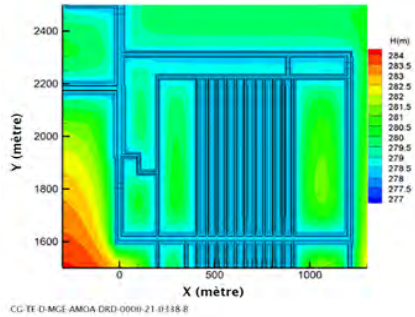
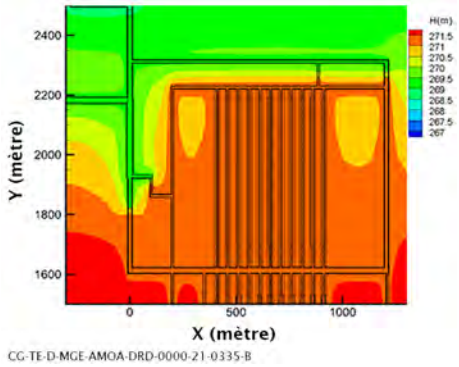
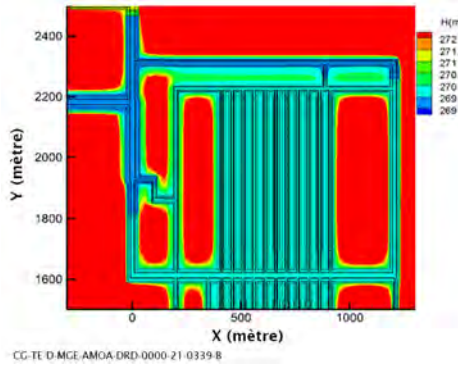
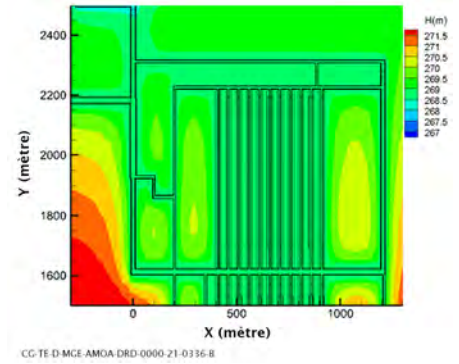
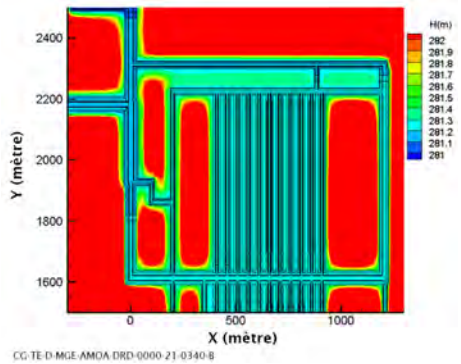
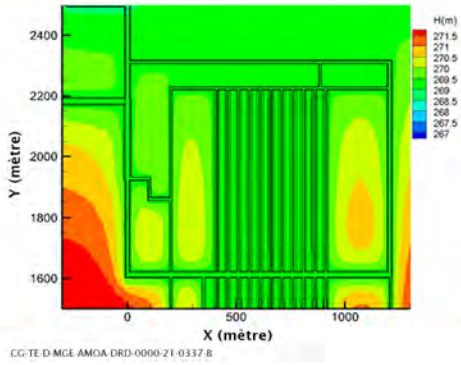
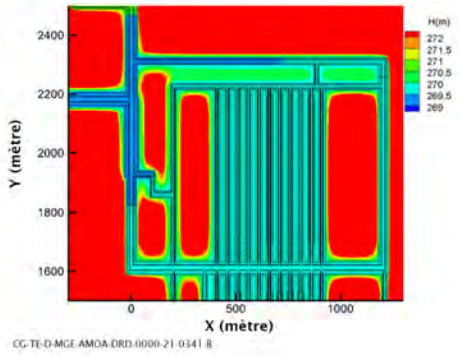
	Situation de référence	Situation enveloppe
SEN (tous scellements efficaces)		
SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface »		
SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »		
SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »		

Figure 8-8 *SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface, paramètres de la situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) du SEN : champs de charges hydrauliques (m) dans le quartier de stockage MA-VL*

8.1.2.2 Les résultats des évaluations des SEA vis-à-vis du transfert des radionucléides

La capacité du stockage et de la couche de Callovo-Oxfordien à retarder et atténuer la migration des radionucléides dans les différents SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface (ZFC) est présentée ci-après pour les principaux radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), ainsi que pour les autres radionucléides dont le débit molaire en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien est supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1}.

8.1.2.2.1 Le comportement du stockage et le transfert de l'iode 129

Pour le scénario d'évolution normale (situations de référence et enveloppe), la diffusion est le processus de transfert dominant des radionucléides dans tous les composants du stockage. Le dysfonctionnement des scellements par l'interface provoque un accroissement des vitesses de transfert par convection dans les ouvrages du stockage et augmente ainsi le transfert des radionucléides depuis les colis jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien par la voie de transfert « ouvrages ».

Avec les paramètres de la situation de référence du SEN, le caractère dominant ou non de la convection et de la diffusion varie selon les scénarios de dysfonctionnement considérés :

- en cas de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface, la convection est dominante seulement dans les liaisons surface-fond et la diffusion est dominante dans la zone centrale jusqu'aux quartiers de stockage HA et MA-VL (dans le revêtement-soutènement et le remblai) ;
- en cas de dysfonctionnement des scellements de galeries par l'interface, la diffusion est dominante dans le remblai et il y a codominance diffusion/convection dans le revêtement-soutènement, à la fois dans les galeries des quartiers de stockage HA et MA-VL et dans la zone centrale, et la diffusion reste dominante dans les liaisons surface-fond ;
- en cas de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface, la convection est dominante dans les liaisons surface-fond, la diffusion est dominante dans le remblai et il y a codominance diffusion/convection dans le revêtement-soutènement, aussi bien dans les galeries des quartiers de stockage HA et MA-VL que dans la zone centrale ;
- en outre, la convection est toujours dominante dans la zone d'interface plus perméable à l'extrados des voussoirs (matériau compressible périphérique).

La figure 8-9 et la figure 8-10 représentent, respectivement pour la situation de référence et la situation enveloppe, les processus de transfert dominants dans les galeries principales, les liaisons surface-fond et au sein de la couche du Callovo-Oxfordien pour chaque SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface en rappelant les résultats du SEN.

Les résultats sont similaires pour les SEA dont les paramètres sont basés sur la situation enveloppe du SEN, à l'exception des SEA « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface » et « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface » pour lesquels la convection est dominante dans le revêtement-soutènement des galeries.

Dans tous les cas de dysfonctionnement des scellements par l'interface, du fait de la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien et des faibles gradients de charge au sein du stockage, la convection des solutés reste limitée dans les ouvrages, depuis les alvéoles de stockage jusqu'aux liaisons surface-fond. Cette limitation du transfert convectif dans les ouvrages permet un transfert par diffusion des solutés depuis les galeries vers la couche du Callovo-Oxfordien.

La voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste donc la voie de transfert principale, quelle que soit la localisation du dysfonctionnement des scellements par l'interface et quelle que soit la situation considérée (référence, enveloppe).

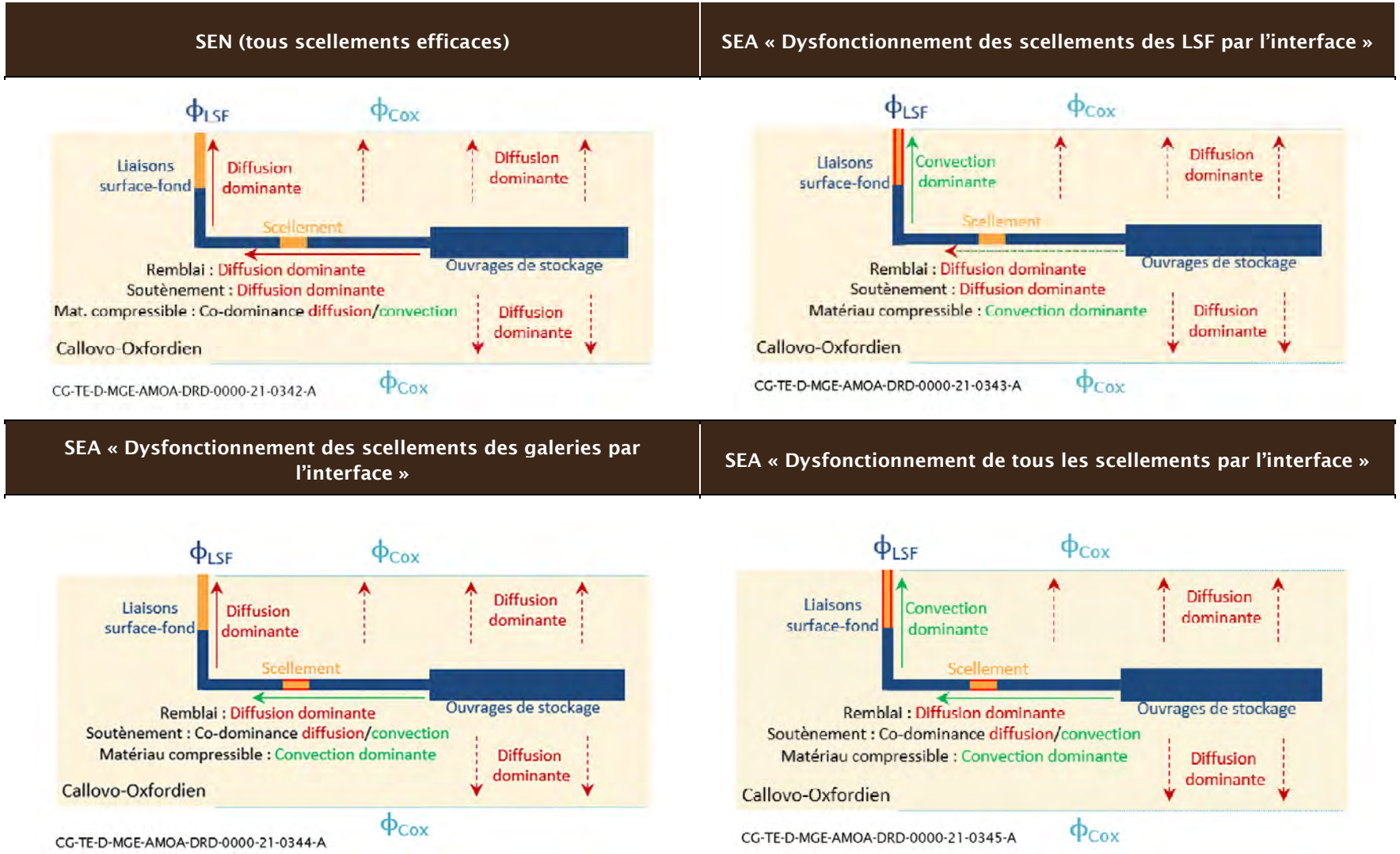


Figure 8-9 *SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface - situation de référence : représentation schématique des processus de transfert des solutés au sein du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien*

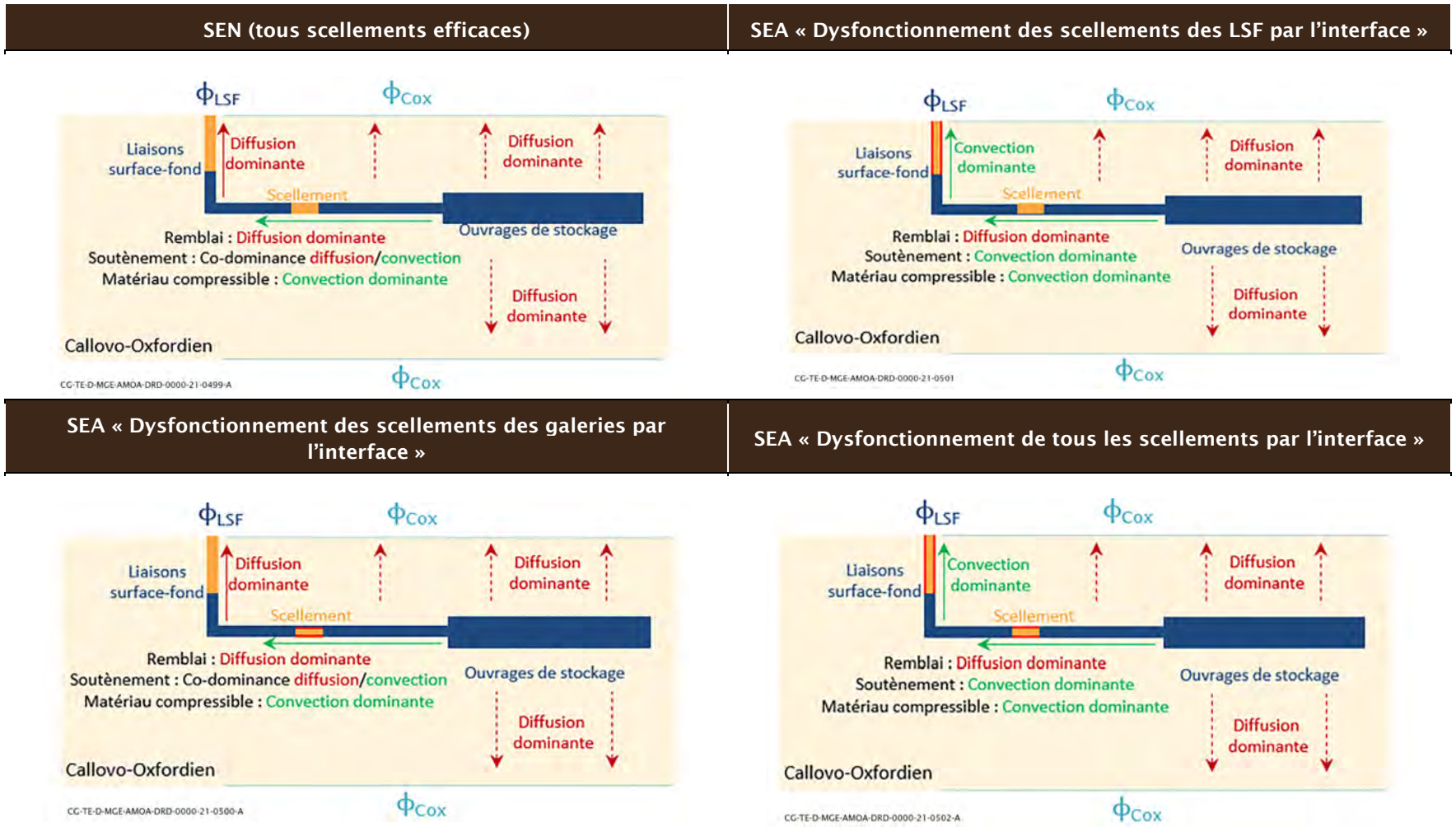


Figure 8-10 *SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface - situation enveloppe : représentation schématique des processus de transfert des solutés au sein du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien*

Pour évaluer l'effet du dysfonctionnement des scellements sur le transfert des radionucléides par la voie ouvrages, les proportions d'iode 129 (en pourcentage de l'inventaire total initial en iode 129) qui empruntent la voie de transfert par les ouvrages et la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien sont comparées dans le tableau 8-4.

La figure 8-11 ci-après montre, pour le SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface », l'atténuation du niveau de débit molaire maximal depuis la sortie des alvéoles MA-VL jusqu'aux liaisons surface-fond.

L'ensemble des résultats d'évaluation des SEA mettent en exergue les éléments d'analyse suivants :

- pour tous les SEA de dysfonctionnement des scellements par leur interface, la quantité cumulée d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond en un million d'années est inférieure à celle migrant par la couche de Callovo-Oxfordien ;
- le SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface et celui de dysfonctionnement des scellements de liaisons surface-fond par l'interface impliquent, en situation enveloppe uniquement, une voie de transfert par les ouvrages supérieure à celle par la couche du Callovo-Oxfordien, mais pendant quelques dizaines de milliers d'années seulement, et à des niveaux de débits molaires très inférieurs aux débits molaires maximaux par la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien ;
- la proportion de l'inventaire total initial en iode 129 sortant des liaisons surface-fond est ainsi augmentée, mais elle reste inférieure à celle de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, d'un facteur 100 environ pour le SEA de dysfonctionnement de tous les scellements basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et d'un facteur 3 pour celui basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN. Ainsi, environ 0,1 % de l'inventaire total initial en iode 129 sort par les liaisons surface-fond pour le SEA basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et environ 12 % pour le SEA basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN ;
- avec les paramètres de la situation de référence du SEN, la date d'occurrence du maximum de débit molaire en sortie des liaisons surface-fond se situe vers le million d'années. Elle est plus précoce que celle en situation de référence du SEN qui est largement supérieure au million d'années. Cependant, du fait d'un transfert convectif qui reste limité, le débit molaire en iode 129 est fortement atténué dans le stockage (atténuation d'un facteur 1 000 du débit molaire maximum entre l'entrée des galeries MA-VL et la sortie des liaisons surface-fond) ;
- avec les paramètres de la situation enveloppe du SEN, les vitesses de transfert par convection des radionucléides au sein des galeries sont plus élevées et limitent les échanges (par diffusion) avec la couche du Callovo-Oxfordien. Cette limitation est toutefois relative car le facteur d'atténuation du débit molaire entre l'entrée des galeries MA-VL et la sortie des liaisons surface-fond est d'un facteur 100 environ. La date d'occurrence du débit molaire maximum en sortie des liaisons-surface-fond est plus courte (environ 130 000 ans) que celle obtenue pour le SEA basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN.

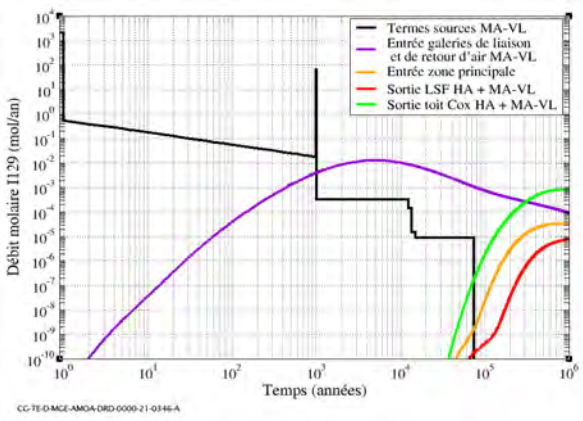
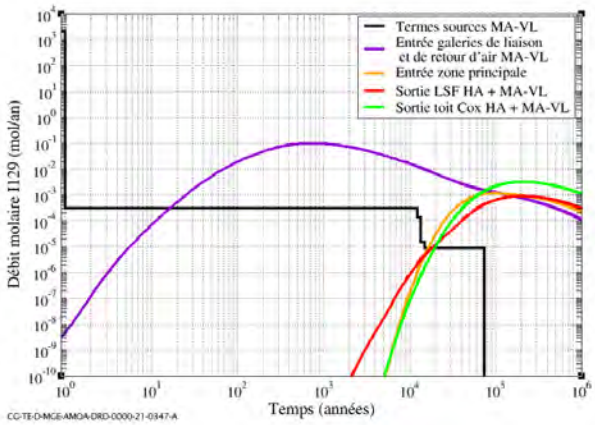
	Quartier de stockage MA-VL	
	Situation de référence	Situation enveloppe
SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »		

Figure 8-11 *SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface : historiques des débits molaires d'iode 129 entrant dans les galeries de liaison et de retour d'air, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

Le tableau 8-4 montre que l'iode 129 entrant dans la zone centrale provient essentiellement du quartier de stockage MA-VL. En effet, de par son positionnement en « amont hydraulique » par rapport à la base des liaisons surface-fond, les quantités d'iode 129 sortant des alvéoles MA-VL par les galeries de liaison et de retour d'air sont plus sensibles au dysfonctionnement des scellements par l'interface. Ainsi, la quantité d'iode 129 issue du quartier de stockage MA-VL et parvenant à la zone centrale, cumulée sur un million d'années, est augmentée, par rapport au SEN (i) d'environ trois ordres de grandeur en situation de référence en cas de dysfonctionnement des seuls scellements de galeries ou de tous les scellements, et (ii) d'environ un facteur 7 en situation enveloppe en cas de dysfonctionnement des seuls scellements de liaisons surface-fond ou de tous les scellements, mais ces quantités restent limitées en regard de celles migrant par la couche du Callovo-Oxfordien.

Tableau 8-4 *SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface – situations de référence et enveloppe : bilans des quantités d'iode 129 (cumulées sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial respectif en HA et en MA-VL, puis par rapport à l'inventaire total initial HA + MA-VL) entrant dans les galeries d'accès, dans les galeries de liaison, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

		Quantité d'iode 129 (en % de l'inventaire total initial respectif de chaque zone, puis de l'inventaire total initial HA + MA-VL)							
		Situation de référence				Situation enveloppe			
		SEN	SEA scellements LSF	SEA scellements galeries	SEA tous scellements	SEN	SEA scellements LSF	SEA scellements galeries	SEA tous scellements
HA	Entrée dans les galeries d'accès	3,3 %	4,0 %	3,9 %	3,8 %	5,9 %	13,6 %	8,9 %	15,1 %
HA	Entrée dans les galeries de liaison	0,1 %	0,2 %	0,06 %	0,06 %	0,05 %	5,4 %	0,2 %	6,9 %
HA	Entrée dans la zone centrale	$<10^{-3}$ %	$<2 \times 10^{-3}$ %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	4,0 %	$<10^{-6}$ %	5,4 %
MA-VL	Entrée dans les galeries de liaison et retour d'air	15,3 %	16,9 %	24,8 %	23,2 %	32,0 %	48,7 %	29,5 %	47,2 %
MA-VL	Entrée>dans la zone centrale	$<10^{-3}$ %	0,02 %	1,7 %	1,0 %	3,6 %	26,6 %	4,3 %	24,7 %
HA + MA-VL	Sortie des liaisons surface-fond	$<10^{-5}$ %	$<2 \times 10^{-3}$ %	$<2 \times 10^{-3}$ %	<0,1 %	0,02 %	12,1 %	0,25 %	12,1 %
HA + MA-VL	Sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	10,5 %	10,5 %	10,5 %	10,5 %	42,6 %	37,4 %	42,6 %	37,4 %

La figure 8-12 présente les historiques des débits molaires d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien au droit du stockage pour le SEN (tous scellements efficaces) et les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface. Le tableau 8-5 présente les quantités d'iode 129, cumulées sur un million d'années, qui traversent les ouvrages du stockage et atteignent le toit du Callovo-Oxfordien par la voie ouvrages ou par la couche du Callovo-Oxfordien.

Les évaluations réalisées pour les SEA basés sur les paramètres de la situation de référence du SEN montrent que :

- le maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond est très inférieur à celui de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, d'un facteur respectif de 100 (tous scellements dysfonctionnant), 2 700 (dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond), 4 000 (dysfonctionnement des scellements des galeries) et 4×10^6 (tous scellements efficaces) ;
- le scénario de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface ne génère pas de voie de transfert par les ouvrages supérieure à celle par la couche du Callovo-Oxfordien, sur toute la durée de simulation ;
- le dysfonctionnement des scellements n'a aucun effet sur les débits molaires de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, soulignant ainsi le rôle fondamental joué par ce composant naturel.

La comparaison des résultats entre le SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries et celui de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond montre une redondance de ces scellements. En effet, l'efficacité de l'un ou l'autre des scellements permet d'atténuer le maximum de débit molaire par la voie ouvrages d'environ un facteur 40 par rapport à une situation de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements, et de garantir que le transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste toujours nettement dominant en SEA basé sur la situation de référence du SEN.

Les évaluations réalisées pour les SEA basés sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN montrent que :

- les maxima de débit molaire instantané d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond sont inférieurs à ceux traversant le Callovo-Oxfordien, d'un facteur respectif de trois (tous scellements dysfonctionnant), trois (dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond), 200 (dysfonctionnement des scellements des galeries) et 2 000 (tous scellements efficaces) ;
- les scénarios de dysfonctionnement des seuls scellements des liaisons surface-fond par l'interface ou de tous les scellements par l'interface génèrent une voie de transfert par les ouvrages supérieure à celle par la couche du Callovo-Oxfordien pendant environ 20 000 ans, mais à des niveaux significativement inférieurs au maximum de débit molaire sortant par la couche du Callovo-Oxfordien.

Dans le SEA « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface », un transfert diffusif dominant est conservé dans les liaisons surface-fond. Il permet une atténuation du maximum de débit molaire sortant des liaisons surface-fond d'environ deux ordres de grandeur par rapport à ceux obtenus pour les SEA « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface » et « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface ».

Tableau 8-5 *SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface - situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : débits molaires maximum d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien, dates d'occurrence de ces maxima et rapport entre les maxima par la voie « ouvrages » et par la voie « couche du Callovo-Oxfordien »*

		Débits molaires maximum d'iode 129							
		Situation de référence				Situation enveloppe			
		SEN	SEA scellements LSF	SEA scellements galeries	SEA tous scellements	SEN	SEA scellements LSF	SEA scellements galeries	SEA tous scellements
Transfert par la couche du Callovo-Oxfordien	Débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	800	800	800	800	3 200	2 800	3 200	2 800
	Date d'occurrence (en milliers d'années)	850	850	850	850	210	210	210	210
Transfert par la voie « ouvrages »	Débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien ($\times 10^{-6}$ mol.an^{-1})	2×10^{-4}	0,3	0,2	7,5	1,6	900	16	900
	Date d'occurrence (en milliers d'années)	>1 000	>1 000	>1 000	>1 000	670	210	630	205
Rapport des maxima de débit molaire voie « couche du Callovo-Oxfordien »/voie « ouvrages »		4×10^{6}	2 700	4 000	105	2 000	3	200	3

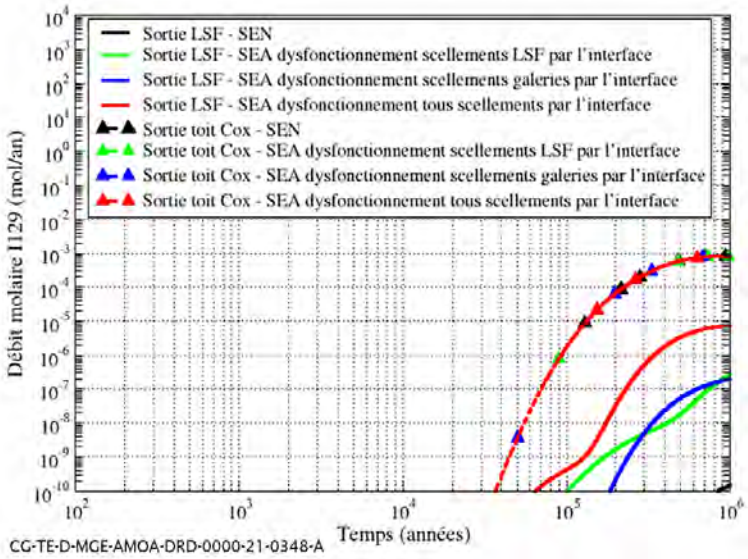
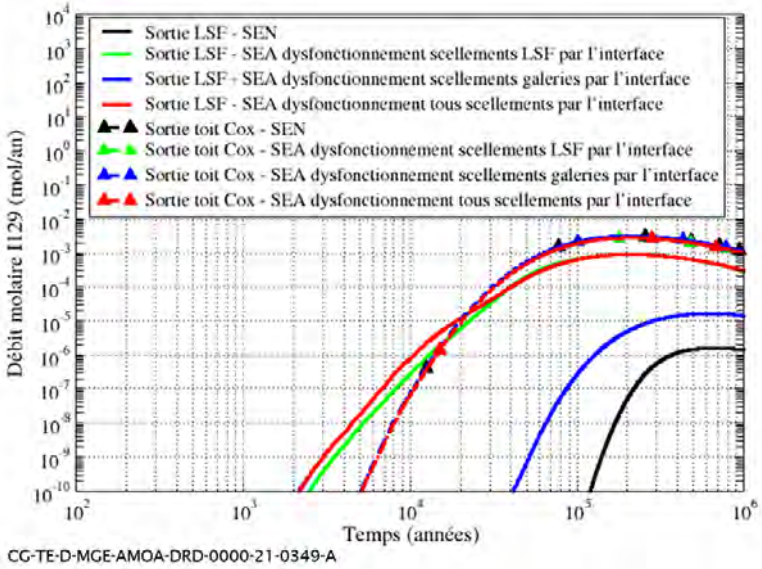
		Situation de référence	Situation enveloppe
Iode 129	SEA « Dysfonctionnement des scellements par l'interface »		

Figure 8-12 *SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

8.1.2.2.2 Le transfert du chlore 36

Le comportement du chlore 36 dans le système de stockage, présenté à la figure 8-13 est comparable à celui de l'iode 129 (cf. Figure 8-12). Cependant, l'écart entre la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien et celle par les ouvrages est plus important que pour l'iode 129. Ce constat, qui prévaut également pour la situation enveloppe du SEN, est notamment lié à la période radioactive du chlore 36, inférieure au temps de transfert dans les ouvrages, permettant ainsi de bénéficier d'une décroissance radioactive supplémentaire.

La proportion de l'inventaire total initial en chlore 36 qui sort du Callovo-Oxfordien par les liaisons surface-fond dépend des paramètres de la situation considérée : cette proportion reste inférieure à celle de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien (d'environ 3 à 5 ordres de grandeur pour le SEA basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et de 1 à 3 ordres de grandeur pour le SEA basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN). Ainsi, moins de 0,002 % de l'inventaire total initial en chlore 36 sort du Callovo-Oxfordien par les liaisons surface-fond pour le SEA basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et environ 2 % pour le SEA basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN.

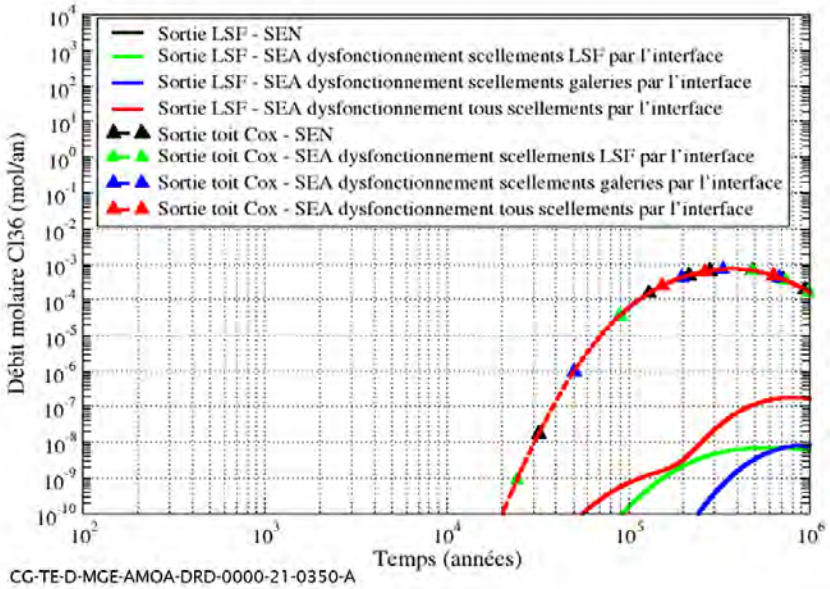
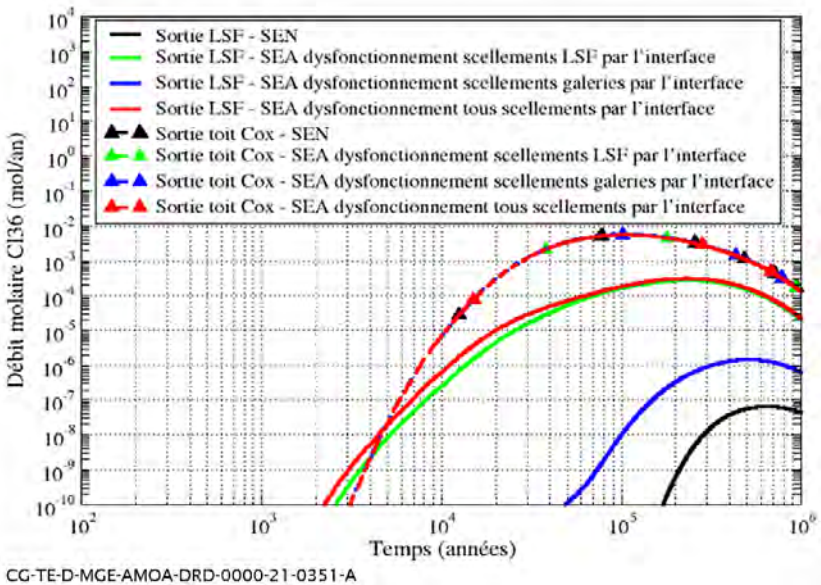
		Situation de référence	Situation enveloppe
Chlore 36	SEA « Dysfonctionnement des scellements par l'interface »		

Figure 8-13 *SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires de chlore 36 sortant des liaisons surface-fond et au toit du Callovo-Oxfordien*

8.1.2.2.3 Le transfert du sélénium 79

Le comportement du sélénium 79 dans le système de stockage, présenté à la figure 8-14 est comparable à celui de l'iode 129 (cf. Figure 8-12) et à celui du chlore 36 (cf. Figure 8-13). Cependant, l'écart entre la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien et celle par les ouvrages est plus important que pour l'iode 129. Ce constat est notamment lié à la période radioactive du sélénium 79, inférieure au temps de transfert dans les ouvrages, permettant ainsi de bénéficier d'une décroissance radioactive supplémentaire, ainsi qu'à la sorption du sélénium 79 dans les bétons des alvéoles MA-VL.

La fraction de l'inventaire total initial en sélénium 79 qui sort du Callovo-Oxfordien par les liaisons surface-fond dépend des hypothèses de la situation considérée : cette fraction reste inférieure à celle de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien (d'environ 3 à 5 ordres de grandeur pour le SEA basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et de 1 à 4 ordres de grandeur pour le SEA basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN). Ainsi, moins de 0,0001 % de l'inventaire total initial en sélénium 79 sort du Callovo-Oxfordien par les liaisons surface-fond pour le SEA basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et environ 2 % pour le SEA basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN.

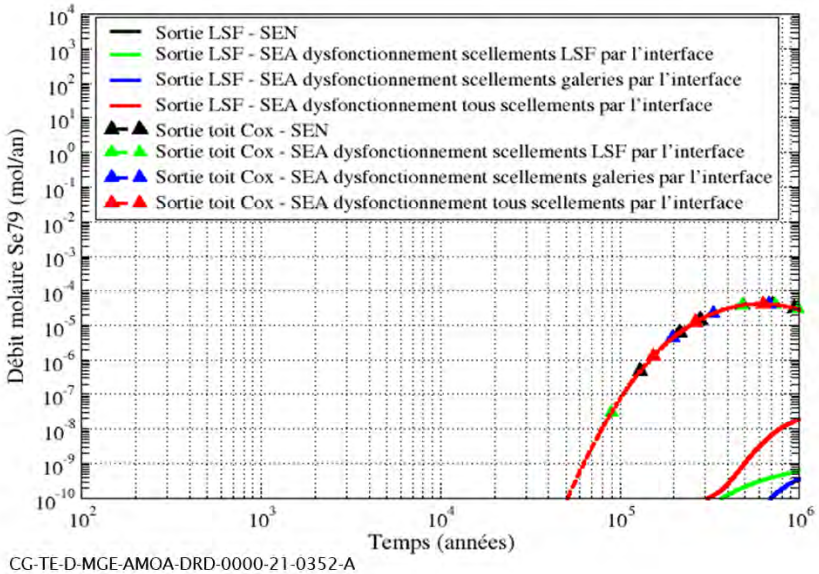
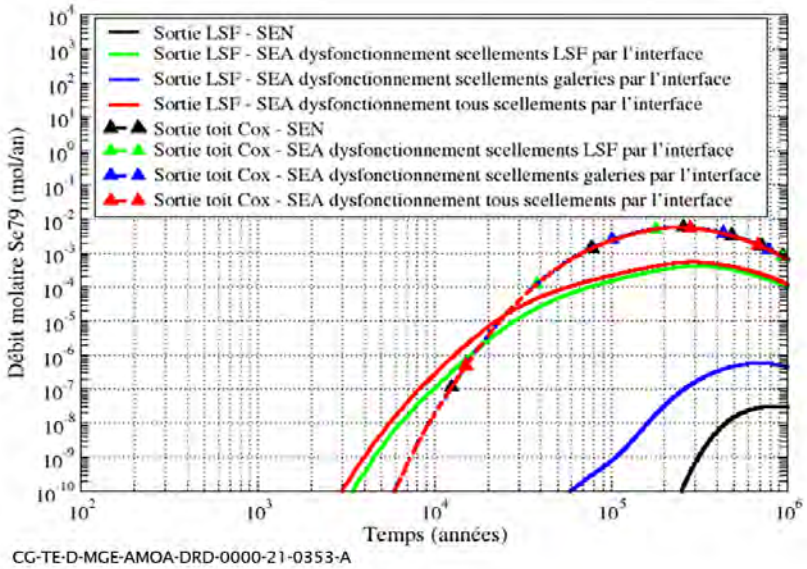
	Situation de référence	Situation enveloppe
Sélénium 79 — SEA « Dysfonctionnement des scellements par l'interface »		

Figure 8-14 *SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires de sélénium 79 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

8.1.2.2.4 Le transfert des autres radionucléides

Les historiques de débit molaire au toit du Callovo-Oxfordien obtenus pour le scénario SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface sont tracés à la figure 8-15.

En plus de l'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79, les principaux radionucléides dont le débit molaire excède 10^{-10} mol.an^{-1} sur le million d'années en SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface sont :

- sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN : le potassium 40 et le rubidium 87, cations à vie longue sorbés dans le Callovo-Oxfordien, le calcium 41, cation de période intermédiaire sorbé dans le Callovo-Oxfordien, et le carbone 14 organique, mobile et de période plus courte que les principaux radionucléides contribuant à l'impact (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) ;
- sur la base des paramètres de la situation enveloppe du SEN : le potassium 40 et le calcium 41, faiblement sorbés dans les ouvrages cimentaires et dans le Callovo-Oxfordien, le rubidium 87 et le césium 135, sorbés dans le Callovo-Oxfordien, le carbone 14 organique et le molybdène 93, mobiles à vie moyenne, les principaux isotopes de l'uranium (uranium 238, uranium 235 et uranium 236) ainsi que le manganèse 53 et le fer 60, moins sorbés dans le Callovo-Oxfordien pour cette situation.

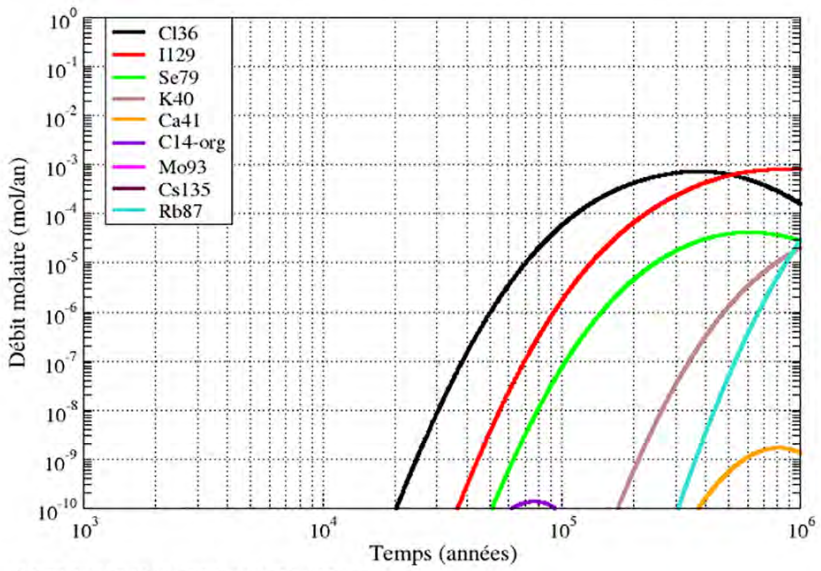
En considérant les paramètres de la situation de référence du SEN, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien est prépondérante sur la voie de transfert par les ouvrages pour l'ensemble des radionucléides. Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, les courbes de débit molaire instantané du scénario SEA sont identiques à celles du SEN ; les niveaux et maxima de débit molaire étant pilotés par la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, ceux-ci sont identiques à ceux obtenus pour le SEN en situation de référence.

En considérant les paramètres de la situation enveloppe du SEN, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste supérieure à la voie de transfert par les ouvrages pour la plupart des radionucléides. Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, et par comparaison au SEN, les occurrences de débit molaire instantané à 10^{-10} mol.an^{-1} du SEA sont avancées notamment pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79, et la contribution de certains radionucléides comme le carbone 14 organique ou le molybdène 93 apparaît, mais à des niveaux faibles ; néanmoins, les niveaux et maxima de débit molaire des principaux radionucléides étant pilotés par la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, ceux-ci sont identiques à ceux obtenus pour le SEN en situation enveloppe.

Plus particulièrement, le transfert des radionucléides peu à très peu mobiles n'est pas modifié par le dysfonctionnement des scellements du fait de leur sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien. En effet, la sorption favorise les échanges de masse entre les ouvrages souterrains (alvéoles de stockage, galeries) et la couche du Callovo-Oxfordien, et permet ainsi à ces radionucléides d'être retenus dans les premiers mètres de la couche du Callovo-Oxfordien tout comme en SEN, soit autour des alvéoles de stockage comme l'illustre la figure 6-10 du chapitre 6.2.1.3 du présent volume, soit autour des galeries pour les radionucléides qui auraient pu migrer dans les premiers mètres de galeries.

SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par

Situation de référence	Situation enveloppe



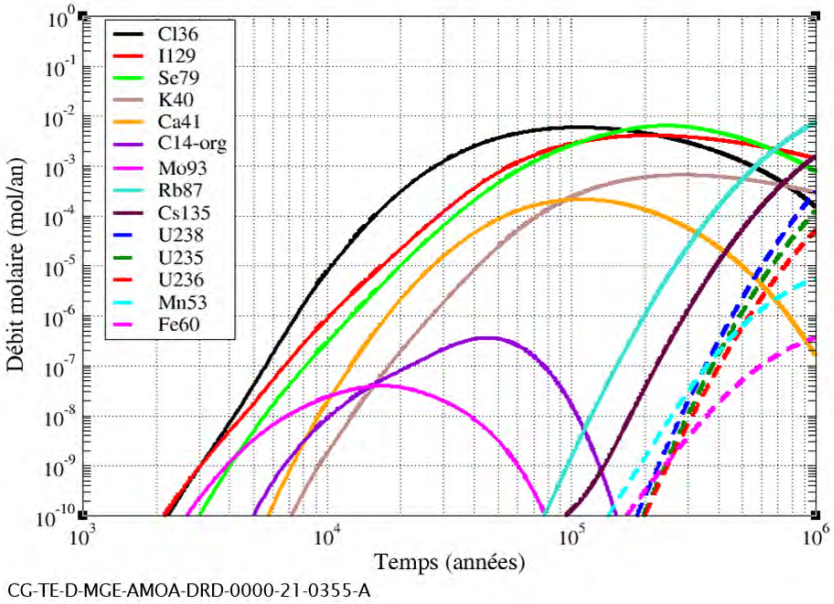


Figure 8-15 *SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface - situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires des principaux radionucléides dont le débit molaire instantané au toit de la couche du Callovo-Oxfordien excède 10^{-10} mol.an^{-1}*

8.1.2.3 Le transfert des radionucléides dans le milieu géologique jusqu'aux exutoires et l'évaluation de l'incidence radiologique associée

Conformément à la démarche présentée au chapitre 1 du présent volume, l'évaluation du transfert des radionucléides dans les encaissants supérieurs, et des incidences radiologiques associées, est menée uniquement dans le cas où les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, obtenus pour les scénarios de dysfonctionnement des scellements, sont significativement supérieurs à ceux obtenus en SEN.

Les exutoires d'intérêt concernés par les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface (ZFC) susceptibles de modifier la voie de transfert par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond), sont les exutoires des encaissants supérieurs[96] par lesquels peuvent transiter les radionucléides les plus mobiles :

- l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour la situation de référence ;
- les exutoires « Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Rivière Ornain » pour la situation enveloppe.

8.1.2.3.1 Le cas des SEA basés sur les paramètres de la situation de référence du SEN

Comme analysé au chapitre 8.1.2.2 du présent volume, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien est prépondérante sur celle par les ouvrages pour l'ensemble des radionucléides et pour tous les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface. Les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien sont similaires à ceux obtenus pour le SEN en situation de référence (cf. Chapitre 6.2.1.3 du présent volume).

En conséquence, les débits molaires des radionucléides traversant les encaissants sus-jacents et les historiques de doses associés à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » sont identiques à ceux présentés pour le SEN en situation de référence, soit des valeurs maximales du cumul de dose annuelle en biosphère chaude inférieures à 2×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'adulte, 3×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans et 5×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an (cf. Tableau 6-4 du chapitre 6.2.2 du présent volume).

8.1.2.3.2 Le cas des SEA basés sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN

Comme analysé au chapitre 8.1.2.2 du présent volume, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien est supérieure à celle par les ouvrages pour la plupart des radionucléides et pour tous les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface. Les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien sont similaires à ceux obtenus pour le SEN en situation enveloppe (cf. Chapitre 6.3.1.3 du présent volume).

En conséquence, les débits molaires des radionucléides traversant les encaissants sus-jacents et les historiques de doses associés aux exutoires « Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Rivière Ornain » sont identiques à ceux présentés pour le SEN en situation enveloppe[97].

---

[96] L'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », relatif aux encaissants inférieurs ou sous-jacents, n'est de fait pas concerné par les scénarios de dysfonctionnement des scellements.

[97] Par rapport au SEN en situation enveloppe, seuls les débits molaires du carbone 14 organique et du molybdène 93 apparaissent de façon plus précoce selon la voie de transfert par les ouvrages : cependant, du fait de leur période radioactive petite au regard des temps de transfert dans les encaissants sus-jacents, les débits molaires sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien en carbone 14 organique et en molybdène 93 sont fortement atténués lors de leur transfert dans les encaissants. Les doses maximales aux exutoires relatives au carbone 14 organique et au molybdène 93 sont largement inférieures à 10^{-10} Sv.an^{-1} comme en SEN.

Pour mémoire :

- à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », les valeurs maximales du cumul de dose annuelle en biosphère chaude sont de l'ordre de $1,5 \times 10^{-2}$ mSv.an^{-1} pour l'adulte, 5×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans, et 6×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an (cf. Tableau 6-17 du chapitre 6.3.2.1 du présent volume) ;
- à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) », les valeurs maximales du cumul de dose annuelle en biosphère chaude sont de l'ordre de $5,7 \times 10^{-2}$ mSv.an^{-1} pour l'adulte, 2×10^{-1} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans, et $2,5 \times 10^{-1}$ mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an (cf. Tableau 6-19 du chapitre 6.3.2.1 du présent volume) ;
- à l'exutoire « Rivière Ornain », la valeur maximale du cumul de dose annuelle en biosphère tempérée ou froide est de l'ordre de 1×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'adulte (cf. Tableau 6-20 du chapitre 6.3.2.2 du présent volume).

8.1.2.4 Les résultats des évaluations des SEA vis-à-vis du transfert des substances toxiques chimiques

L'évaluation du transfert des substances toxiques chimiques a été menée pour le SEA le plus conservatif, c'est-à-dire le SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface ».

Pour ce SEA basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN, les débits massiques maximaux des principales substances toxiques chimiques mobiles (le sélénium et le cyanure) en sortie des liaisons surface-fond, sont respectivement d'au moins 3 à 4 ordres de grandeur inférieurs aux débits massiques maximaux sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien.

Pour ce SEA basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN, les débits massiques maximaux des principales substances toxiques chimiques mobiles (le sélénium, le cyanure, ainsi que le bore considéré mobile en situation enveloppe) en sortie des liaisons surface-fond, sont respectivement d'un facteur 5, d'un facteur 30 et d'un facteur 100 inférieurs aux débits massiques maximaux sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien.

Les autres substances toxiques chimiques sont significativement atténuées par leur transfert dans les ouvrages, du fait de la sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien qui favorise les échanges de masse entre les ouvrages souterrains (alvéoles de stockage, galeries) et la couche du Callovo-Oxfordien.

Que ce soit pour le SEA basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN ou pour le SEA basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien est donc supérieure à la voie de transfert par les ouvrages pour les substances toxiques chimiques, et les débits massiques maximaux, pilotés par la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, sont ainsi identiques à ceux obtenus pour le SEN (cf. Chapitre 6.2.3.2 du présent volume pour la situation de référence et chapitre 6.3.3.2 du présent volume pour la situation enveloppe).

En conséquence, les historiques des concentrations massiques à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » en situation de référence et en situation enveloppe, et aux exutoires « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Rivière Ornain » en situation enveloppe, sont identiques à ceux obtenus pour le SEN (cf. Tableau 6-9 du chapitre 6.2.4 du présent volume pour la situation de référence et cf. Tableau 6-29 et tableau 6-30 des chapitres 6.3.4.1 et 6.3.4.2 du présent volume pour la situation enveloppe). Dans tous les cas, les concentrations massiques aux exutoires sont de plusieurs ordres de grandeur inférieures aux NQE.

8.2 Les SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA)

8.2.1 La description et la conceptualisation des SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA

L'analyse des risques et incertitudes des composants de l'alvéole HA, et notamment des conteneurs de stockage HA, présentée aux chapitres 2 et 3 du présent volume, a permis d'identifier deux SEA « Dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) » :

- un SEA de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage des colis de déchets HA0 du quartier pilote HA (scénario dénommé « SEA HA0 » dans la suite de ce chapitre) ;
- un SEA de dysfonctionnement d'un conteneur de stockage des colis de déchets HA1 ou HA2 par alvéole HA du quartier de stockage HA (scénario dénommé « SEA HA1/HA2 » dans la suite de ce chapitre).

Ces scénarios considèrent une perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA et en conséquence les effets induits sur le comportement de la matrice vitrifiée et sur le relâchement et le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques.

Comme présenté au chapitre 3 du présent volume, seuls les composants dysfonctionnant sont représentés de manière différente par rapport à la situation du SEN à partir de laquelle est défini le scénario d'évolution altérée (SEA).

De manière conservative, les paramètres qui servent de base à la définition de chacun des deux SEA de « Dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) » sont ceux de la situation enveloppe du SEN.

8.2.1.1 Le choix des conteneurs de stockage HA dysfonctionnant et date de perte d'étanchéité

En fonction du SEA considéré (cf. Chapitre 8.2.1 du présent volume), sont retenues les hypothèses suivantes en cohérence avec l'analyse des risques et des incertitudes (cf. Chapitres 2 et 3 du présent volume) :

- « SEA HA0 » : la perte d'étanchéité prématurée de l'ensemble des conteneurs de stockage du quartier pilote HA ;
- « SEA HA1/HA2 » : la perte d'étanchéité prématurée d'un conteneur de stockage par alvéole du quartier de stockage HA. Pour chaque alvéole du quartier de stockage HA, il est fait le choix conservatif que le conteneur dysfonctionnant est positionné en tête d'alvéole HA, c'est-à-dire au plus près de la voie de transfert par la galerie d'accès.

Il est considéré de manière conservative, une perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA qui dysfonctionnent par rapport au scénario d'évolution normale, c'est-à-dire que le dysfonctionnement intervient dès la fermeture du stockage.

La date de perte d'étanchéité des conteneurs de stockage non dysfonctionnant du quartier de stockage HA est identique à celle retenue en situation enveloppe du SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

8.2.1.2 Les effets induits de la perte d'étanchéité sur les modèles de relâchement et sur les caractéristiques de transport et de rétention des radionucléides

La perte d'étanchéité prématurée de certains conteneurs de stockage HA conduit à exposer la matrice vitreuse à des conditions d'environnement et de température entrainant une dégradation de ses performances de confinement et une augmentation de la cinétique de relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques.

Afin de couvrir les incertitudes résiduelles de connaissance sur les conditions d'environnement dans l'alvéole HA à la date de perte d'étanchéité considérée, le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques est assimilé à un relâchement labile afin de prendre en compte les effets induits suivants :

- la dégradation de la matrice vitreuse des colis de déchets stockés se produit dans un environnement cimentaire induits par le matériaux de remplissage de l'espace annulaire (MREA) ;
- la perte d'étanchéité prématurée du conteneur de stockage conduit à un relâchement des radionucléides et toxiques chimiques dans un milieu présentant une charge de température plus importante que celle du SEN.

L'influence de la température sur les propriétés intrinsèques du Callovo-Oxfordien lors du relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques est prise en compte *via* les mêmes règles qu'en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume) appliqués au coefficient de diffusion, au coefficient de distribution et à la limite de solubilité.

8.2.1.2.1 Les indicateurs considérés

La performance du système de stockage en cas de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA est évaluée par un ensemble d'indicateurs utilisés pour l'évaluation du SEN, c'est-à-dire :

- le bilan de masse en sortie de l'alvéole HA ;
- le débit molaire en entrée et sortie des composants ouvragés des quartiers de stockage HA en considérant la voie de transfert par les ouvrages et ce jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien ;
- le débit molaire en sortie du toit du Callovo-Oxfordien suivant la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien ;
- la date d'occurrence du maximum des sorties selon la voie de transfert par les ouvrages et celle par la couche du Callovo-Oxfordien (au toit) ;
- la dose et les concentrations des toxiques chimiques à l'exutoire si le rapport des indicateurs intermédiaires est significatif entre le SEA et la situation enveloppe du SEN (cf. Chapitre 1 du présent volume).

8.2.1.2.2 Les radionucléides retenus

Les radionucléides retenus pour le SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA sont les radionucléides mobiles et à vie longue contributeurs au cumul de dose en SEN (cf. Chapitre 6 du présent volume) : iode 129, chlore 36 et sélénium 79.

8.2.1.3 La synthèse des choix de représentation

La représentation et les effets induits par le dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA sont synthétisés dans le tableau 8-6 ci-après.

Tableau 8-6 *Dysfonctionnements considérés dans le SEA « Dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) » et les effets induits sur le relâchement et la migration (les dysfonctionnements dans le cadre des SEA sont ombrés)*

	Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA0 du quartier pilote HA		Dysfonctionnement d'un conteneur de stockage HA1 ou HA2 par alvéole HA du quartier de stockage HA	
	Quartier pilote HA	Quartier de stockage HA	Quartier pilote HA	Quartier de stockage HA
Conteneur de stockage	Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage	Identique à la situation enveloppe du SEN	Identique à la situation enveloppe du SEN	Dysfonctionnement d'un conteneur de stockage par alvéole
Charge thermique et influence sur la migration	Relâchement et migration dans un milieu avec une température plus importante qu'en SEN mais qui reste inférieure à 50 °C			Conteneur dysfonctionnant : relâchement dans un milieu avec une température plus importante qu'en SEN Autres conteneurs : identique à la situation du SEN considérée
Modèle de relâchement	Assimilé à un relâchement labile			Conteneur dysfonctionnant : assimilé à un relâchement labile Autres conteneurs : identique à la situation du SEN considérée
Représentation de l'alvéole HA	Identique à la situation enveloppe du SEN			

8.2.2 Les résultats des évaluations pour les SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA)

8.2.2.1 Les effets induits de la perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage sur les termes sources

Il est considéré que la dissolution du verre est de type labile pour les conteneurs de stockage dysfonctionnant dans les SEA « Dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA ». Cela se traduit par un relâchement des radionucléides sur une année comme illustré sur la figure 8-16.

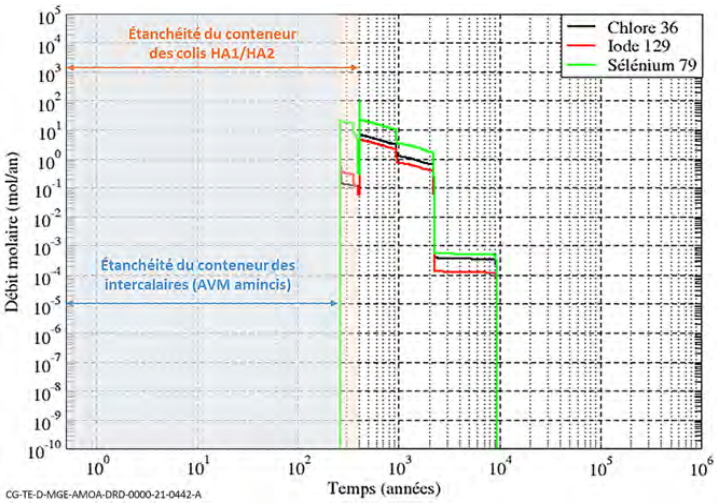
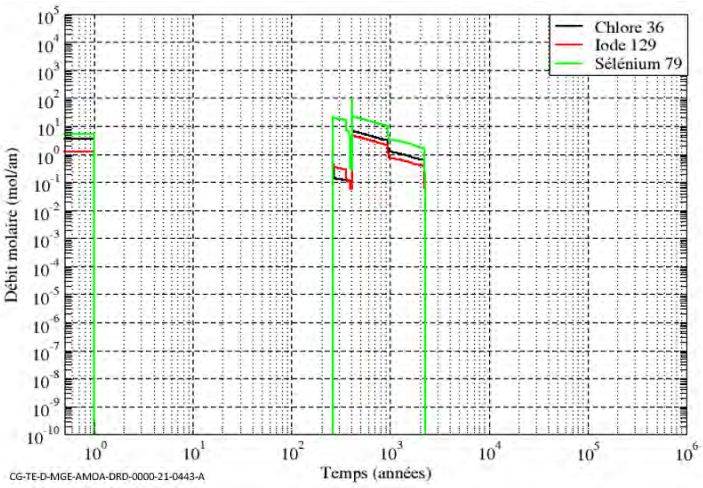
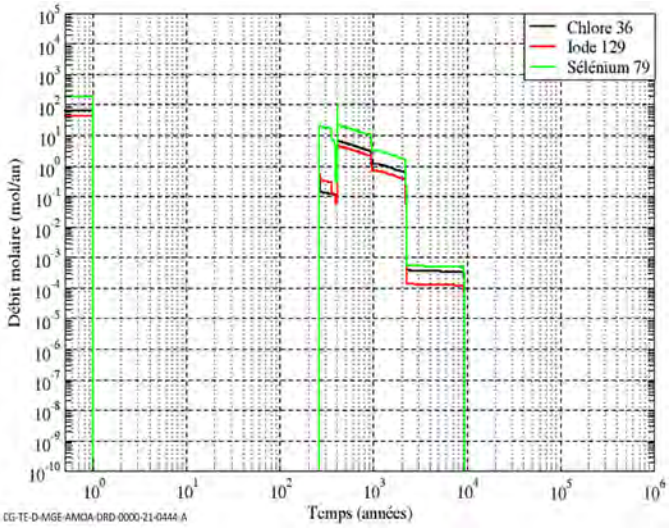
	Situation enveloppe
SEN	
SEA « Dysfonctionnement des conteneurs de stockage du quartier pilote HA »	
SEA « Dysfonctionnement des conteneurs de stockage du quartier de stockage HA »	

Figure 8-16 *SEN et SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA - hypothèses de la situation enveloppe du SEN : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79*

8.2.2.2 Les effets induits sur le comportement hydraulique

L'augmentation temporaire de la perméabilité du Callovo-Oxfordien, du fait de l'élévation de température pendant le relâchement précoce des conteneurs de stockage HA dysfonctionnant, n'est pas significative. Le schéma hydraulique des écoulements d'eau au sein des ouvrages et dans la couche du Callovo-Oxfordien n'est donc pas modifié par rapport à celui du SEN. Les résultats hydrauliques (vitesses d'écoulement et débits d'eau sortant des liaisons surface-fond) sont donc identiques à ceux du SEN pour la situation enveloppe (cf. Chapitre 6.3.1 du présent volume).

8.2.2.3 L'évaluation quantitative du transfert des radionucléides

Les scénarios SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA évalués sont ceux définis au chapitre 8.2.1.1 du présent volume, c'est-à-dire les scénarios dénommés « SEA HA0 » et « SEA HA1/HA2 ».

8.2.2.3.1 Le transfert par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond)

Pour le scénario **« SEA HA0 »** de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA0 du quartier pilote HA, les colis HA0 étant seuls dysfonctionnant, seule une très faible proportion de l'activité initiale (environ 0,04 % de l'inventaire total initial en iode 129 et en sélénium 79 des colis HA et 0,1 % de celui en chlore 36) est relâchée de manière précoce et entre au niveau de la galerie d'accès. Les débits molaires arrivant dans les galeries de liaison, dans la zone centrale, en sortie des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien, sont identiques à ceux du SEN pour la situation enveloppe (cf. Figure 8-17 et tableau 8-7 sur la base des hypothèses de la situation enveloppe du SEN).

De la même façon, pour le scénario **« SEA HA1/HA2 »** de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA1 et HA2 du quartier de stockage HA, un seul conteneur de stockage étant dysfonctionnant par alvéole HA, seule une faible proportion de l'activité initiale (environ 1,8 % de l'inventaire total initial des colis HA1/HA2 en iode 129 et en chlore 36 et 1,4 % de celui en sélénium 79) est relâchée de manière précoce et entre au niveau de la galerie d'accès. Les débits molaires maximaux arrivant dans les galeries de liaison, dans la zone centrale, en sortie des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien, sont identiques à ceux du SEN pour la situation enveloppe (cf. Figure 8-18 et tableau 8-7 sur la base des paramètres de la situation enveloppe du SEN).

Pour chacun des deux SEA évalués (« SEA HA0 », « SEA HA1/HA2 »), le maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond (au toit du Callovo-Oxfordien) est très inférieur (d'un facteur supérieur à 5×10^6) au maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien au droit du stockage (cf. Tableau 8-7, figure 8-17 et figure 8-18). En effet, le seul effet notable des SEA (par rapport au SEN), concerne le début des courbes de débit molaire en entrée des galeries d'accès HA au plus près des alvéoles HA. En s'éloignant des alvéoles HA, les autres indicateurs ne montrent plus aucune différence par rapport au SEN, qu'il s'agisse des débits molaires en entrée des galeries de liaison HA ou en entrée de la zone centrale, et *a fortiori* des débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien.

Que ce soit pour le quartier pilote HA ou pour le quartier de stockage HA, pour la situation de référence ou la situation enveloppe, la durée du transitoire thermique est très inférieure aux temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien et dans les ouvrages jusqu'aux liaisons surface-fond. Aussi, même en considérant des dysfonctionnements de colis HA avec des relâchements « prématurés » de radionucléides, l'influence de la charge thermique est négligeable sur les flux de radionucléides aux toit et mur du Callovo-Oxfordien.

Les ratios des débits molaires maximaux du chlore 36 et du sélénium 79 entre les deux voies de transfert (voie de transfert par les ouvrages, voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien) sont du même ordre que pour l'iode 129.

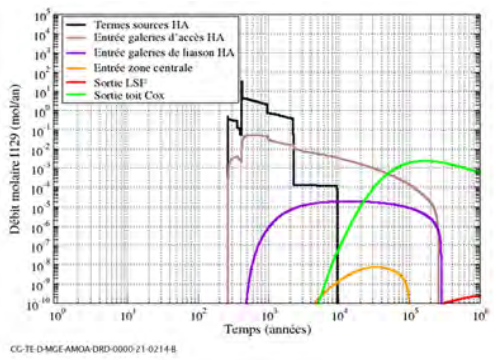
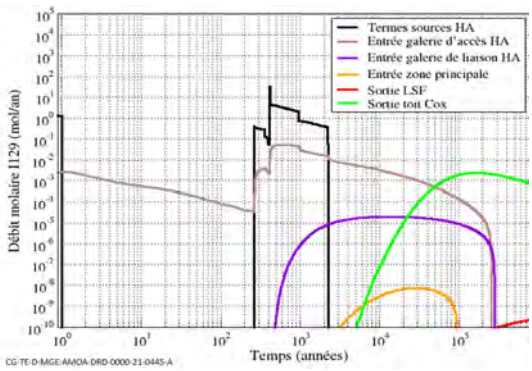
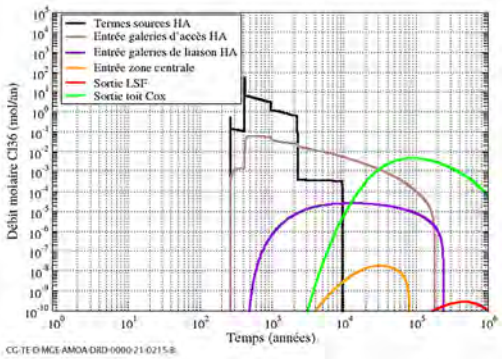
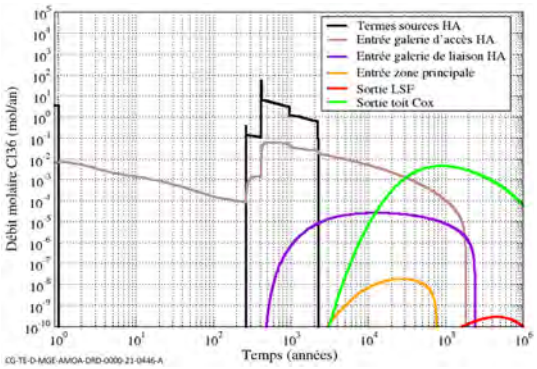
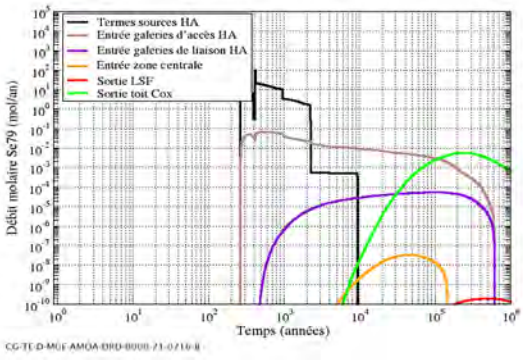
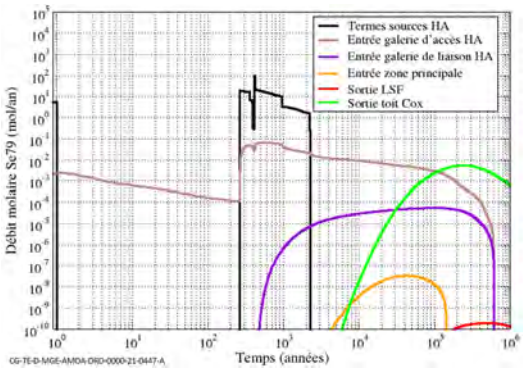
	SEN	« SEA HA0 » de dysfonctionnement des conteneurs du quartier pilote HA
	Situation enveloppe	
Iode 129		
Chlore 36		
Sélénium 79		

Figure 8-17 *SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage du quartier pilote HA (« SEA HA0 ») - hypothèses de la situation enveloppe du SEN, quartiers de stockage HA : historique des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)*

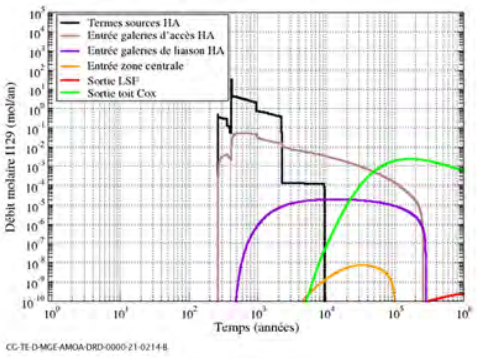
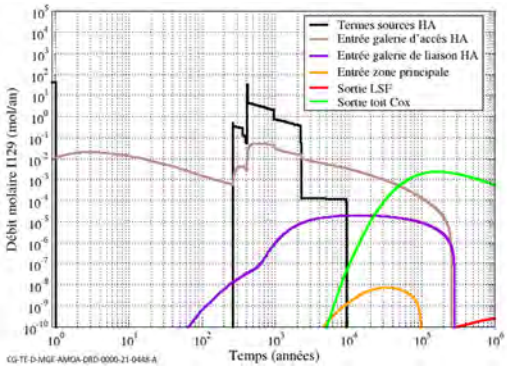
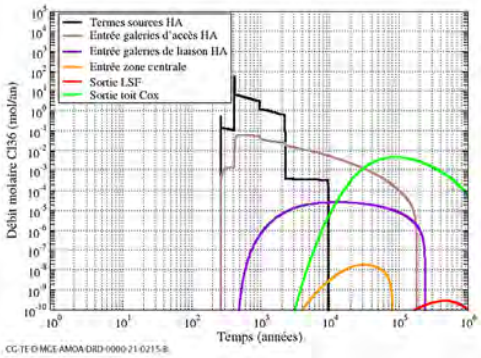
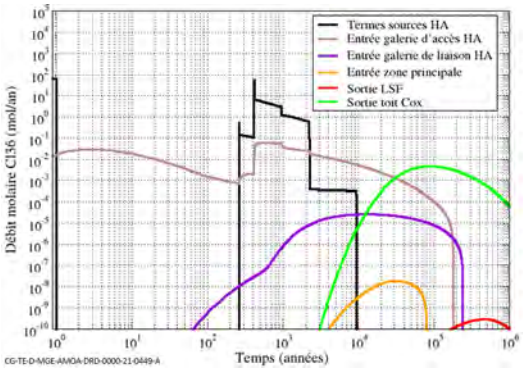
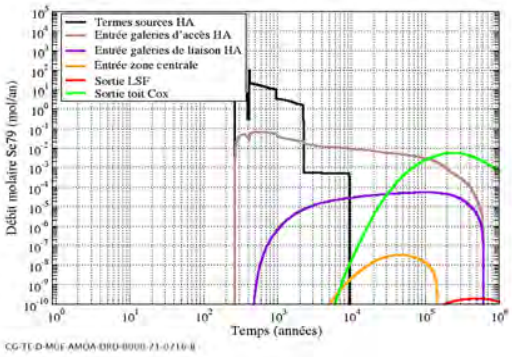
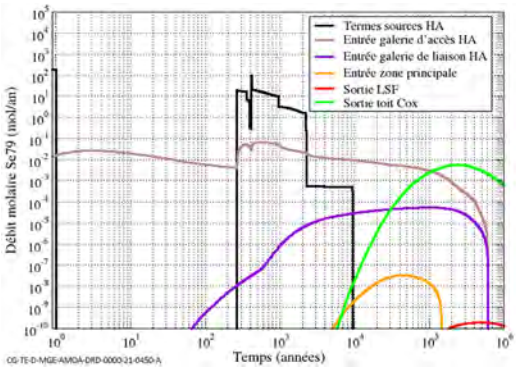
	SEN	« SEA HA1/HA2 » de dysfonctionnement des conteneurs du quartier de stockage HA
	Situation enveloppe	
Iode 129		
Chlore 36		
Sélénium 79		

Figure 8-18 *SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage du quartier de stockage HA (« SEA HA1/HA2 ») - hypothèses de la situation enveloppe du SEN, quartiers de stockage HA : historique des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)*

Tableau 8-7 *SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage du quartier pilote HA (« SEA HA0 »), respectivement du quartier de stockage HA (« SEA HA1/HA2 ») - hypothèses de la situation enveloppe du SEN, quartiers de stockage HA : bilans de la quantité d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial des déchets HA) relâchée à un million d'années, entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)*

	Quantités de radionucléides à un million d'années (en % de l'inventaire total initial des déchets HA)				
	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone centrale	Sortie des liaisons surface-fond	Sortie au toit du Callovo-Oxfordien
Iode 129					
SEN	6,8 %	<0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	50,7 %
« SEA HA0 »	6,8 %	<0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	50,7 %
« SEA HA1/HA2 »	6,8 %	<0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	50,7 %
Chlore 36					
SEN	6,2 %	<0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	31,4 %
« SEA HA0 »	6,2 %	<0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	31,4 %
« SEA HA1/HA2 »	6,2 %	<0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	31,4 %
Sélénium 79					
SEN	6,4 %	0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	19,9 %
« SEA HA0 »	6,4 %	0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	19,9 %
« SEA HA1/HA2 »	6,4 %	0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	19,9 %

L'évaluation des indicateurs de performance montre que la voie de transfert principale reste la couche du Callovo-Oxfordien. Cette prépondérance s'explique par l'absence de drain hydraulique dans les galeries, du fait de l'efficacité des scellements et donc le maintien de conditions de diffusion dominante dans et autour de l'alvéole HA, et de la longueur hectométrique des alvéoles HA.

À l'échelle du quartier pilote HA ou du quartier de stockage HA, le transfert lent et limité par diffusion des radionucléides dans les galeries permet une atténuation progressive du flux, du fait d'un échange de masse important depuis les galeries vers la couche du Callovo-Oxfordien.

À l'entrée de la zone centrale, une atténuation similaire supplémentaire du transfert est obtenue le long des galeries de la zone centrale et des liaisons surface-fond.

Les temps de transfert dans les ouvrages masquent les effets d'un relâchement labile en cas de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA.

8.2.2.3.2 Le transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien

Il n'y a pas d'influence de la thermique des colis dysfonctionnant sur le transfert à grande échelle, et les résultats du transfert de radionucléides au sein de la couche du Callovo-Oxfordien sont donc globalement identiques entre la situation enveloppe du SEN et les SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA.

Les résultats associés aux trois radionucléides mobiles à vie longue contributeurs (iode 129, chlore 36, sélénium 79) sont donc identiques à ceux du SEN (cf. Figure 8-19). En effet, l'inventaire radiologique concerné par le dysfonctionnement des seuls conteneurs de stockage HA0 du quartier pilote HA, ou bien du dysfonctionnement d'un seul conteneur de stockage HA1 ou HA2 par alvéole HA du quartier de stockage HA, est négligeable devant l'inventaire radiologique des déchets HA, et le débit molaire en iode 129, en chlore 36 ou en sélénium 79, au toit du Callovo-Oxfordien, est piloté par l'inventaire radiologique des colis non dysfonctionnant.

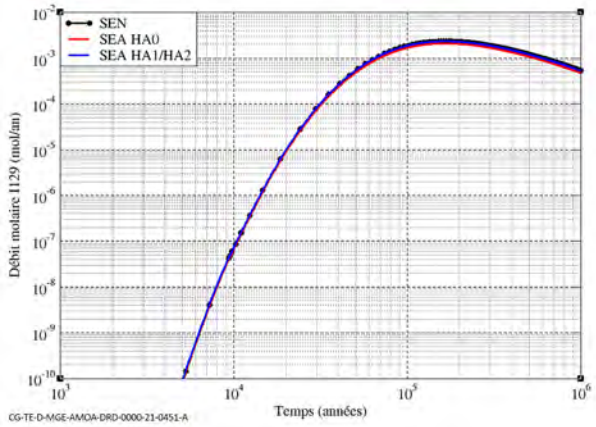
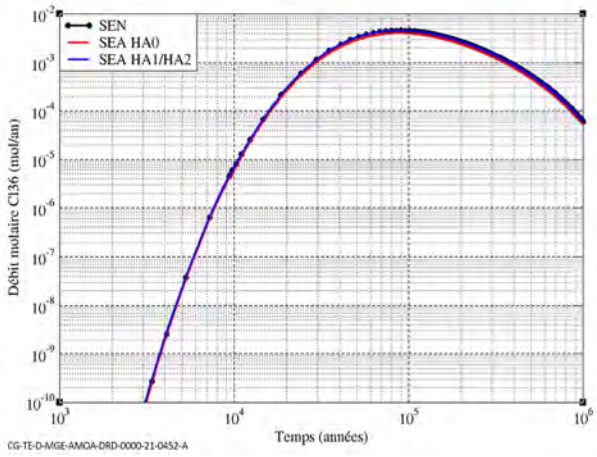
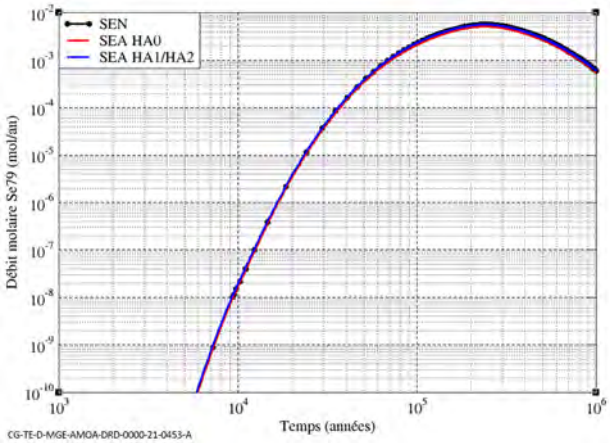
	SEN et SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA (SEA HA0, SEA HA1/HA2)
	Situation enveloppe
Iode 129	
Chlore 36	
Sélénium 79	

Figure 8-19 *SEN et SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA - situation enveloppe, quartiers de stockage HA : historiques des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien pour le SEN, le « SEA HA0 » de dysfonctionnement des conteneurs de stockage du quartier pilote HA, et le « SEA HA1/HA2 » de dysfonctionnement de conteneurs du quartier de stockage HA*

8.3 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios d'évolution altérée

8.3.1 Les enseignements tirés de l'évaluation des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface

Pour mémoire, ces scénarios d'évolution altérée de dysfonctionnement des scellements par l'interface (scellements des liaisons surface-fond uniquement, scellements des galeries uniquement ou tous les scellements) visent à évaluer l'influence de l'altération des fonctions de sûreté « s'opposer à la circulation de l'eau » et « retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques ».

Dans ces scénarios, le dysfonctionnement des scellements par l'interface est représenté par le choix de paramètres hydrodispersifs « conservatifs ». Chaque scénario fait l'objet de deux évaluations reprenant respectivement les hypothèses et données des situations de référence et enveloppe du SEN, à l'exception des paramètres hydrauliques relatifs aux interfaces entre les scellements et la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 8.1.1 du présent volume synthétisant la description de ces scénarios).

Les indicateurs retenus pour l'évaluation de l'influence du dysfonctionnement des scellements sont :

- les débits d'eau sortant des liaisons surface-fond et les vitesses d'écoulement de l'eau dans les ouvrages souterrains ;
- les débits molaires sortant par la voie « ouvrage » (galeries et liaisons surface-fond) et les débits molaires sortant par la couche du Callovo-Oxfordien.

Les résultats pour l'indicateur intermédiaire de débit molaire sortant par la couche du Callovo-Oxfordien étant identiques à ceux du SEN, la dose aux exutoires n'est pas évaluée pour les scénarios d'évolution altérée de dysfonctionnement des scellements par l'interface (cf. Chapitre 1 et chapitre 8.1.2.2 du présent volume).

8.3.1.1 Les enseignements relatifs au comportement hydraulique du système de stockage

Du point de vue du comportement hydraulique (vitesses d'écoulement et débits d'eau dans les ouvrages souterrains) en relation avec la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau », en cas de dysfonctionnement des scellements par l'interface, les effets sur le régime hydraulique dans les ouvrages souterrains restent limités, du fait :

- de conditions hydrauliques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien (faibles gradients de charge et faibles perméabilités) ;
- des performances des noyaux argileux des scellements ;
- de choix de conception de l'architecture limitant les écoulements au sein des ouvrages souterrains, en particulier la disposition groupée des liaisons surface-fond (puits et base des descenderies), la borgnitude des quartiers de stockage et la longueur des alvéoles de stockage ;
- un écoulement lent dans les galeries du stockage, orienté depuis les quartiers au sud du stockage (MA-VL) vers les quartiers au nord du stockage (HA), en lien avec le faible gradient de charge hydraulique horizontal dans l'Oxfordien.

Les lignes de défense citées précédemment contribuent ainsi à la robustesse du système de stockage en cas de dysfonctionnement des scellements par l'interface.

En effet, en cas de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond ou de tous les scellements par l'interface, les vitesses d'écoulement de l'eau dans les ouvrages (notamment en sortie du quartier de stockage MA-VL le plus sollicité du point de vue hydraulique) sont augmentées par rapport à celles du SEN, d'au plus un ordre de grandeur pour les évaluations basées sur la situation de référence et d'un facteur 4 pour celles basées sur la situation enveloppe. Les débits d'eau en sortie des liaisons surface-fond sont augmentés par rapport à ceux du SEN, d'environ deux ordres de grandeur pour les évaluations basées sur la situation de référence et d'un ordre de grandeur pour celles basées sur la situation enveloppe (cf. Tableau 8-3 du chapitre 8.1.2.1.3 du présent volume).

L'influence limitée de l'augmentation des vitesses d'écoulement et des débits d'eau en cas de dysfonctionnement des scellements par l'interface s'évalue également par l'analyse des débits de solutés (cf. Chapitre 8.3.1.2 du présent volume), en lien avec la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques ».

8.3.1.2 Les enseignements relatifs au transfert des solutés

Les enseignements présentés ci-après sont pour l'essentiel axés sur l'analyse des résultats obtenus pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), c'est-à-dire les trois radionucléides prépondérants issus des évaluations du SEN (cf. Chapitres 6.2 et 6.3 du présent volume). Ces enseignements s'appliquent également aux substances toxiques chimiques mobiles, dont le sélénium en particulier. Le transfert des solutés (radionucléides, substances toxiques chimiques) peu à très peu mobiles n'est pas modifié par le dysfonctionnement des scellements, par rapport au SEN, du fait de leur sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien, entraînant des échanges de masse importants entre les ouvrages souterrains (alvéoles de stockage, galeries) et la couche du Callovo-Oxfordien, et permettant ainsi de retenir ces solutés dans les premiers mètres de la couche du Callovo-Oxfordien.

La comparaison du comportement du stockage à travers l'analyse de l'évolution des débits molaires de radionucléides notamment en sortie des liaisons surface-fond, entre le SEA de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond uniquement et celui de dysfonctionnement des scellements des galeries uniquement, souligne le rôle de chaque groupe[98] de scellements (efficaces), en regard du dysfonctionnement de l'autre groupe de scellements par l'interface.

8.3.1.2.1 La redondance entre le groupe de scellements des galeries et celui des liaisons surface-fond

En se basant sur la situation de référence, les historiques des débits molaires des trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) en sortie des liaisons surface-fond (au toit du Callovo-Oxfordien) montrent la redondance entre les scellements des liaisons surface-fond et les scellements des galeries : les débits molaires maximaux en sortie des puits et descenderies sont du même ordre de grandeur pour les deux scénarios de dysfonctionnement. En relatif, l'efficacité de l'un ou l'autre des groupes de scellements des liaisons surface-fond et des galeries, permet (cf. Les graphes de gauche des figure 8-12, figure 8-13 et figure 8-14 du chapitre 8.1.2.2 du présent volume) :

- d'atténuer le maximum de débit molaire des trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) en sortie des liaisons surface-fond de 1 à 2 ordres de grandeur par rapport au scénario de dysfonctionnement de tous les scellements ;
- de garantir que la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste toujours la voie de transfert dominante.

Aussi, lorsque les sollicitations hydrauliques des scellements sont celles de la situation de référence, la redondance du groupe de scellements (scellements des galeries et scellements des liaisons surface-fond) est assurée : l'efficacité de l'un ou l'autre groupe de scellements permet de compenser le dysfonctionnement par l'interface de l'autre groupe, et de garantir que la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert principale.

[98] On entend par « groupe de scellements » tous les scellements de même type (scellements des liaisons surface-fond d'une part et scellements des galeries d'autre part).

8.3.1.2.2 Le rôle du groupe de scellements des liaisons surface-fond

En se basant sur la situation enveloppe, lorsque les scellements sont soumis à des sollicitations hydrauliques plus importantes (perméabilité et gradient de charge « conservatifs »), associés à des conductivités hydrauliques « conservatives » de la ZFC dans l'Unité Argileuse, le rôle des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) devient nettement supérieur à celui des scellements des galeries.

En effet, les résultats (cf. Les graphes de droite des figure 8-12, figure 8-13 et figure 8-14 du chapitre 8.1.2.2 du présent volume) montrent que lorsque les scellements des liaisons surface-fond sont dysfonctionnant par leur interface, les débits molaires maximaux des trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) en sortie des liaisons surface-fond sont de 3 à 4 ordres de grandeur supérieurs à ceux d'une configuration avec tous scellements efficaces (SEN) et similaires à ceux obtenus en considérant le dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface (SEA). Pour les scénarios SEA de dysfonctionnement de tous les scellements ou des scellements des liaisons surface-fond uniquement, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste supérieure à celle par les ouvrages, d'au moins un facteur 3 à un ordre de grandeur selon les radionucléides, du fait notamment des choix de conception de l'architecture (cf. Chapitre 8.3.1.2.3).

Ces mêmes résultats montrent également que lorsque les scellements des galeries sont dysfonctionnant par l'interface, les débits molaires maximaux des trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) en sortie des liaisons surface-fond ne sont supérieurs que d'environ un ordre de grandeur à ceux d'une configuration avec tous scellements efficaces (SEN). Cet effet très limité souligne le rôle de redondance assuré par les scellements des liaisons surface-fond.

8.3.1.2.3 Le rôle de l'architecture de stockage

En se basant sur la situation de référence, du fait de conditions hydrauliques favorables du Callovo-Oxfordien (faibles gradients de charge et perméabilités), et des choix de conception de l'architecture limitant les écoulements au sein des ouvrages souterrains (regroupement des liaisons surface-fond à leur base, borgnitude des quartiers de stockage, longueur des alvéoles…), seulement 0,1 % de l'inventaire total initial en iode 129 (provenant essentiellement des colis de déchets MA-VL) atteint, sur le million d'années, les liaisons surface-fond, lorsque seules les interfaces au droit de tous les scellements sont dysfonctionnants.

Pour tous les scénarios de dysfonctionnement des scellements par leur interface et quelle que soit la situation du SEN retenue comme base d'évaluation, le transfert des solutés depuis les alvéoles de stockage vers les galeries reste limité. En effet, la longueur des alvéoles et celle des galeries offrent une grande surface d'échanges avec la couche du Callovo-Oxfordien. Le transfert des solutés dans les galeries depuis les sorties d'alvéoles vers la base des liaisons surface-fond permet ainsi une atténuation et un retard des débits de solutés en sortie des liaisons surface-fond (au niveau du toit du Callovo-Oxfordien) sur les quelques centaines de mètres de transfert. À titre illustratif, en se basant sur la situation de référence du SEN, le débit molaire maximal d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond est atténué de 2 à 3 ordres de grandeur par le transfert de l'iode depuis les quartiers de stockage vers les liaisons surface-fond (cf. Figure 8-11 du chapitre 8.1.2.2.1 du présent volume). Cela illustre la robustesse du système de stockage après fermeture en particulier du fait des choix de conception de l'architecture, dont sa borgnitude, la disposition groupée des liaisons surface-fond et les longueurs des alvéoles de stockage, contribuant à atténuer le transfert en solution dans les ouvrages souterrains.

8.3.1.2.4 L'influence sur les incidences sanitaires sur l'homme

Comme indiqué dans les chapitres ci-dessus, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert principale, quels que soient le scénario de dysfonctionnement des scellements par l'interface et la situation considérée. Pour l'ensemble des évaluations, le maximum de débit molaire au toit de la couche du Callovo-Oxfordien reste identique à celui obtenu pour les deux situations (référence et enveloppe) du scénario d'évolution normale.

Le dysfonctionnement des scellements par l'interface n'a ainsi pas d'influence sur le débit molaire aux exutoires (et par conséquent sur la dose), qui reste piloté par le débit molaire en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien. Ces conclusions sont également applicables au transfert des substances toxiques chimiques pour lesquelles la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste supérieure à celle par les ouvrages et identique à celle obtenue pour le scénario d'évolution normale. Ainsi, les débits massiques en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien et aux exutoires (et par conséquent les concentrations massiques aux exutoires) sont identiques à ceux du SEN.

Conclusion

Pour les scénarios d'évolution altérée de dysfonctionnement des scellements par l'interface, les résultats des évaluations montrent la robustesse du système de stockage par rapport aux fonctions de sûreté « S'opposer à la circulation de l'eau » et « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques », du fait :

- des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- des performances du noyau argileux des scellements ;
- des choix de conception de l'architecture limitant les écoulements au sein des ouvrages souterrains, en particulier le regroupement des liaisons surface-fond à leur base, la borgnitude des quartiers de stockage et la longueur des alvéoles de stockage.

Les résultats des évaluations montrent :

- la redondance des deux groupes de scellements (liaisons surface-fond, galeries) pour les scénarios se basant sur la situation de référence du SEN ;
- le rôle important des scellements des liaisons surface-fond pour les scénarios se basant sur la situation enveloppe du SEN, la performance hydraulique des scellements des liaisons surface-fond permettant d'assurer la redondance lorsque les scellements des galeries sont dysfonctionnants. Le dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface met en exergue le rôle important de l'architecture, en particulier sa borgnitude et le regroupement des liaisons surface-fond à leur base.

Les effets d'un dysfonctionnement des scellements des galeries et/ou des liaisons surface-fond par l'interface sont limités. Même en cas de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface, l'évolution du régime hydraulique dans le stockage reste limitée par rapport à celle du scénario d'évolution normale, et la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert principale avec des débits de solutés (radionucléides, substances toxiques chimiques) en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien identiques à ceux obtenus en SEN.

En conséquence, en termes d'incidence sanitaire sur l'homme, les doses annuelles totales potentiellement induites par les radionucléides et les concentrations massiques des substances toxiques chimiques, aux exutoires retenus pour chacune des deux situations support aux évaluations des SEA (référence, enveloppe), sont identiques à celles obtenues en SEN (cf. Chapitres 6.2.2, 6.2.4, 6.3.2 et 6.3.4 du présent volume).

8.3.2 Les enseignements tirés de l'évaluation des SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA

Pour mémoire, les deux scénarios d'évolution altérée de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA (SEA de dysfonctionnement de tous les conteneurs du quartier pilote HA, SEA de dysfonctionnement d'un conteneur dans chaque alvéole du quartier de stockage HA) visent à évaluer l'influence de l'altération de la fonction de sûreté « limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage ».

Pour ces scénarios, les paramètres sont définis de manière conservative uniquement sur la base de la situation enveloppe du SEN. Par ailleurs, ils prennent en compte un relâchement labile des verres lorsque les conteneurs de stockage HA sont dysfonctionnant.

Les indicateurs retenus pour l'évaluation de l'influence du dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA sont :

- les débits molaires en différents points de la voie « ouvrage » jusqu'en sortie des liaisons surface-fond ;
- les débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien.

Les résultats de ces indicateurs intermédiaires étant identiques à ceux du SEN (cf. Chapitre 1 et chapitre 8.2.2.3 du présent volume), la dose aux exutoires n'est pas évaluée pour les SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA.

L'analyse des résultats des deux scénarios SEA de dysfonctionnement (i) de tous les conteneurs de stockage du quartier pilote HA, ou (ii) de dysfonctionnement d'un conteneur dans chaque alvéole du quartier de stockage HA (cf. Chapitre 8.2.2 du présent volume), conduit à identifier les enseignements listés ci-après. Ils focalisent sur les influences potentielles du dysfonctionnement sur le fonctionnement hydraulique du système de stockage d'une part, et sur le transfert des radionucléides depuis les alvéoles des quartiers HA jusqu'au toit de la couche du Callovo-Oxfordien d'autre part, incluant la voie « ouvrages ».

Les résultats des évaluations montrent que :

- l'influence de la température sur la perméabilité du Callovo-Oxfordien pendant le relâchement précoce des conteneurs de stockage HA dysfonctionnant ne modifie pas le schéma hydraulique des écoulements d'eau au sein des alvéoles de stockage, des ouvrages souterrains et dans le Callovo-Oxfordien. Les résultats relatifs à l'hydraulique (débits d'eau sortant des liaisons surface-fond, vitesses d'écoulement de l'eau dans les ouvrages souterrains) sont identiques à ceux du SEN ;
- à l'échelle des alvéoles HA, la voie de transfert principale reste celle par la couche du Callovo-Oxfordien. En effet, sur un million d'années et comme en SEN, seulement 7 % de l'inventaire total initial d'iode 129 entre dans les galeries d'accès. Cette prépondérance de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien s'explique par l'absence de drain hydraulique dans les galeries et par les choix de conception du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA, notamment la longueur hectométrique des alvéoles HA ;
- les débits molaires des radionucléides mobiles entrant dans les galeries d'accès apparaissent plus précocement par rapport à ceux du SEN (cf. Figure 8-17 et figure 8-18 du chapitre 8.2.2.3.1 du présent volume), en raison du relâchement prématuré des radionucléides lorsque les conteneurs de stockage HA sont dysfonctionnants (perte d'étanchéité du conteneur de stockage HA et relâchement labile). Cependant, les temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien et par les ouvrages souterrains (galeries, liaisons surface-fond) sont suffisamment longs pour totalement masquer cet effet ;
- le transfert des radionucléides qui entrent dans les galeries d'accès selon la voie « ouvrage » reste lent et limité par diffusion. Comme pour le SEN, ce transfert lent et limité par les ouvrages souterrains permet aux radionucléides de diffuser depuis les ouvrages vers la couche du Callovo-Oxfordien. Ainsi, comme pour le SEN, on observe une atténuation des débits molaires de ces radionucléides de 2 à 3 ordres de grandeur en entrée de la zone centrale, et une atténuation supplémentaire d'un ordre de grandeur le long des liaisons surface-fond. Ainsi le débit molaire en sortie des liaisons surface-fond reste identique à celui obtenu en SEN pour les deux SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA. Il reste donc inférieur de plusieurs ordres de grandeur au débit molaire de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien.

Aucun effet sur les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien n'est observé du fait du dysfonctionnement de quelques conteneurs de stockage HA, confirmant ainsi la robustesse du système de stockage. La voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert prédominante, quel que soit le quartier et le nombre de conteneurs dysfonctionnants concernés).

À ce titre, le dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA n'a pas d'influence sur les débits molaires aux exutoires (et par conséquent sur les doses), qui restent pilotés par les débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien et identiques à ceux du SEN.

Ces conclusions sont également applicables au transfert des substances toxiques chimiques vis-à-vis des débits massiques aux exutoires (et par conséquent des concentrations massiques aux exutoires), qui restent pilotés par les débits massiques en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien et identiques à ceux du SEN.

Conclusion

Les résultats des évaluations montrent que le système de stockage est robuste vis-à-vis des deux scénarios d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA. En effet :

- le SEA de dysfonctionnement prématuré de tous les conteneurs de stockage du quartier pilote HA ou bien le SEA de dysfonctionnement prématuré d'un conteneur de stockage HA dans chaque alvéole du quartier de stockage HA, entraînant le relâchement des radionucléides dès le début de la phase après fermeture en milieu saturé (perte de la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »), est sans influence :
  - ✓ sur les performances globales du système de stockage ; en effet, les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien sont les mêmes que pour le SEN ;
  - ✓ et donc sur l'incidence sur la santé de l'homme, les SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA n'induisant pas de modification du transfert des solutés jusqu'aux exutoires ;
- les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien sont identiques entre le scénario d'évolution normale et les scénarios d'évolution altérée de dysfonctionnement prématuré de tous les conteneurs de stockage du quartier pilote HA ou du dysfonctionnement d'un conteneur de stockage HA dans chaque alvéole du quartier de stockage HA ;
- les performances de la couche du Callovo-Oxfordien et l'efficacité des scellements apportent des lignes de défense robustes en cas de perte de la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage ».

9

Les scénarios *What-if*

9.1 Les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface 508

9.2 Le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA 551

9.3 Les scénarios *What-if* relatifs à une discontinuité non détectée postulée dans la couche du Callovo-Oxfordien 561

9.4 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios *What-if* 590

9.1 Les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface

9.1.1 La description et la conceptualisation des *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface

L'objectif de cette section est de décrire les trois scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements identifiés par l'analyse des risques et incertitudes des scellements (cf. Chapitre 3 du présent volume) conformément à la démarche de définition des scénarios en après fermeture (cf. Chapitre 1 du présent volume).

Les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface se déclinent comme suit et les modalités de représentation associées sont synthétisées dans le tableau 9-1.

- scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par cumul d'un dysfonctionnement du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien ;
- scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des galeries par cumul d'un dysfonctionnement du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien ;
- scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements par cumul du dysfonctionnement du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien.

Comme présenté au chapitre 3 du présent volume, seuls les composants dysfonctionnant sont représentés de manière différente par rapport au scénario d'évolution normale (SEN) à partir duquel sont définis les scénarios *What-if*. Il est ainsi défini deux cas d'évaluation pour chaque scénario *What-if* identifié :

- un cas d'évaluation s'appuyant sur les hypothèses et données de la situation de référence du SEN ;
- un cas d'évaluation s'appuyant sur les hypothèses et données de la situation enveloppe du SEN.

Pour l'ensemble de ces scénarios *What-if*, il est postulé un dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface dès la fermeture du stockage.

Tableau 9-1 *Scénarios What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien*

Scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface	Typologie de scellements		
	Scellement de puits (LSF)	Scellement de descenderies (LSF)	Scellement des galeries
***What-if* « Dysfonctionnement des scellements des LSF par le noyau argileux et par l'interface »**	• Noyau non efficace • Interface noyau/argilites non efficace	• Noyau non efficace • Interface noyau/argilites non efficace	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites efficace
***What-if* « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface »**	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites efficace	• Noyau efficace • Interface noyau/argilites efficace	• Noyau non efficace • Interface noyau/argilites non efficace
***What-if* « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau argileux et par l'interface »**	• Noyau non efficace • Interface noyau/argilites non efficace	• Noyau non efficace • Interface noyau/argilites non efficace	• Noyau non efficace • Interface noyau/argilites non efficace
Tous les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements	Il est postulé une ZFC continue le long de l'ensemble des ouvrages avec des propriétés minimalistes afin de tester la robustesse du système de stockage		

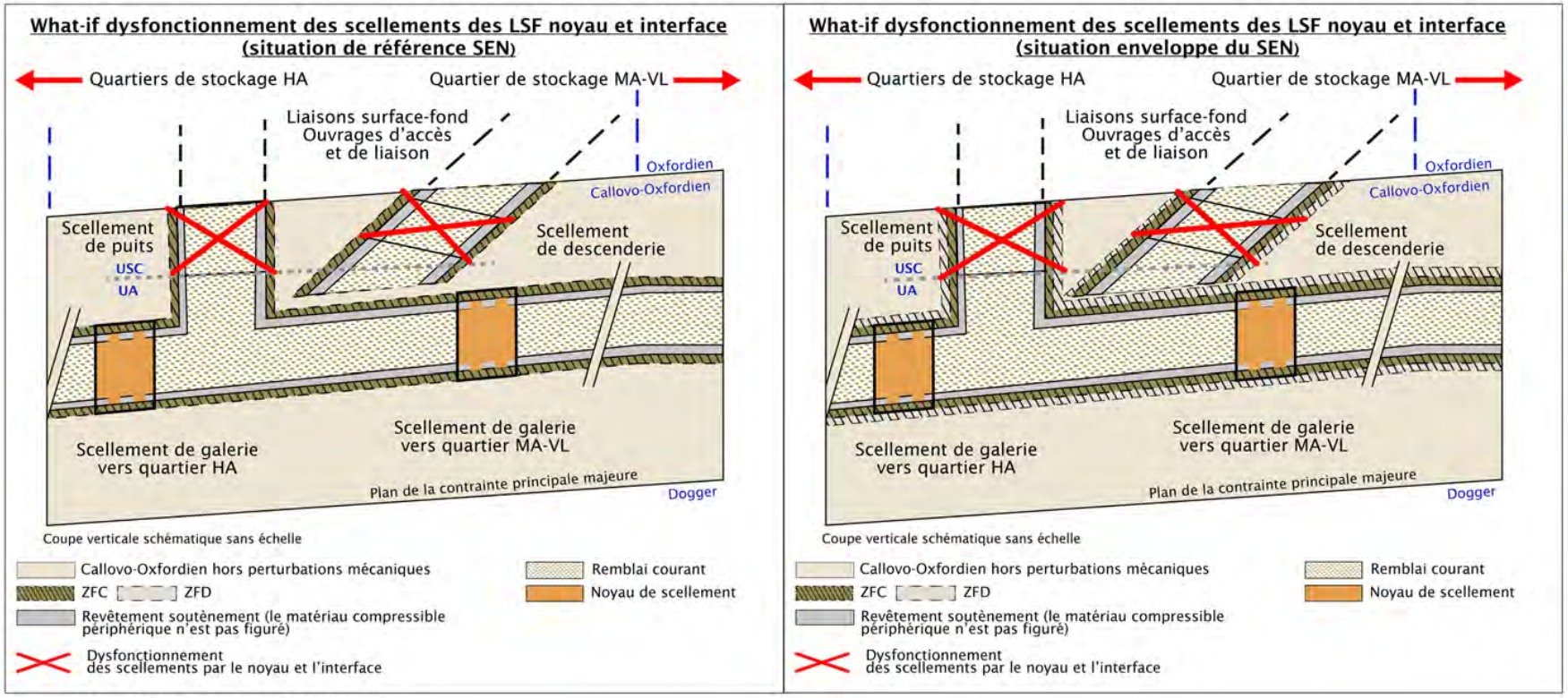
Les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements définis sur la base de la situation enveloppe du SEN considèrent que le stockage est positionné au plus bas dans la couche du Callovo-Oxfordien (position qui se traduit par une garde saine de 50 mètres par rapport au mur de la couche du Callovo-Oxfordien). Cette hypothèse permet de maximiser la voie de transfert par les ouvrages et donc les possibilités de court-circuit de la couche du Callovo-Oxfordien par la voie « ouvrage ».

Comme en SEN, les champs hydrauliques en *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface sont établis en régime permanent (état stationnaire). Ce choix est associé au fait de considérer un état saturé dès l'instant initial, afin de maximiser les flux de radionucléides au sein des ouvrages.

9.1.1.1 La description du *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par le noyau argileux et par l'interface »

Ce scénario *What-if* postule que (cf. Figure 9-1) :

- tous les scellements des liaisons surface-fond dysfonctionnent. Le dysfonctionnement est représenté par un défaut du noyau argileux et par une interface non efficace ;
- la mise en place ou la dépose du revêtement ne respecte pas ses exigences. Le dysfonctionnement est représenté par une dégradation des propriétés de l'endommagement mécanique au droit des ouvrages dans l'USC et l'UT ;
- les scellements de galerie dans l'UA sont efficaces.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0006-B

Figure 9-1 *Schéma illustratif du scénario What-if de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par le noyau argileux et par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)*

Les hypothèses et données pour la conceptualisation des scellements des liaisons surface-fond sont présentées dans les chapitres suivants et illustrées en figure 9-2 pour le *What-if* basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et en figure 9-3 pour celui basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN.

9.1.1.1.1 La représentation du dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT)

a) Le noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond

Le noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond est représenté avec les caractéristiques hydrauliques et de transport d'un remblai telles que définies dans le SEN.

b) L'extension de la ZFC postulée dans l'USC/UT

L'extension de la ZFC postulée dans l'USC/UT est identique à celle définie pour le SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface. Cette représentation est pénalisante car définie sur la base des observations faites au Laboratoire souterrain Meuse/Haute-Marne, dans la niche au niveau -445 mètres. Ces observations ne correspondent pas à une ZFC (*i.e.* Fracturation connectée) mais à une fracturation éparse (micro-fissurée) et non connectée longitudinalement.

L'extension de la ZFC postulée est de 0,2 fois le rayon excavé conformément aux observations effectuées de la fracturation éparse observée au laboratoire souterrain dans l'USC/UT.

c) Les propriétés hydrauliques, de transport et de rétention de la ZFC

Afin de couvrir l'ensemble des causes de dysfonctionnement postulées, les propriétés hydrauliques, de transport et de rétention de la ZFC postulée sont définies de la manière suivante :

- pour le scénario *What-if* dont les paramètres sont définis sur la base de la situation de référence du SEN :
  - ✓ de manière conservative, la conductivité hydraulique est prise égale à celle définie en SEN dans l'UA dégradée de deux ordres de grandeur ($K = 10^{-7}$ m.s^{-1}) ;
  - ✓ de manière conservative, les propriétés de rétention chimique de la ZFC sont prises égales à celles définies en situation de référence du SEN dans la couche du Callovo-Oxfordien dégradées de deux ordres de grandeur ;
- pour le scénario *What-if* dont les paramètres sont définis sur la base de la situation enveloppe du SEN, les propriétés hydrauliques et de transport de la ZFC sont assimilées à celles d'un sable ($K = 10^{-6}$ m.s^{-1}) et il n'est pas considéré de propriétés de rétention chimique.

9.1.1.1.2 La représentation des sections courantes des descenderies, hors scellements

Les argilites au droit des sections courantes des descenderies dans l'USC et l'UT sont représentés de la même manière qu'au droit des noyaux argileux. Il est donc considéré une ZFC continue le long de l'ensemble des ouvrages dans l'USC/UT (descenderies remblayées et scellements des liaisons surface-fond).

Pour le scénario *What-if* dont les paramètres se basent sur la situation de référence du SEN, il est considéré en présence d'une perturbation alcaline que :

- les facteurs correctifs sur la conductivité hydraulique et les propriétés de transport de la zone reminéralisée sont identiques à ceux définis en situation de référence SEN ($K = 10^{-6}$ m.s^{-1}) ;
- les propriétés de rétention chimique attribuées à la ZFC (valeurs de référence dégradées de deux ordres de grandeur) sont enveloppes des effets de la perturbation alcaline telle que définie en situation de référence.

Pour le scénario *What-if* dont les paramètres se basent sur la situation enveloppe du SEN, et au regard des propriétés pénalisantes attribuées à la ZFC pour cette situation, la perturbation alcaline au droit des ouvrages en béton n'est pas représentée.

9.1.1.1.3 La représentation des scellements des galeries

Les scellements des galeries sont considérés performants. Ils sont donc représentés de la même manière et avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique qu'en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

9.1.1.1.4 La représentation des ouvrages dans l'UA (hors scellements) et des composants naturels (couche du Callovo-Oxfordien et formations encaissantes)

Les autres composants du stockage sont représentés de la même manière et avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique qu'en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

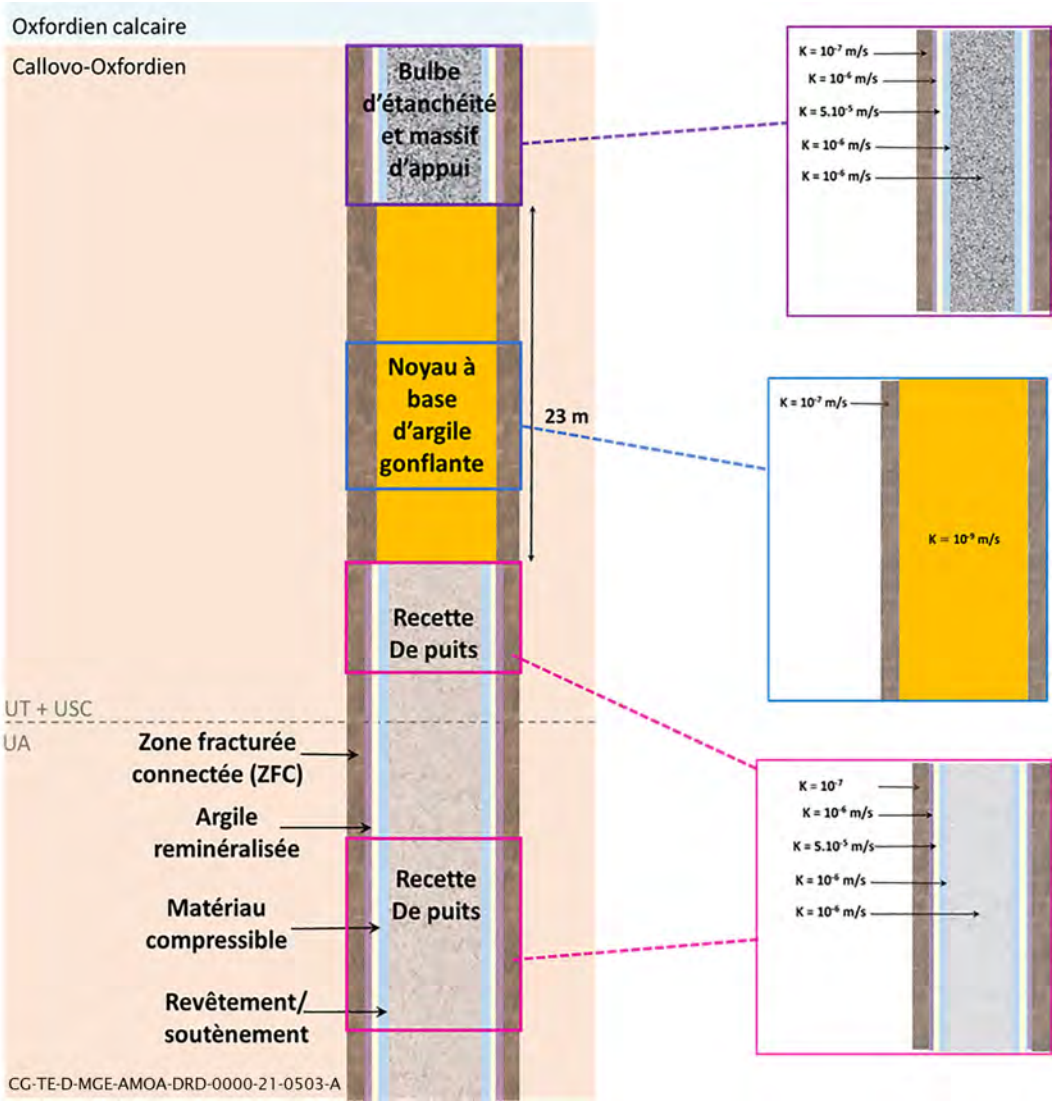


Figure 9-2 *Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en What-if de dysfonctionnement des LSF par le noyau argileux et l'interface (basé sur la situation de référence du SEN)*

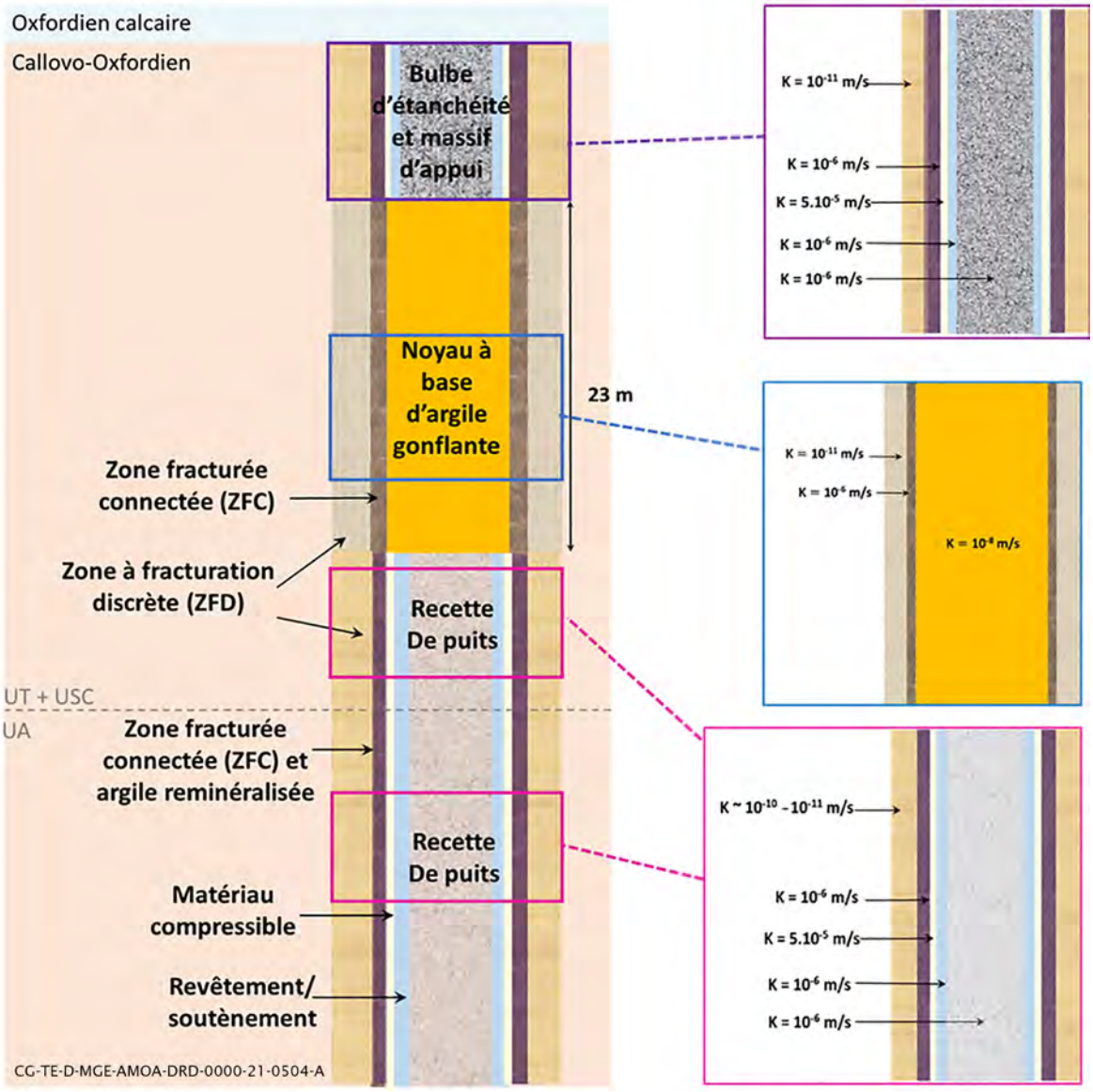
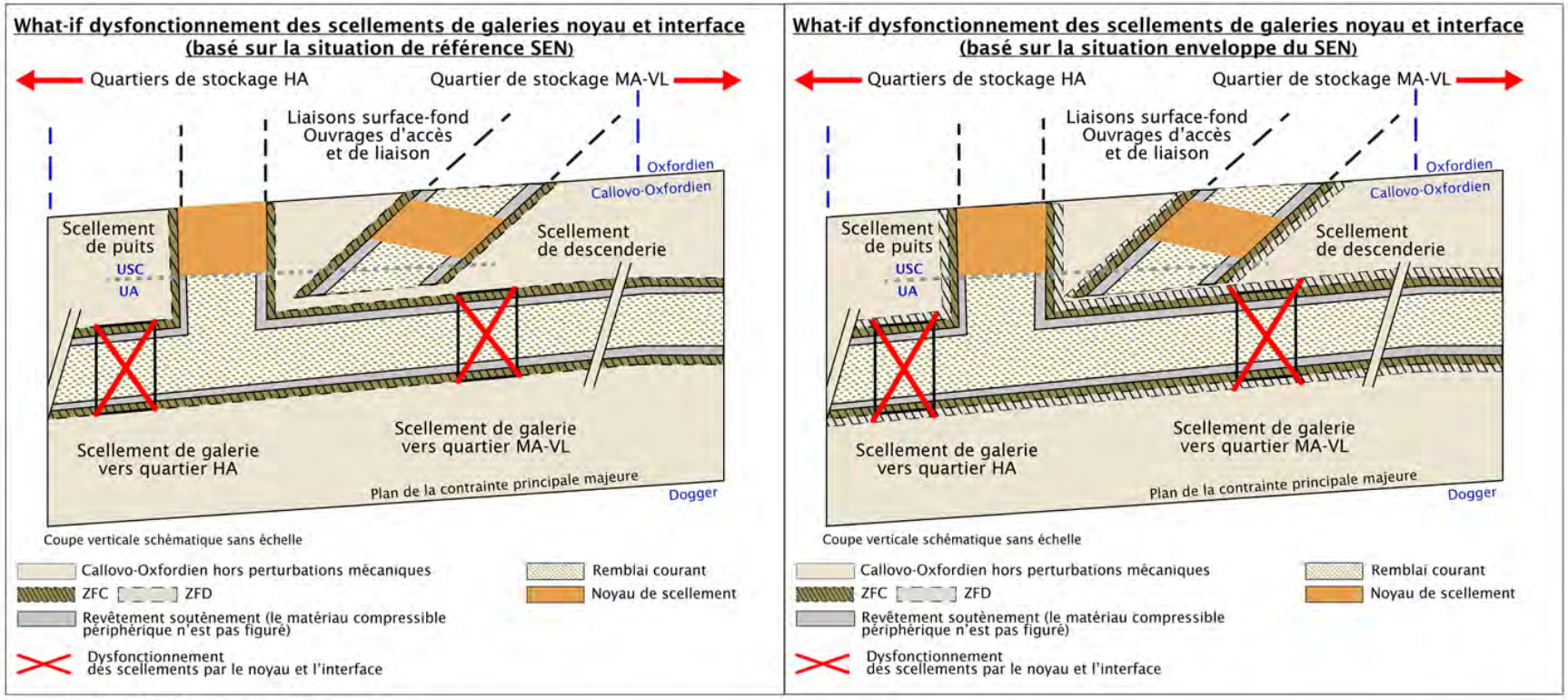


Figure 9-3 *Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en What-if de dysfonctionnement des LSF par le noyau argileux et l'interface (basé sur la situation enveloppe du SEN)*

9.1.1.2 La description du *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface »

Ce scénario *What-if* postule que (cf. Figure 9-4) :

- tous les scellements des galeries dans l'UA dysfonctionnent. Le dysfonctionnement est représenté par un défaut du noyau argileux et par une interface non efficace ;
- la mise en place ou la dépose du revêtement ne respecte pas ses exigences. Le dysfonctionnement est représenté par une dégradation des propriétés de l'endommagement mécanique au droit des ouvrages dans l'UA ;
- les scellements des liaisons surface-fond dans l'USC/UT sont efficaces.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0007-B

Figure 9-4 *Schéma illustratif du What-if de dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)*

Les hypothèses et données pour la conceptualisation des scellements des galeries sont présentées dans les chapitres suivants et illustrées en figure 9-5 pour le scénario *What-if* basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et en figure 9-6 pour le scénario *What-if* basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN.

9.1.1.2.1 La représentation du dysfonctionnement des scellements de galerie dans l'unité argileuse (UA)

a) Le noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond

Le noyau argileux des scellements des liaisons surface-fond est représenté avec les caractéristiques hydrauliques et de transport d'un remblai telles que définies dans le SEN.

b) Le linéaire de dépose du revêtement-soutènement

Le linéaire de dépose du revêtement-soutènement correspond au linéaire alternant noyau argileux et revêtement-soutènement laissé en place. Les propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique de cette zone sont définies de la manière suivante :

- la conductivité hydraulique de cette zone assimilée à un macro-composant poreux continu homogène est définie par la moyenne harmonique de la conductivité hydraulique du noyau argileux dysfonctionnant et des revêtement-soutènements laissés en place ($K = 5.10^{-9}$ m.s^{-1} pour le scénario *What-if* basé sur la situation de référence du SEN et $K = 5 \times 10^{-8}$ m.s^{-1} pour celui basé sur la situation enveloppe du SEN). Les propriétés de transport et de rétention chimique sont identiques à celles définies en SEN (matériau assimilé à un sable sans rétention).

c) L'extension de la ZFC

L'extension de la ZFC est identique à celle définie au droit des ouvrages dans l'UA dans le SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

d) Les propriétés hydrauliques, de transport et de rétention de la ZFC

Afin de couvrir l'ensemble des causes de dysfonctionnement postulées et synthétisées dans le tableau 9-1, les propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique de la ZFC sont définies de la manière suivante :

- scénario *What-if* dont les paramètres sont définis sur la base de la situation de référence du SEN :
  - ✓ de manière conservative, la conductivité hydraulique est prise égale à celle définie en SEN dans l'UA dégradée de deux ordres de grandeur ($K = 10^{-7}$ m.s^{-1}) ;
  - ✓ de manière conservative, les propriétés de rétention chimique de la ZFC sont prises égales à celles définies en SEN dans la couche du Callovo-Oxfordien dégradées de deux ordres de grandeur ;
- pour le scénario *What-if* dont les paramètres sont définis sur la base de la situation enveloppe du SEN, les propriétés hydrauliques et de transport de la ZFC sont assimilées à celles d'un sable ($K = 10^{-6}$ m.s^{-1}) et il n'est pas considéré de propriétés de rétention chimique.

9.1.1.2.2 La représentation des ouvrages dans l'unité argileuse (UA) (hors scellements)

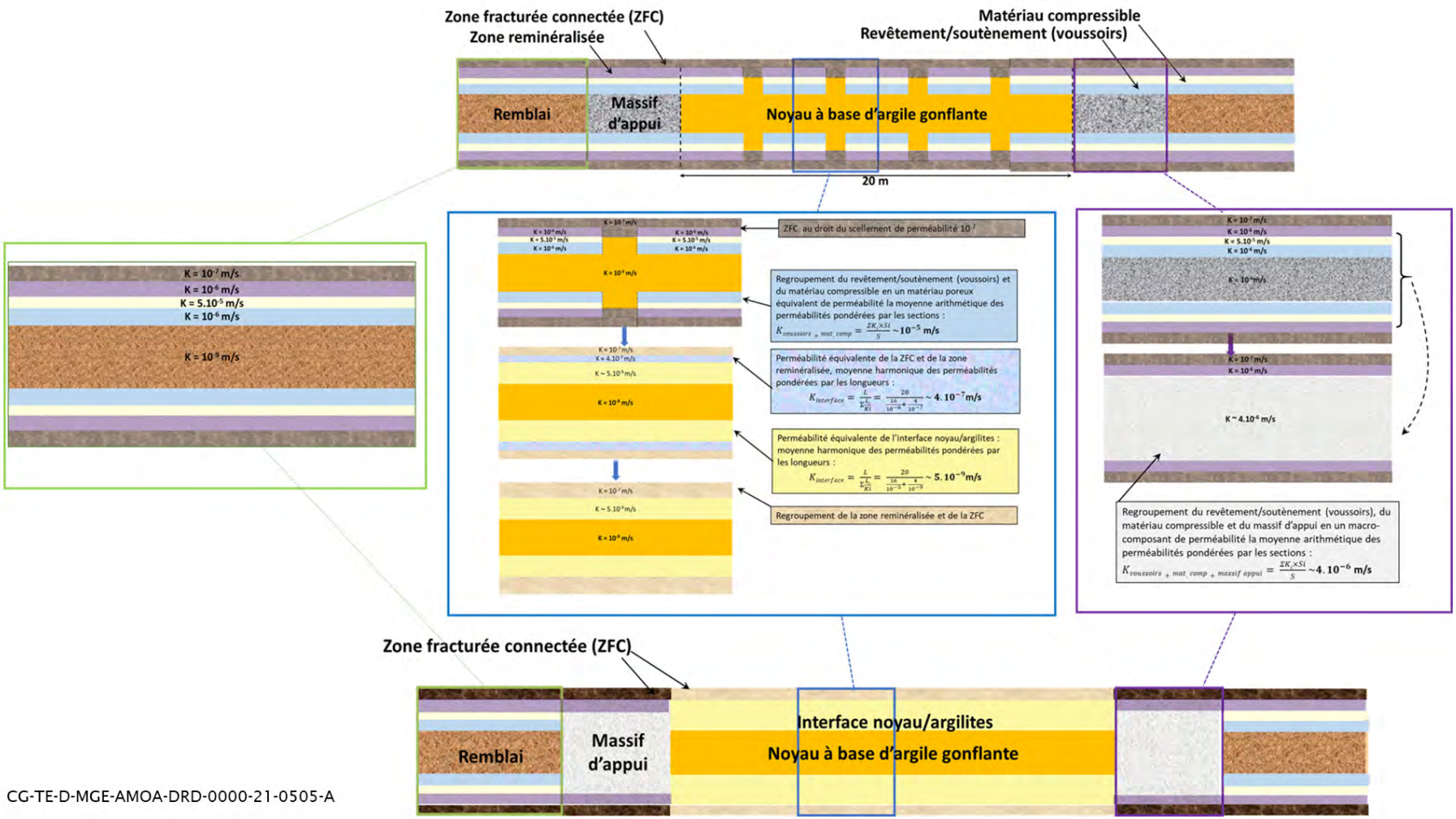
Au droit des galeries remblayées dans l'UA et des alvéoles, il est considéré que la ZFC possède les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique que celles définies au droit des scellements.

9.1.1.2.3 La représentation des scellements des LSF dans l'USC et l'UT

Les scellements des LSF sont considérés performants. Ils sont donc représentés de la même manière et avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique qu'en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

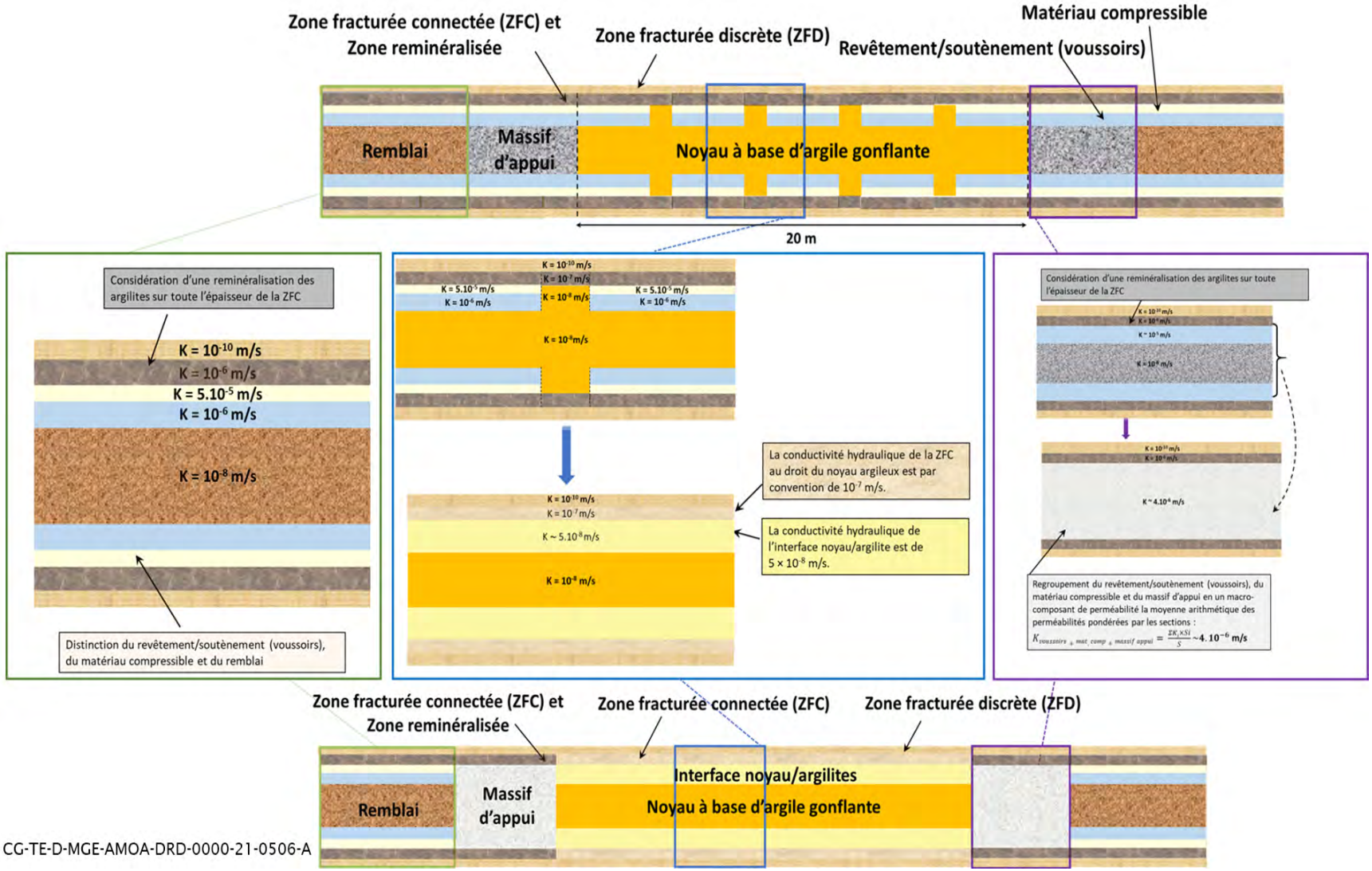
9.1.1.2.4 La représentation des ouvrages dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT) (hors scellement) et des composants naturels (couche du Callovo-Oxfordien et formations encaissantes)

Les autres composants du stockage sont représentés de la même manière et avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique qu'en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0505-A

Figure 9-5 Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en What-if de dysfonctionnement des scellements de galeries par le noyau argileux et par l'interface (basé sur la situation de référence du SEN)



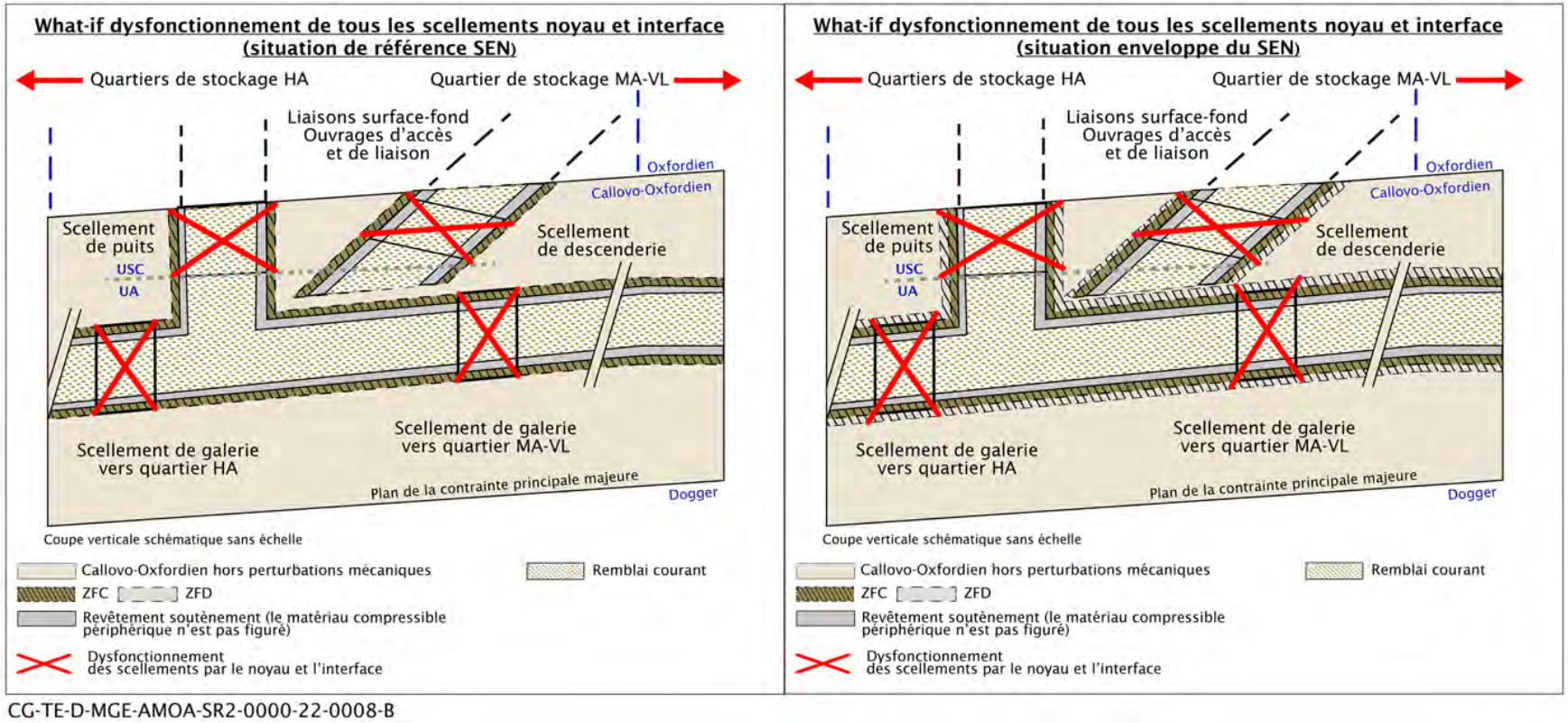
CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0506-A

Figure 9-6 *Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en What-if de dysfonctionnement des scellements de galeries par le noyau argileux et par l'interface (basé sur la situation enveloppe du SEN)*

9.1.1.3 La description du *What-if* « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau argileux et par l'interface »

Ce scénario *What-if* postule que (cf. Figure 9-7) :

- tous les scellements dysfonctionnent. Le dysfonctionnement est représenté par un défaut du noyau argileux et par une interface non efficace ;
- la mise en place ou la dépose du revêtement ne respecte pas ses exigences. Le dysfonctionnement est représenté par une dégradation des propriétés de l'endommagement mécanique au droit des ouvrages dans l'UA et l'USC/UT.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0008-B

Figure 9-7 *Schéma illustratif du scénario What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau argileux et par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)*

9.1.1.3.1 La représentation du dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond dans l'USC et l'UT et des autres ouvrages dans l'USC/UT (hors scellements)

Le dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond est représenté de la même manière que dans le scénario *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par le noyau argileux et par l'interface » (cf. Chapitre 9.1.1.1 du présent volume).

Les autres ouvrages dans l'USC/UT sont représentés de la même manière que dans le scénario *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par le noyau argileux et par l'interface » (cf. Chapitre 9.1.1.1 du présent volume).

9.1.1.3.2 La représentation du dysfonctionnement des scellements des galeries dans l'UA et des autres ouvrages dans l'UA (hors scellements)

Le dysfonctionnement des scellements des galeries est représenté de la même manière que dans le scénario *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface » (cf. Chapitre 9.1.1.2 du présent volume).

Les autres ouvrages dans l'UA (galeries remblayées, liaisons surface-fond et alvéoles) sont représentés de la même manière que dans le scénario *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface » (cf. Chapitre 9.1.1.2 du présent volume).

9.1.1.3.3 La représentation des composants naturels (couche du Callovo-Oxfordien et formation encaissantes)

Les autres composants du stockage sont représentés de la même manière et avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention chimique qu'en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

9.1.1.4 Les indicateurs considérés

Les indicateurs utilisés sont identiques à ceux définis pour les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface (cf. Chapitre 8.1.1 du présent volume), c'est-à-dire :

- les temps de transfert et la capacité de drainage du stockage : ces indicateurs permettent d'évaluer les temps de transfert diffusif/convectif dans la couche du Callovo-Oxfordien et dans les galeries d'accès et de liaison à partir de chaque quartier. Cet indicateur est notamment approprié pour évaluer la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » ;
- les quantités de radionucléides transitant le long et/ou dans les ouvrages et migrant par diffusion dans la couche du Callovo-Oxfordien. L'évaluation de ces deux voies de transfert permet d'une part, d'apprécier la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides », et d'autre part, de calculer le *ratio* des débits molaires afférents. L'évaluation de ce dernier indicateur permet d'apprécier l'impact du dysfonctionnement du scellement sur la dominance de la voie de transfert à travers la couche du Callovo-Oxfordien ;
- la dose aux exutoires : celle-ci est quantifiée, lorsque nécessaire (si les résultats des indicateurs intermédiaires sont sensiblement différents de ceux du SEN, cf. Chapitre 1 du présent volume), afin de vérifier que l'objectif de protection de l'homme soit toujours satisfait.

9.1.1.5 La synthèse des paramètres hydrauliques associés à la ZFC dans les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface

Les propriétés hydrauliques de la fracturation connectée (ZFC) postulée au droit des scellements pour représenter un dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface, sont dégradées par rapport à celles du SEN et sont résumées dans le tableau 9-2.

Tableau 9-2 *Valeurs des conductivités hydrauliques des argilites endommagées mécaniquement (ZFC) pour les scénarios What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface (les valeurs dégradées dans le cadre des scénarios What-if sont ombrées)*

Unité	Zone d'argilites endommagées	Situation enveloppe				Situation de référence			
		SEN	*What-if* « Dysf. des scellements des LSF »	*What-if* « Dysf. des scellements des galeries »	*What-if* « Dysf. de tous les scellements »	SEN	*What-if* « Dysf. des scellements des LSF »	*What-if* « Dysf. des scellements des galeries »	*What-if* « Dysf. de tous les scellements »
UA	ZFC au droit des zones de dépose des scellements des galeries	5×10^{-9}	5×10^{-9}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-11}	10^{-11}	10^{-7}	10^{-7}
	ZFC au droit du revêtement laissé en place des scellements des galeries					10^{-9}	10^{-9}	10^{-7}	10^{-7}
	ZFC au droit du revêtement (hors scellements)	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-7}	10^{-7}
	ZFD	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	N/A	N/A	N/A	N/A
USC/UT	ZFC au droit du noyau argileux des scellements des LSF	N/A	10^{-6}	N/A	10^{-6}	N/A	10^{-7}	N/A	10^{-7}
	ZFC au droit du revêtement (hors scellements)	N/A	10^{-6}	N/A	10^{-6}	N/A	10^{-7}	N/A	10^{-7}
	ZFD	10^{-11}	10^{-11}	10^{-11}	10^{-11}	N/A	N/A	N/A	N/A

9.1.2 Les résultats des évaluations des scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface

9.1.2.1 Les effets du dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface sur les circulations d'eau dans le stockage

9.1.2.1.1 Le *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par le noyau et par l'interface »

Sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN, le scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par le noyau argileux et par l'interface conduit à des débits d'eau à la sortie des liaisons surface-fond de l'ordre de 3,6 m^3 par an (cf. Tableau 9-3). Ces débits sont 3 600 fois supérieurs à ceux obtenus en situation de référence du SEN et 9 fois supérieurs à ceux du SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface » (cf. Tableau 8-3 du chapitre 8.1.2.1 du présent volume).

L'efficacité des scellements des galeries induit des pertes de charges importantes de part et d'autre des scellements (cf. Figure 9-8), ce qui limite les vitesses d'écoulement en sortie du quartier de stockage MA-VL (vitesses identiques à celles du SEA « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface » et accroissement des vitesses d'un facteur 3 par rapport à celles du SEN).

Sur la base des paramètres de la situation enveloppe du SEN, l'analyse des résultats montre :

- une propagation de la charge hydraulique de l'Oxfordien jusqu'à la base des scellements de galeries (cf. Figure 9-8), qui favorise des écoulements d'eau vers la zone centrale et conduit à des débits d'eau de l'ordre de 43 m^3 par an en sortie des liaisons surface-fond ;
- des pertes de charges significatives de part et d'autre des scellements de galeries du fait de leur efficacité ;
- des vitesses d'écoulement d'eau (vitesse de pore) dans les galeries plus importantes qu'en situation de référence, en lien avec le caractère « enveloppe » des différents paramètres hydrauliques (perméabilité du Callovo-Oxfordien, gradient de charge hydraulique vertical). La vitesse de pore atteint 10 mm par an dans le revêtement-soutènement des galeries en sortie de quartier de stockage MA-VL (cf. Tableau 9-3), soit cinq fois plus que pour le SEN en situation enveloppe et 30 fois plus que pour le *What-if* en situation de référence. Cette vitesse de pore est sensiblement identique à celle obtenue pour le SEA « Dysfonctionnement des scellements des LSF par l'interface » (cf. Tableau 8-3 du chapitre 8.1.2.1 du présent volume), car le comportement hydraulique du stockage est alors déterminé par la perméabilité des scellements de galerie efficients.

9.1.2.1.2 Le *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau et par l'interface »

L'analyse des résultats présentés au tableau 9-3 et à la figure 9-8 conduit aux constats suivants :

- les évaluations réalisées sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN montrent que l'efficacité des scellements des liaisons surface-fond suffit à limiter les débits d'eau en sortie du stockage. En effet, les débits d'eau en sortie des liaisons surface-fond atteignent un litre par an, valeur similaire à celle obtenue avec tous les scellements efficaces (SEN : un litre par an), ainsi qu'à celle du SEA « Dysfonctionnement des scellements de galeries par l'interface » (un litre par an également) ;
- le dysfonctionnement des scellements de galeries induit une perturbation hydraulique dans les ouvrages souterrains. Les vitesses d'écoulement en sortie de quartier de stockage MA-VL sont égales à celles du SEA « Dysfonctionnement des scellements de galeries par l'interface », mais elles sont significativement supérieures à celles obtenues pour le SEN, d'un facteur 10 environ ;

- sur la base des paramètres de la situation enveloppe du SEN, les débits d'eau en sortie des liaisons surface-fond sont similaires à ceux du SEN, du fait de circulations d'eau favorisées au sein des ouvrages souterrains selon le gradient hydraulique horizontal de l'Oxfordien (écoulements orientés vers le nord, depuis le quartier de stockage MA-VL vers les quartiers de stockage HA). Les vitesses de pores en sortie de quartier de stockage MA-VL sont similaires à celles du SEA « Dysfonctionnement des scellements de galeries par l'interface » (cf. Tableau 8-3 du chapitre 8.1.2.1 du présent volume) et égales à celles du SEN.

9.1.2.1.3 Le *What-if* « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface »

La charge hydraulique de l'Oxfordien sus-jacent se propage depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusqu'aux quartiers et alvéoles de stockage. Ce phénomène est accentué en situation enveloppe (cf. Figure 9-8).

Sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN, le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface conduit à des débits d'eau en sortie des liaisons surface-fond de l'ordre de 3,2 m^3 par an, provenant à la fois de la zone centrale et des quartiers de stockage (essentiellement MA-VL). Ce débit est du même ordre de grandeur que celui du *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des LSF », mais il est significativement plus élevé qu'en SEN (facteur 3 000 environ) et qu'en SEA « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface » (facteur 10 environ). Ce résultat est lié principalement à la perméabilité des scellements des liaisons surface-fond. Les vitesses découlement en sortie du quartier de stockage MA-VL sont 1,5 fois plus élevées que celles obtenues pour le scénario *What-if* « Dysfonctionnement des scellements de galeries ». Les débits d'eau des deux scénarios pour lesquels le scellement des liaisons surface-fond est défaillant étudiés (scellements LSF défaillants seuls et tous scellements défaillants), sont du même ordre de grandeur, ce qui illustre le rôle des scellements des LSF qui pilotent l'hydraulique dans l'architecture souterraine. La légère différence entre les deux scénarios traités est liée à une répartition différente des champs de charges hydrauliques.

Les évaluations réalisées sur la base des paramètres de la situation enveloppe du SEN montrent que la perte de charges induite par l'Oxfordien se propage dans l'ensemble du stockage et engendre un transfert par convection important des solutés depuis les quartiers de stockage vers les liaisons surface-fond. Les débits d'eau provenant de la zone centrale et des quartiers de stockage HA et MA-VL sont ainsi de l'ordre de 45 m^3 par an.

Les résultats montrent que sur le plan hydraulique, le système de stockage présente une certaine robustesse pour la plupart des scénarios *What-if* étudiés. En effet, seuls les scénarios *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond » et « Dysfonctionnement de tous les scellements » (reposant sur les hypothèses « enveloppes » du SEN) engendrent un effet important en propageant la charge hydraulique de l'Oxfordien sus-jacent jusque dans le stockage. L'effet de cette propagation reste néanmoins limité pour ce qui est du transfert des solutés, du fait des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien et de l'architecture borgne du stockage.

Tableau 9-3 *Débits d'eau sortant des liaisons surface-fond (LSF) et vitesses d'écoulement en sortie de quartier de stockage MA-VL pour le SEN et les What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface (hypothèses des situations de référence et enveloppe du SEN)*

Scénario	Débit d'eau sortant des LSF ($L.an^{-1}$)		Vitesse d'écoulement en sortie de quartier de stockage MA-VL ($mm.an^{-1}$)	
	Situation de référence	Situation enveloppe	Situation de référence	Situation enveloppe
SEN (tous scellements efficaces)	1	330	0,1 (revêtement-soutènement) 3 (zone d'interface)	2 (revêtement-soutènement) 70 (zone d'interface)
***What-if* « Dysfonctionnement des scellements des LSF par le noyau et par l'interface »**	3 600	43 000	0,3 (revêtement-soutènement) 10 (zone d'interface)	10 (revêtement-soutènement) 380 (zone d'interface)
***What-if* « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau et par l'interface »**	1	420	1 (revêtement-soutènement) 40 (zone d'interface)	2 (revêtement-soutènement) 70 (zone d'interface)
***What-if* « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface »**	3 200	45 000	1,5 (revêtement-soutènement) 50 (zone d'interface)	15 (revêtement-soutènement) 500 (zone d'interface)

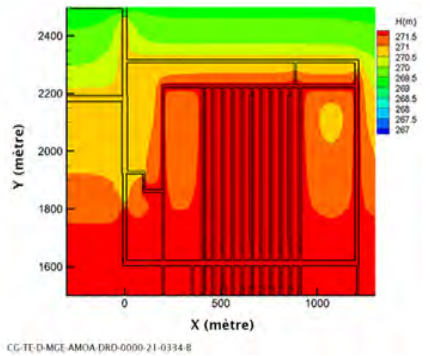
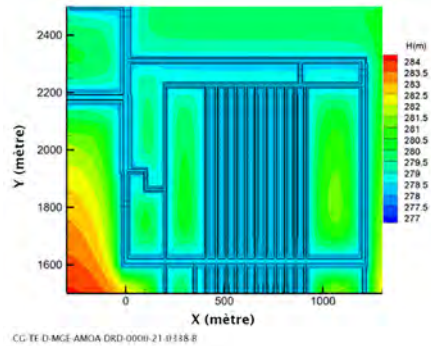
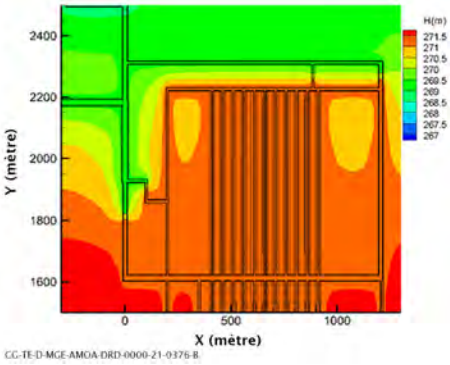
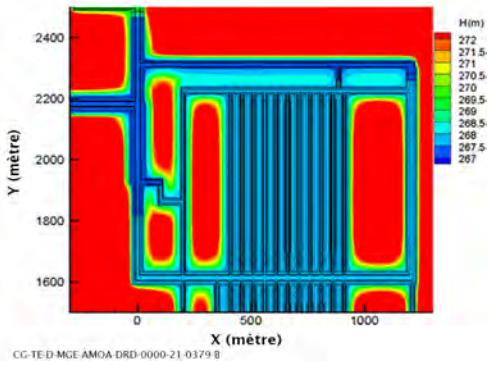
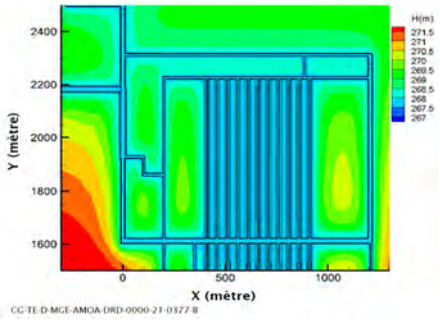
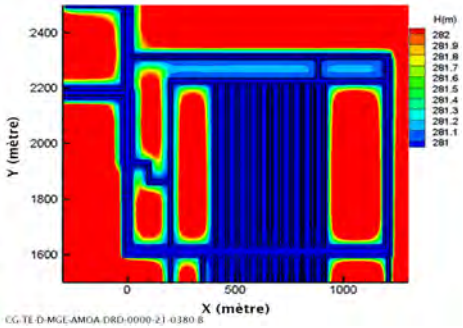
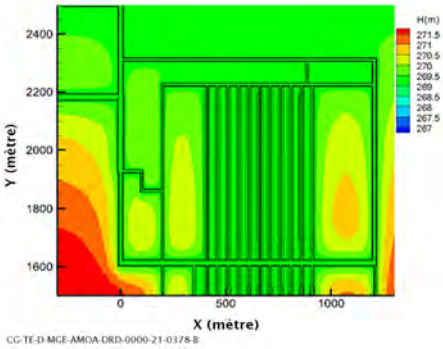
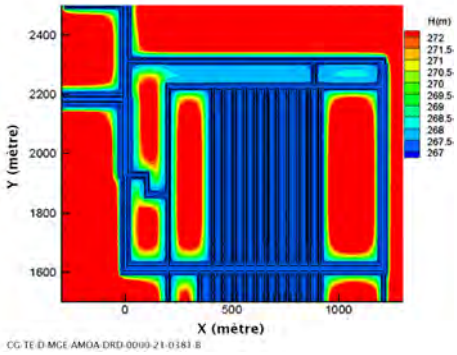
	Situation de référence	Situation enveloppe
SEN (tous scellements efficaces)		
What-if « Dysfonctionnement des scellements des LSF par le noyau et par l'interface »		
What-if « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau et par l'interface »		
What-if « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface »		

Figure 9-8 *SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface, hypothèses de la situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) du SEN - Champs de charges hydrauliques (m) dans le quartier de stockage MA-VL*

9.1.2.2 Les résultats des évaluations des scénarios *What-if* vis-à-vis du transfert des radionucléides

La capacité du stockage et du Callovo-Oxfordien à retarder et atténuer la migration des radionucléides dans les différents scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface (ZFC) est présentée ci-après pour les principaux radionucléides mobiles (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), ainsi que pour les autres radionucléides dont le débit molaire en sortie du Callovo-Oxfordien est supérieur à 10^{-10} mol.an^{-1}.

9.1.2.2.1 Le comportement du stockage et le transfert de l'iode 129

Pour le scénario d'évolution normale (situations de référence et enveloppe), la diffusion est le processus de transfert dominant des radionucléides dans tous les composants du stockage. Le dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface provoque un accroissement des vitesses de transfert par convection dans les ouvrages du stockage et augmente ainsi le transfert des radionucléides depuis les colis jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien par la voie de transfert « ouvrages ».

La figure 9-9 et la figure 9-10 représentent, respectivement pour la situation de référence et la situation enveloppe, les processus de transfert dominants dans les galeries principales, les liaisons surface-fond et au sein du Callovo-Oxfordien, pour chaque scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements étudiés en rappelant les résultats du SEN.

Sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN, le caractère dominant ou non de la convection et de la diffusion varie selon les scénarios *What-if* :

- en cas de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par le noyau et par l'interface, la convection est dominante dans les liaisons surface-fond et la diffusion est dominante dans la zone centrale jusqu'aux quartiers de stockage HA et MA-VL (dans le revêtement-soutènement et le remblai) ;
- en cas de dysfonctionnement des scellements de galeries par le noyau et par l'interface, la diffusion est dominante dans le remblai, il y a codominance diffusion/convection dans le revêtement-soutènement, et la diffusion reste dominante dans les liaisons surface-fond ;
- en cas de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface, la convection est dominante dans les liaisons surface-fond, la diffusion est dominante dans le remblai et il y a codominance diffusion/convection dans le revêtement-soutènement ;
- en outre, la convection est toujours dominante dans la zone d'interface plus perméable à l'extrados des voussoirs (matériau compressible périphérique).

Les résultats sont similaires avec les scénarios *What-if* basés sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN, à l'exception des *What-if* « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par le noyau et par l'interface » et « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface » pour lesquels la convection est dominante dans le revêtement-soutènement des galeries. Pour ces deux scénarios *What-if*, la circulation de l'eau engendre un débit molaire en sortie des liaisons surface-fond plus important et plus précoce.

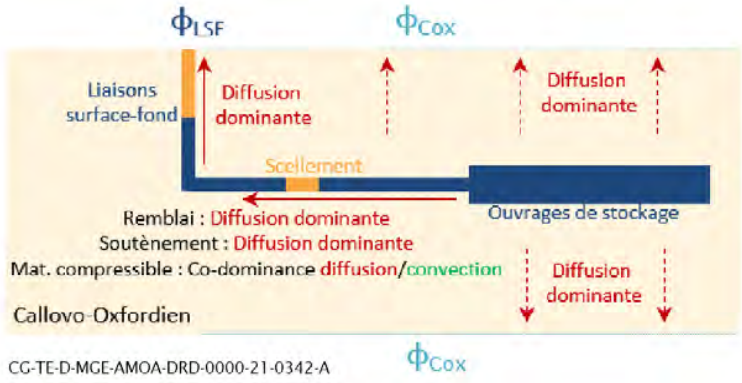
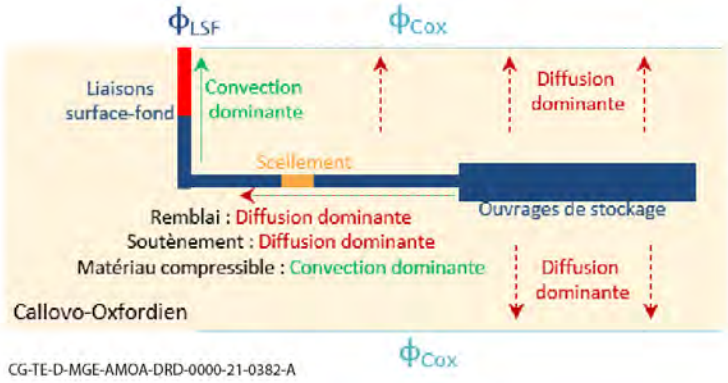
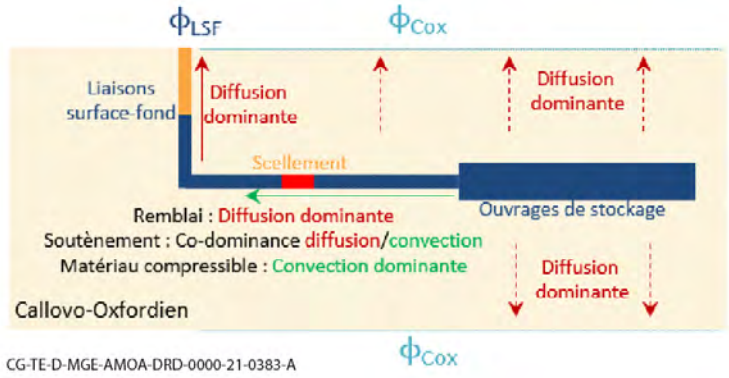
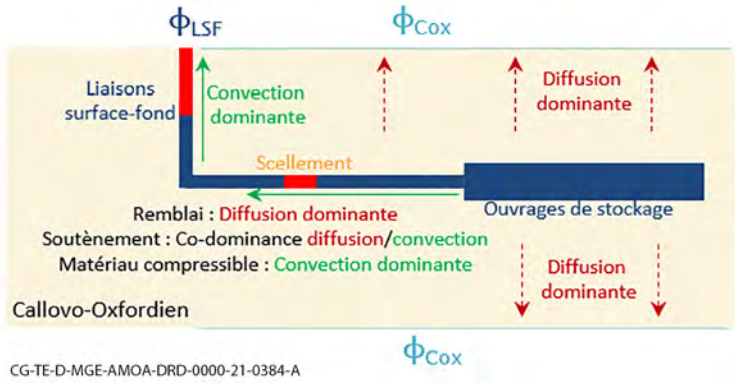
SEN (tous scellements efficaces)	*What-if* « Dysfonctionnement des scellements des LSF par le noyau et par l'interface »
	
What-if « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau et par l'interface »	*What-if* « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface »
	

Figure 9-9 *SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface - situation de référence : représentation schématique des processus de transfert des solutés au sein du stockage et du Callovo-Oxfordien*

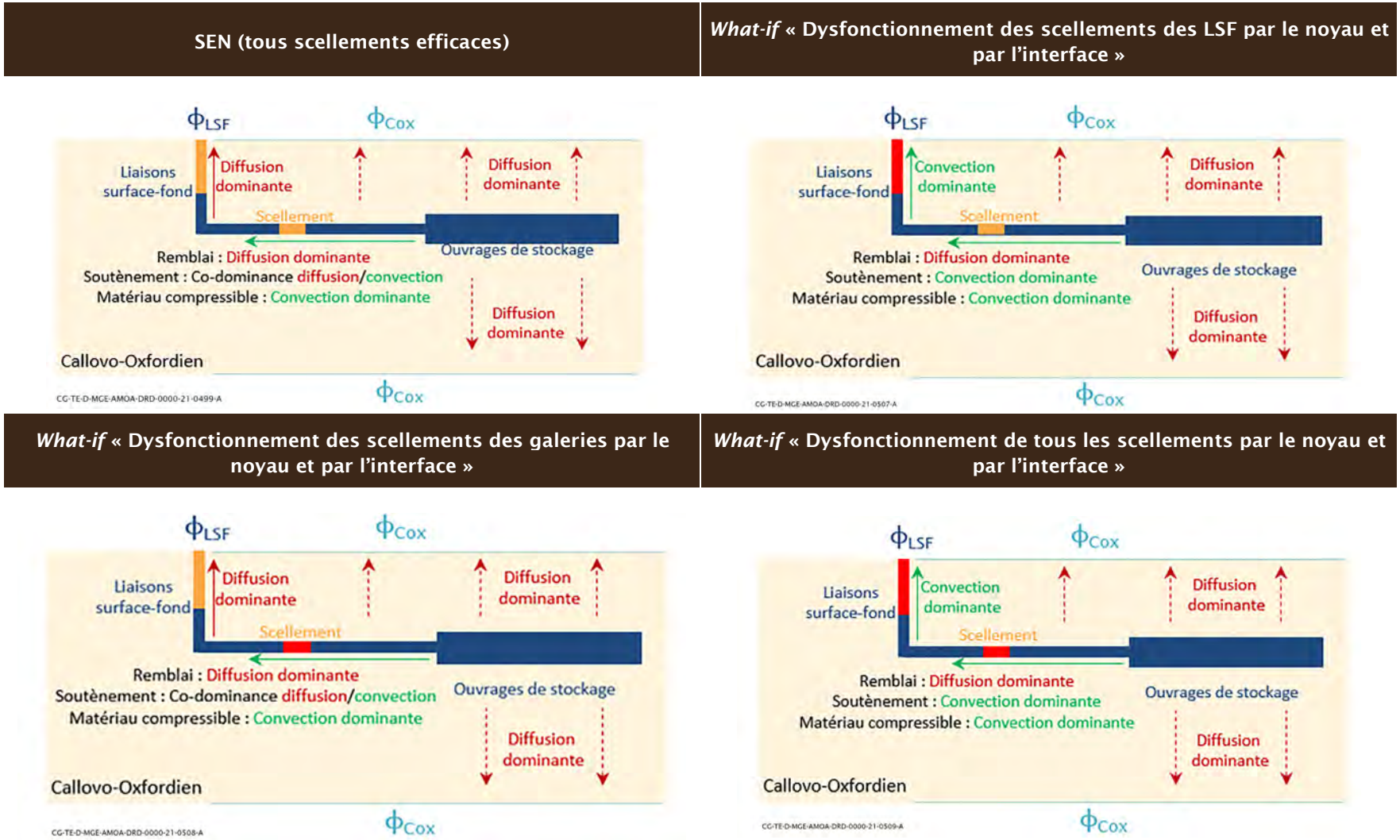


Figure 9-10 *SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface - situation enveloppe : représentation schématique des processus de transfert des solutés au sein du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien*

Le dysfonctionnement des scellements est susceptible d'augmenter et d'accélérer le transfert des radionucléides par la voie ouvrages. Pour évaluer cet effet, les proportions d'iode 129 (en pourcentage de l'inventaire total initial) qui empruntent la voie de transfert par les ouvrages et la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien sont comparées dans le tableau 9-4.

La figure 9-11 ci-après montre, pour le *What-if* « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface », l'atténuation du niveau de débit molaire maximal depuis la sortie des alvéoles MA-VL jusqu'aux liaisons surface-fond.

L'ensemble des résultats d'évaluation des *What-if* mettent en exergue les éléments d'analyse suivants :

- la configuration de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond ou de tous les scellements par le noyau et par l'interface implique, en situation enveloppe uniquement, une voie de transfert par les ouvrages du même ordre que celle par la couche du Callovo-Oxfordien pendant une centaine de milliers d'années ;
- la proportion de l'inventaire total initial en iode 129 sortant des liaisons surface-fond est ainsi augmentée mais elle reste inférieure à celle de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, d'un facteur 10 environ pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et d'un facteur 1,3 pour celui basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN. Ainsi, environ 1 % de l'inventaire total initial en iode 129 sort du Callovo-Oxfordien par les liaisons surface-fond pour le *What-if* basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN et environ 24 % pour le *What-if* basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN ;
- avec les paramètres de la situation de référence du SEN, la date d'occurrence du maximum de débit molaire en sortie des liaisons surface-fond se situe à quelques centaines de milliers d'années. Elle est plus précoce que celle en situation de référence du SEN qui est largement supérieure au million d'années. Cependant, du fait d'un transfert convectif qui reste limité, le débit molaire en iode 129 est fortement atténué dans le stockage (atténuation d'un facteur 100 du débit molaire maximum entre l'entrée des galeries MA-VL et la sortie des liaisons surface-fond) ;
- avec les paramètres de la situation enveloppe du SEN, les vitesses de transfert par convection des radionucléides au sein des galeries sont plus élevées et limitent les échanges (par diffusion) avec la couche du Callovo-Oxfordien. Cette limitation est toutefois relative car le facteur d'atténuation du débit molaire entre l'entrée des galeries MA-VL et la sortie des liaisons-surface-fond est d'un facteur 20 environ. La date d'occurrence du débit molaire maximum en sortie des liaisons-surface-fond est plus courte (environ 50 000 ans) que celle obtenue pour le scénario *What-if* basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN.

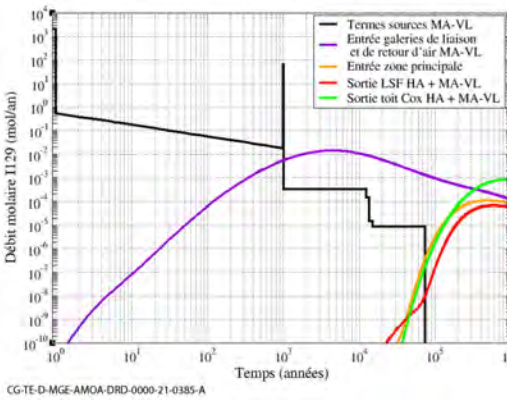
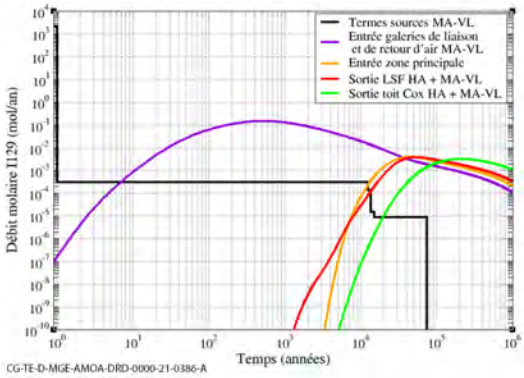
	Quartier de stockage MA-VL	
	Situation de référence	Situation enveloppe
What-if « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface »		

Figure 9-11 *What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface : historiques des débits molaires d'iode 129 entrant dans les galeries de liaison et de retour d'air et dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

Le tableau 9-4 montre que l'iode 129 entrant dans la zone centrale provient essentiellement du quartier de stockage MA-VL. En effet, de par son positionnement en « amont hydraulique » par rapport à la base des liaisons surface-fond, les quantités d'iode 129 sortant des alvéoles MA-VL par les galeries de liaison et de retour d'air sont plus sensibles au dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface. Ainsi, la quantité d'iode 129 issue du quartier de stockage MA-VL et parvenant à la zone centrale est augmentée, par rapport au SEN (i) d'au moins trois ordres de grandeur en situation de référence en cas de dysfonctionnement des seuls scellements de galeries ou de tous les scellements, et (ii) d'environ un ordre de grandeur en situation enveloppe en cas de dysfonctionnement des seuls scellements des liaisons surface-fond ou de tous les scellements. Pour les trois scénarios *What-if* étudiés, la quantité cumulée d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond est inférieure à celle traversant la couche du Callovo-Oxfordien.

Tableau 9-4 *SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface – situations de référence et enveloppe : bilans des quantités d'iode 129 (cumulées sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial respectif en HA et en MA-VL, puis par rapport à l'inventaire total initial HA + MA-VL) entrant dans les galeries d'accès, dans les galeries de liaison, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

		Quantité d'iode 129 (en % de l'inventaire total initial respectif de chaque zone, puis de l'inventaire total initial HA + MA-VL)							
		Situation de référence				Situation enveloppe			
		SEN	*What-if* scellements LSF	*What-if* scellements galeries	*What-if* tous scellements	SEN	*What-if* scellements LSF	*What-if* scellements galeries	*What-if* tous scellements
HA	Entrée dans les galeries d'accès	3,3 %	4,3 %	3,9 %	3,7 %	5,9 %	14,8 %	6,3 %	19,9 %
HA	Entrée dans les galeries de liaison	0,1 %	0,2 %	0,06 %	0,05 %	0,05 %	6,6 %	0,2 %	12,0 %
HA	Entrée dans la zone centrale	$<10^{-3}$ %	2×10^{-3} %	2×10^{-4} %	5×10^{-5} %	$<4 \times 10^{-6}$ %	5,1 %	$<10^{-3}$ %	10,1 %
MA-VL	Entrée dans les galeries de liaison et retour d'air	15,3 %	16,9 %	24,3 %	27,2 %	32,0 %	54,7 %	23,9 %	56,8 %
MA-VL	Entrée dans la zone centrale	$<10^{-3}$ %	0,02 %	2,4 %	3,5 %	3,6 %	34,7 %	2,7 %	41,1 %
HA + MA-VL	Sortie des liaisons surface-fond	$<10^{-5}$ %	$<4 \times 10^{-3}$ %	$<3 \times 10^{-3}$ %	1 %	0,02 %	18,6 %	0,13 %	24,3 %
HA + MA-VL	Sortie au toit du Callovo-Oxfordien	10,5 %	10,5 %	10,5 %	10,4 %	42,6 %	34,7 %	42,6 %	32,3 %

La figure 9-12 présente les historiques des débits molaires d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien au droit du stockage pour le SEN (tous scellements efficaces) et les *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface.

Le tableau 9-5 présente les quantités d'iode 129, cumulées sur un million d'années, qui traversent les ouvrages souterrains et atteignent le toit du Callovo-Oxfordien par la voie ouvrages ou par la couche du Callovo-Oxfordien.

L'analyse des résultats selon les hypothèses prises en compte (situation de référence ou situation enveloppe du SEN) conduit aux remarques suivantes :

- sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN, l'iode 129 issue des quartiers de stockage HA transite principalement par la couche du Callovo-Oxfordien, moins de 0,002 % de l'inventaire initial atteint la zone centrale ;
- sur la base des paramètres de la situation enveloppe du SEN, le dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond induit des écoulements d'eau orientés depuis les quartiers de stockage HA vers les liaisons surface-fond et un transfert convectif associé de l'iode 129 qui concerne environ 5 % de l'inventaire initial des quartiers de stockage HA avec des scellements de galeries efficaces et environ 10 % en cas de dysfonctionnement de tous les scellements ;
- le dysfonctionnement de tous les scellements conduit à un transfert significatif de l'iode 129 par la voie ouvrages : environ 1 % de l'inventaire total initial en iode 129 sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN et environ 24 % de l'inventaire total initial en iode 129 sur la base des paramètres de la situation enveloppe du SEN ;
- la quantité d'iode 129 qui migre par la couche du Callovo-Oxfordien est peu affectée par le dysfonctionnement des scellements en situation de référence. En situation enveloppe, la quantité d'iode 129 qui transite par les ouvrages diminue significativement la quantité d'iode 129 migrant par la couche du Callovo-Oxfordien mais ce dernier reste majoritaire ;
- le transfert par les ouvrages se différencie de celui par la couche du Callovo-Oxfordien par une date d'occurrence du débit maximal plus précoce (cf. Figure 9-11 et figure 9-12) ;
- en raison du gradient de charge dans l'Oxfordien favorable à la circulation d'eau vers le nord du stockage, le dysfonctionnement des scellements accroît le transfert convectif de l'iode 129 depuis le quartier de stockage MA-VL vers la zone centrale, soit en termes de quantité, de 0,02 % à 3,5 % sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN et de 2,7 % à 41 % sur la base des paramètres de la situation enveloppe du SEN.

Les évaluations réalisées pour les scénarios *What-if* basés sur les paramètres de la situation de référence du SEN montrent que :

- le maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond est inférieur à celui par la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, d'environ un ordre de grandeur en cas de dysfonctionnement de tous les scellements et d'au moins trois ordres de grandeur en cas de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond ou des galeries.

Les évaluations réalisées pour les scénarios *What-if* basés sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN montrent que :

- le scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond conduit :
  - ✓ à un débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond supérieur à celui en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien pendant environ 100 000 ans ;
  - ✓ à un maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond inférieur à celui en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien d'un facteur 1,4 ;
- le scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements de galeries conduit :
  - ✓ à un débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond inférieur d'au moins deux ordres de grandeur à celui en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien sur toute la durée de simulation ;

- le scénario *What-if* de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements conduit :
  - ✓ à un débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond supérieur à celui en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien pendant environ 100 000 ans ;
  - ✓ à un maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond supérieur à celui en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien d'un facteur 1,7 ;
  - ✓ une date d'occurrence de ce maximum atteinte vers 50 000 ans.

Pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements de galeries, le maximum de débit molaire d'iode 129 sortant au toit du Callovo-Oxfordien par la voie ouvrages reste largement inférieur à celui sortant de la couche du Callovo-Oxfordien.

Seuls les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond ou de dysfonctionnement de tous les scellements, considérant les hypothèses « conservatives » de la situation enveloppe du SEN, conduisent à un débit molaire maximum d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond, du même ordre ou légèrement supérieur (facteur 2) à celui sortant de la couche du Callovo-Oxfordien, et à une date d'occurrence avancée d'environ 100 000 ans à 150 000 ans par rapport à celle du débit molaire maximum en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien.

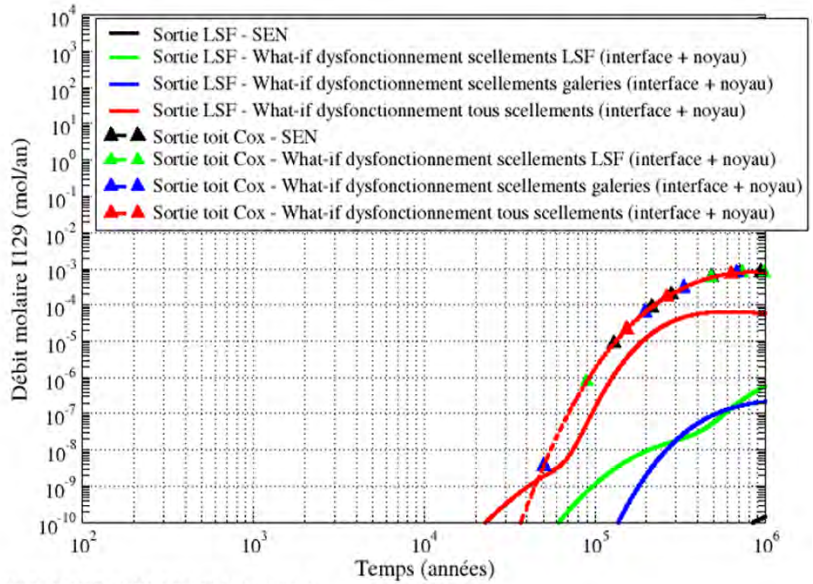
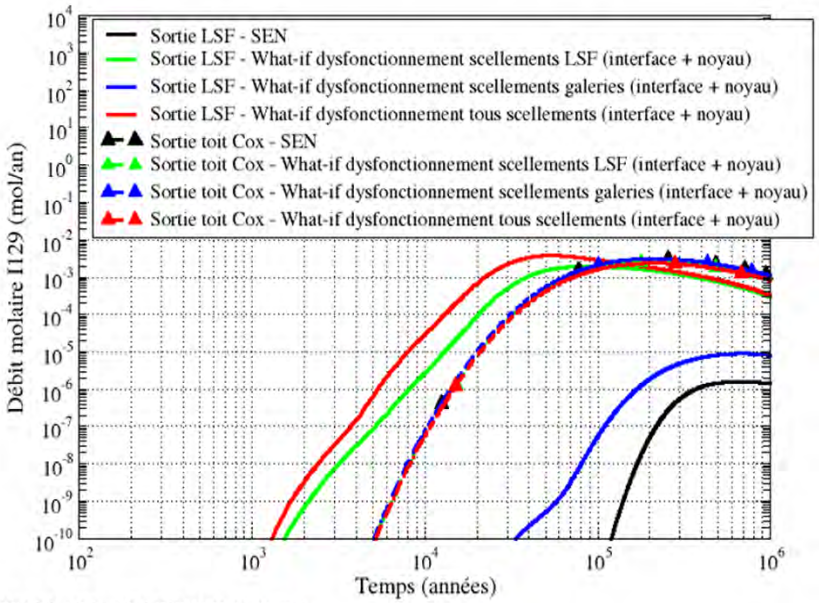
		Situation de référence	Situation enveloppe
Iode 129	*What-if* « Dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface »		

Figure 9-12 *SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

Tableau 9-5 *SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface - situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : débits molaires maximum d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien, dates d'occurrence de ces maxima et rapport entre les maximas par la voie « ouvrages » et par la voie « couche du Callovo-Oxfordien »*

		Débits molaires maximum d'iode 129							
		Situation de référence				Situation enveloppe			
		SEN	*What-if* scellements LSF	*What-if* scellements galeries	*What-if* tous scellements	SEN	*What-if* scellements LSF	*What-if* scellements galeries	*What-if* tous scellements
Transfert par la couche du Callovo-Oxfordien	Débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien (10^{-6} mol.an^{-1})	800	800	800	800	3 200	2 600	3 200	2 400
	Date d'occurrence (en milliers d'années)	850	850	850	850	210	210	210	210
Transfert par la voie « ouvrages »	Débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien (10^{-6} mol.an^{-1})	2×10^{-4}	0,6	0,2	65	1,6	1 900	10	3 800
	Date d'occurrence (en milliers d'années)	>1000	>1000	>1000	600	670	86	690	50
Rapport des maxima de débit molaire voie « couche du Callovo-Oxfordien »/voie « ouvrages »		4×10^{6}	1 300	4 000	12	2 000	1,4	320	0,6

9.1.2.2.2 Le transfert du chlore 36

Le transfert du chlore 36 par la voie ouvrages et par la couche du Callovo-Oxfordien est présentée à la figure 9-13.

Globalement, les résultats montrent un comportement similaire à celui de l'iode 129, avec des ordres de grandeur différents.

Ainsi, les résultats associés au scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface, basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN, montrent :

- un débit molaire de chlore 36 en sortie des liaisons surface-fond supérieur à celui en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien pendant environ 15 000 ans ;
- puis à un maximum de débit molaire de chlore 36 en sortie des liaisons surface-fond inférieur à celui en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien d'environ un facteur 4 ;
- une date d'occurrence de ce maximum vers 70 000 ans.

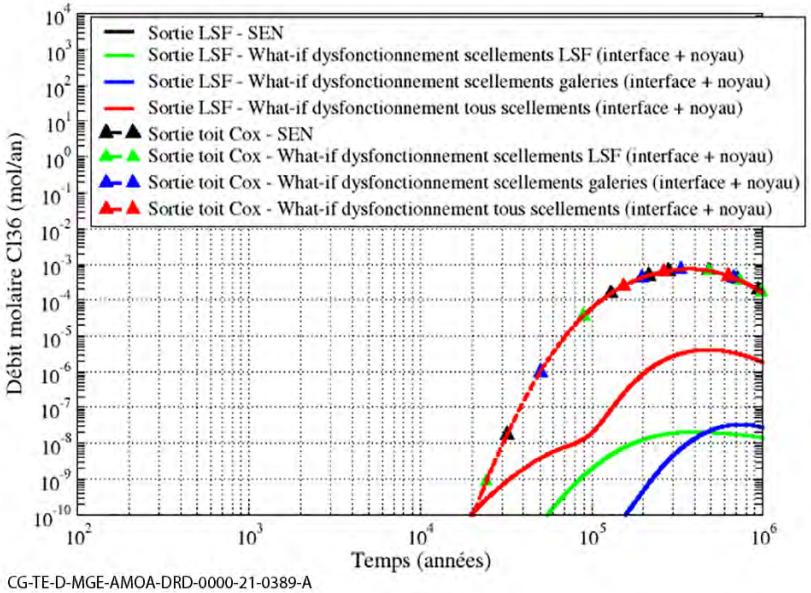
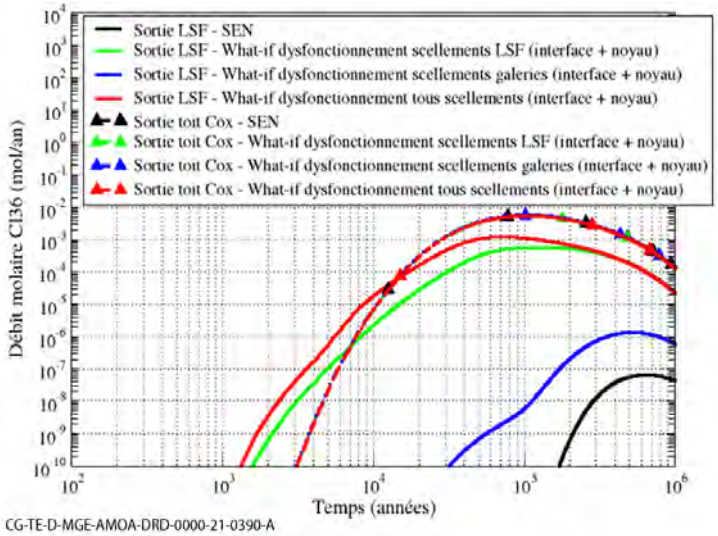
		Situation de référence	Situation enveloppe
Chlore 36	*What-if* « Dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface »		

Figure 9-13 *SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires de chlore 36 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

9.1.2.2.3 Le transfert du sélénium 79

Le transfert du sélénium 79 par la voie ouvrages et par la couche du Callovo-Oxfordien est présentée à la figure 9-14.

Globalement, les résultats montrent un comportement similaire à celui de l'iode 129, avec des ordres de grandeur différents.

Ainsi, les résultats associés au scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface, basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN, montrent :

- un débit molaire de sélénium 79 en sortie des liaisons surface-fond supérieur à celui en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien pendant environ 60 000 ans ;
- puis à un maximum de débit molaire de sélénium 79 en sortie des liaisons surface-fond inférieur à celui en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien d'environ un facteur 4 ;
- une date d'occurrence de ce maximum vers 200 000 ans.

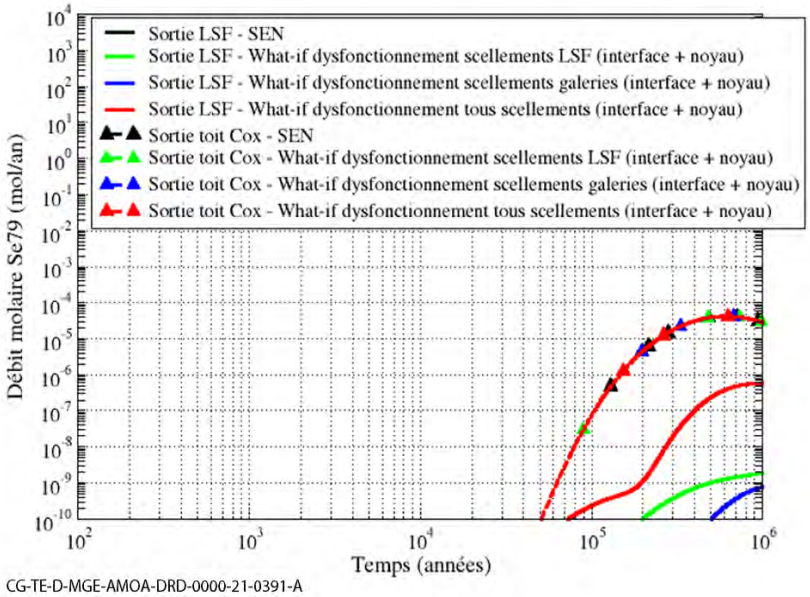
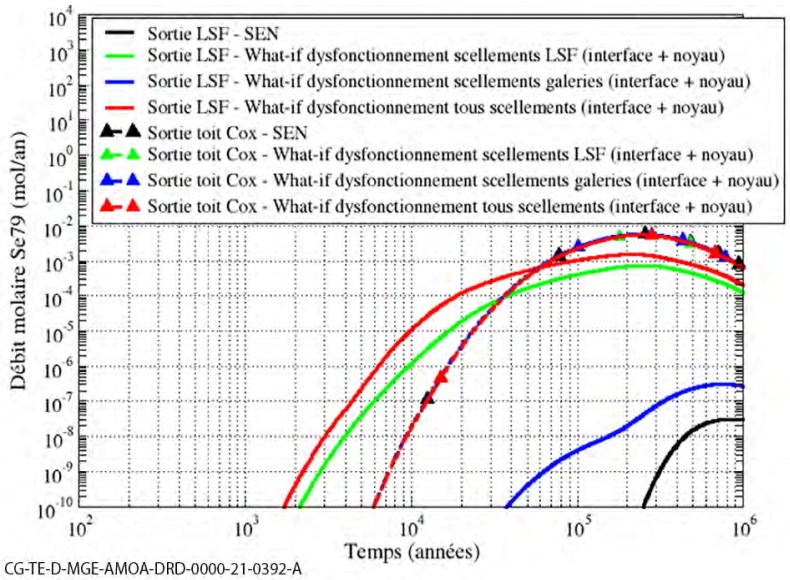
		Situation de référence	Situation enveloppe
Sélénium 79	*What-if* « Dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface»		

Figure 9-14 *SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires de sélénium 79 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

9.1.2.2.4 Le transfert des autres radionucléides

Les historiques de débit molaire au toit de la couche du Callovo-Oxfordien obtenus pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface sont tracés à la figure 9-15.

En plus de l'iode 129, du chlore 36 et du sélénium 79, les principaux radionucléides dont le débit molaire excède 10^{-10} mol.an^{-1} en scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface sont :

- sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN : le potassium 40 et le rubidium 87, cations à vie longue sorbés dans le Callovo-Oxfordien, le calcium 41, cation de période intermédiaire sorbé dans le Callovo-Oxfordien, et le carbone 14 organique, mobile et de période plus courte que les autres radionucléides qui contribuent à l'impact ;
- sur la base des paramètres de la situation enveloppe du SEN : le potassium 40 et le calcium 41, faiblement sorbés dans les ouvrages cimentaires et dans le Callovo-Oxfordien, le rubidium 87 et le césium 135, sorbés dans le Callovo-Oxfordien, le carbone 14 organique et le molybdène 93, mobiles à vie moyenne, les principaux isotopes de l'uranium (uranium 238, uranium 235 et uranium 236) ainsi que le manganèse 53 et le fer 60, moins sorbés dans le Callovo-Oxfordien pour cette situation.

En considérant les paramètres de la situation de référence du SEN, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien est prépondérante sur la voie de transfert par les ouvrages pour l'ensemble des radionucléides. Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, et par comparaison au SEN, les occurrences de débit molaire instantané à 10^{-10} mol.an^{-1} du scénario *What-if* sont très légèrement plus précoces pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79 ; néanmoins, comme pour le scénario SEA, les niveaux et maxima de débit molaire étant pilotés par la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, ceux-ci sont similaires à ceux obtenus pour le SEN.

En considérant les paramètres de la situation enveloppe du SEN, la voie de transfert par les ouvrages est au plus du même ordre de grandeur que la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien pour les principaux radionucléides. Au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, et par comparaison au SEN, les occurrences de débit molaire instantané à 10^{-10} mol.an^{-1} du scénario *What-if* sont plus précoces notamment pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79, et la contribution de certains radionucléides comme le carbone 14 organique ou le molybdène 93 apparaît, mais à des niveaux faibles.

Plus particulièrement, le transfert des radionucléides peu à très peu mobiles n'est pas modifié par le dysfonctionnement des scellements du fait de leur sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien. En effet, la sorption favorise les échanges de masse entre les ouvrages souterrains (alvéoles de stockage, galeries) et la couche du Callovo-Oxfordien, et permet ainsi à ces radionucléides d'être retenus dans les premiers mètres de la couche du Callovo-Oxfordien tout comme en SEN, soit autour des alvéoles de stockage comme l'illustre la figure 6-10 du chapitre 6.2.1.3 du présent volume, soit autour des galeries pour les radionucléides qui auraient pu migrer dans les premiers mètres de galeries.

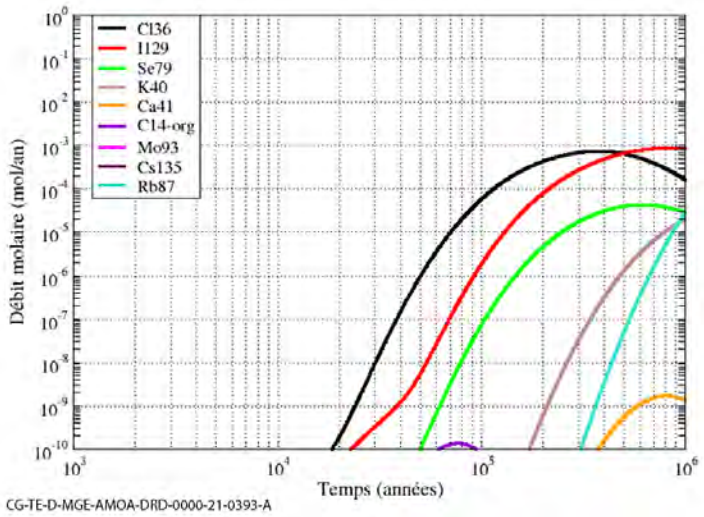
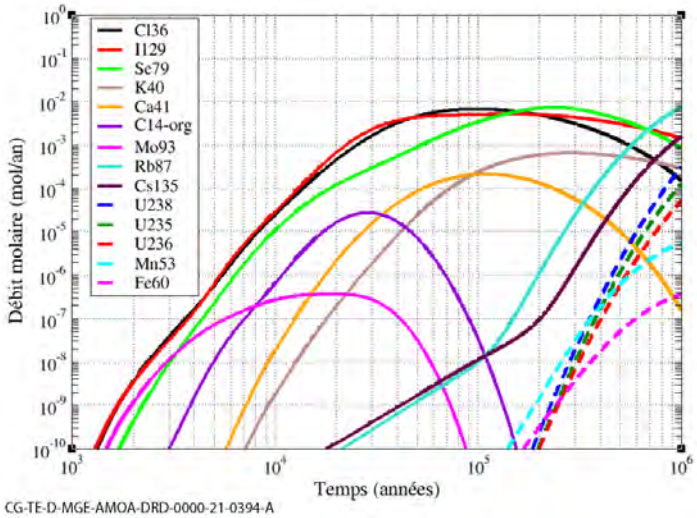
	Situation de référence	Situation enveloppe
What-if « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface »		

Figure 9-15 *What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface - situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires des principaux radionucléides dont le débit molaire instantané au toit de la couche du Callovo-Oxfordien excède 10^{-10} mol.an^{-1}*

9.1.2.3 Le transfert des radionucléides dans le milieu géologique jusqu'aux exutoires et l'évaluation de l'incidence radiologique associée

Conformément à la démarche présentée au chapitre 1 du présent volume, l'évaluation du transfert des radionucléides dans les encaissants supérieurs, et des incidences radiologiques associées, est menée uniquement dans le cas où les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, obtenus pour les scénarios de dysfonctionnement des scellements, sont significativement supérieurs à ceux obtenus en SEN.

Les exutoires d'intérêt concernés par les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface susceptibles de modifier la voie de transfert par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond), sont les exutoires des encaissants supérieurs[99] par lesquels peuvent transiter les radionucléides les plus mobiles :

- l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour la situation de référence ;
- les exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » pour la situation enveloppe[100].

9.1.2.3.1 Le cas des *What-if* basés sur les paramètres de la situation de référence du SEN

Comme analysé au chapitre 9.1.2.2 du présent volume, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien est prépondérante par rapport à celle par les ouvrages pour l'ensemble des radionucléides. Les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien sont similaires à ceux obtenus pour le SEN.

En conséquence, les débits molaires des radionucléides traversant les encaissants sus-jacents et les historiques de doses associés à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » sont identiques à ceux présentés pour le SEN en situation de référence (cf. Chapitre 6.2 du présent volume), soit des valeurs maximales du cumul de dose annuelle en biosphère chaude inférieures à 2×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'adulte, 3×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans et 5×10^{-4} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an (cf. Tableau 6-4 du chapitre 6.2.2 du présent volume).

9.1.2.3.2 Le cas des *What-if* basés sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN

Le transfert dans le milieu géologique et l'incidence radiologique potentielle tiennent compte des deux voies de migration :

- la voie de transfert par les ouvrages, affectée par le dysfonctionnement des scellements ;
- la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien.

a) Le transfert des radionucléides dans les encaissants supérieurs jusqu'aux exutoires

Comme analysé au chapitre 9.1.2.2 du présent volume, la voie de transfert par les ouvrages est au plus du même ordre de grandeur que celle par la couche du Callovo-Oxfordien pour les principaux radionucléides. Les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien sont similaires à ceux obtenus pour le SEN.

---

[99] L'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », relatif aux encaissants inférieurs ou sous-jacents, n'est de fait pas concerné par les scénarios de dysfonctionnement des scellements.

[100] L'exutoire « Rivière Ornain » n'est pas un exutoire d'intérêt pour ces scénarios *What-if*, compte tenu des faibles incidences radiologiques obtenues en SEN comparativement aux autres exutoires (cf. Chapitre 6.3 du présent volume).

En conséquence, les débits molaires des radionucléides traversant les encaissants sus-jacents et les historiques de doses associés à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » sont quasiment similaires à ceux présentés pour le SEN en situation enveloppe (cf. Chapitre 6.3 du présent volume).

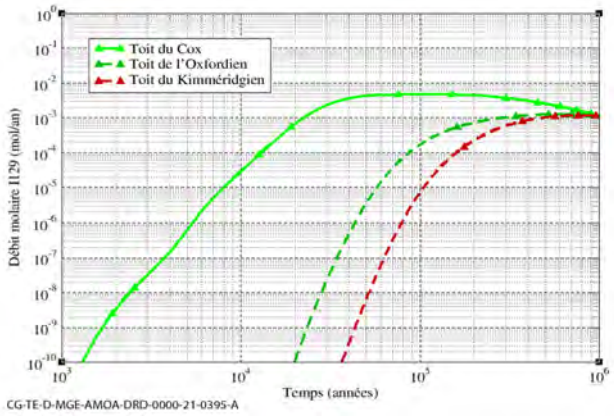
Plus précisément, la figure 9-16 présente les débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 en sortie au toit du Callovo-Oxfordien, au toit de l'Oxfordien, puis au toit du Kimméridgien à l'exutoire du Barrois, dans le cas d'un stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien (cf. « cas 1 » défini à la figure 5-48 du chapitre 5.3.7 du présent volume, maximisant les transferts ascendants verticaux des radionucléides vers le Barrois). Par rapport aux résultats du SEN (cf. Chapitre 6.2.3.1.2 du présent volume, le maximum de débit molaire au toit du Kimméridgien est respectivement augmenté d'environ 35 % pour l'iode 129, 20 % pour le chlore 36 et 25 % pour le sélénium 79.

De la même façon, les historiques de doses associés à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » sont quasiment similaires à ceux présentés pour le SEN en situation enveloppe (cf. Chapitre 6.3 du présent volume).

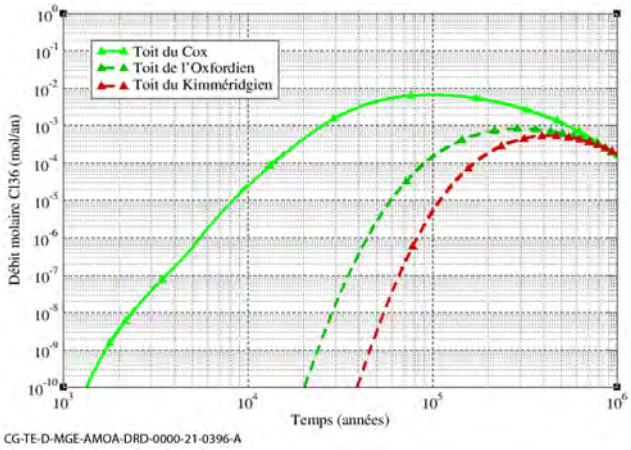
La figure 9-17 présente les débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 au niveau de la zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien et au niveau de l'Ornain dans le cas d'un stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien (cf. « Cas 2 » défini à la figure 5-48 du chapitre 5.3.7 du présent volume maximisant les transferts horizontaux des radionucléides dans la partie transmissive de l'Oxfordien). Par rapport aux résultats du SEN (cf. Chapitre 6.3.1.3 du présent volume, le maximum de débit molaire au niveau de la zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien est respectivement augmenté d'environ 40 % pour l'iode 129 et 25 % pour le chlore 36 et pour le sélénium 79.

Situation enveloppe :
« Stockage haut » implanté à 50 m du toit du Callovo-Oxfordien

Iode 129



Chlore 36



Sélénium 79

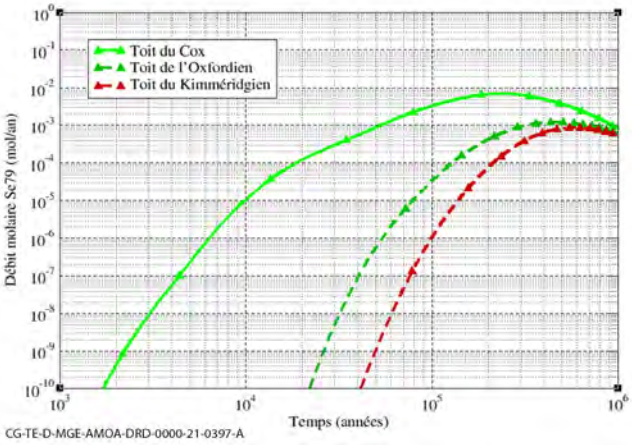


Figure 9-16 *What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire « Barrois » (cas 1)*** *: historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusqu'aux toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien*

Situation enveloppe :
« Stockage haut » implanté à 50 m du toit du Callovo-Oxfordien

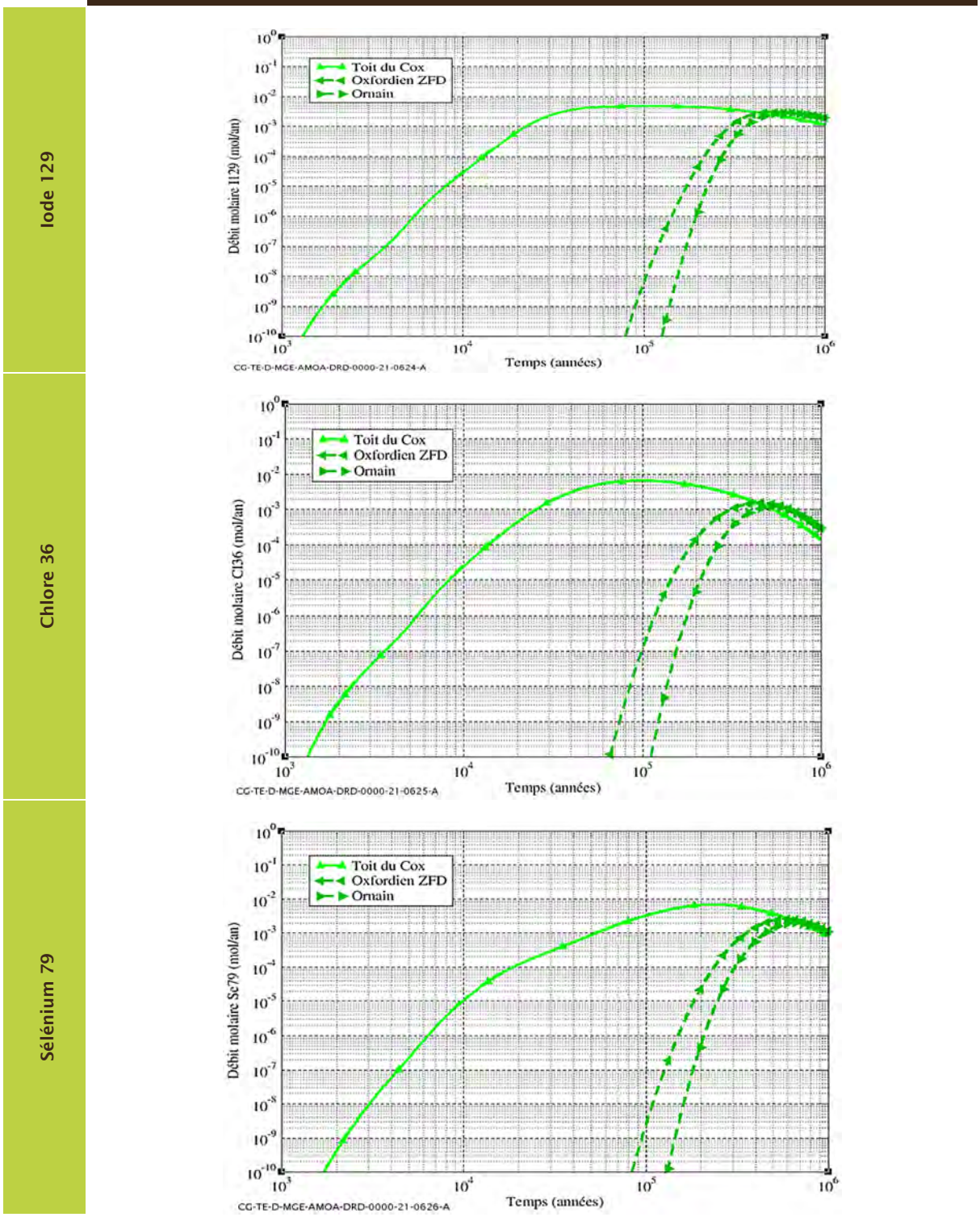


Figure 9-17 *What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoires « Oxfordien » et « Ornain » (cas 2)*** *: historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires Oxfordien et Ornain*

b) L'incidence sur la santé de l'homme

En lien avec l'augmentation des débits molaires au toit du Kimméridgien présentée précédemment, les doses maximales des trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36, sélénium 79) à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », présentées dans le tableau 9-7 pour le groupe de référence « multi-activités », les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an) et les trois types de biosphère (tempérée, chaude, froide), sont augmentées d'environ 20 % à 35 % selon le radionucléide. Pour cet exutoire, l'ensemble des résultats montre que :

- les incidences radiologiques relatives aux biosphères tempérée et chaude, exprimées en termes de doses, restent principalement pilotées par le sélénium 79, et par le chlore 36 dans une moindre mesure. Les valeurs maximales de dose, obtenues pour une biosphère chaude, sont de l'ordre de 2×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'adulte, 6×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans, et 8×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an ;
- les incidences radiologiques relatives à la biosphère froide (classe d'âge adulte) sont inférieures d'environ 45 % à celles obtenues avec la biosphère tempérée (classe d'âge adulte).

En lien avec l'augmentation des débits molaires au niveau de la zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien présentée précédemment, les doses maximales des trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36, sélénium 79) à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) », présentées dans le tableau 9-8 pour le groupe de référence « multi-activités », les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an) et les trois types de biosphère (tempérée, chaude, froide), sont augmentées d'environ 25 % à 40 % selon le radionucléide. Pour cet exutoire, l'ensemble des résultats montre que :

- les incidences radiologiques relatives aux biosphères tempérée et chaude, exprimées en termes de doses, restent pilotées par le sélénium 79. Les valeurs maximales de dose, obtenues pour une biosphère chaude, sont de l'ordre de 7×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'adulte, $2{,}5 \times 10^{-1}$ mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans, et 3×10^{-1} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an ;
- les incidences radiologiques relatives à la biosphère froide (classe d'âge adulte) sont inférieures d'environ 45 % à celles obtenues avec la biosphère tempérée (classe d'âge adulte).

In fine, les niveaux de dose obtenus pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau argileux et par l'interface, restent très inférieurs aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes (cf. Chapitre 1.3 du présent volume).

Tableau 9-6 *SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface - situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : débits molaires maximum d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien, dates d'occurrence de ces maxima et rapport entre les maximas par la voie « ouvrages » et par la voie « couche du Callovo-Oxfordien »*

		Débits molaires maxima d'iode 129 et dates d'occurrence							
		Situation de référence				Situation enveloppe			
		SEN	What-if scellements LSF	What-if scellements galeries	What-if tous scellements	SEN	What-if scellements LSF	What-if scellements galeries	What-if tous scellements
Transfert par la couche du Callovo-Oxfordien	Débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien (10^{-6} mol.an^{-1})	800	800	800	800	3 200	2 600	3 200	2 400
	Date d'occurrence (en milliers d'années)	850	850	850	850	210	210	210	210
Transfert par la voie « ouvrages »	Débit molaire maximum au toit du Callovo-Oxfordien (10^{-6} mol.an^{-1})	2×10^{-4}	0,6	0,2	65	1,6	1 900	10	3 800
	Date d'occurrence (en milliers d'années)	>1 000	>1 000	>1 000	600	670	86	690	50
Rapport des maxima de débit molaire voie « couche du Callovo-Oxfordien »/voie « ouvrages »		4×10^{6}	1 300	4 000	12	2 000	1,4	320	0,6

Tableau 9-7 *What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Barrois (cas 1)*** *: doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée, chaude et froide, et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

		Exutoire « Pompage au Barrois » (150 L.min^{-1})					
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités »					
		Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère froide	
	Radionucléide	Dose maximale (mSv.an^{-1})	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv.an^{-1})	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv.an^{-1})	Date de dose maximale (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	$4,5 \times 10^{-3}$	430	$5,1 \times 10^{-3}$	430	$3,5 \times 10^{-3}$	430
	^{129}I	$8,3 \times 10^{-4}$	780	$1,0 \times 10^{-3}$	780	$8,0 \times 10^{-4}$	780
	^{79}Se	$1,3 \times 10^{-2}$	590	$1,4 \times 10^{-2}$	590	$6,5 \times 10^{-3}$	590
	Cumul	$1,8 \times 10^{-2}$	550	$1,9 \times 10^{-2}$	550	$1,0 \times 10^{-2}$	540
Enfant 10 ans	^{36}Cl	$7,7 \times 10^{-3}$	430	$8,5 \times 10^{-3}$	430		
	^{129}I	$1,4 \times 10^{-3}$	780	$1,8 \times 10^{-3}$	780		
	^{79}Se	$4,8 \times 10^{-2}$	590	$5,1 \times 10^{-2}$	590		
	Cumul	$5,6 \times 10^{-2}$	570	$6,0 \times 10^{-2}$	580		
Enfant 1 an	^{36}Cl	$1,5 \times 10^{-2}$	430	$1,8 \times 10^{-2}$	430		
	^{129}I	$9,2 \times 10^{-4}$	780	$1,3 \times 10^{-3}$	780		
	^{79}Se	$5,5 \times 10^{-2}$	590	$6,2 \times 10^{-2}$	590		
	Cumul	$6,9 \times 10^{-2}$	550	$7,9 \times 10^{-2}$	560		

Tableau 9-8 *What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres),* ***exutoire Oxfordien (cas 2)****: doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée, chaude et froide, et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

		Exutoire « Pompage à l'Oxfordien » (100 L.min-1)					
		Groupe de référence hypothétique « multi-activités »					
		Biosphère tempérée		Biosphère chaude		Biosphère froide	
	Radionucléide	Dose maximale (mSv.an^{-1})	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv.an^{-1})	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv.an^{-1})	Date de dose maximale (milliers d'années)
Adulte	^{36}Cl	$4,0 \times 10^{-3}$	460	$4,4 \times 10^{-3}$	460	$3,9 \times 10^{-3}$	460
	^{129}I	$3,4 \times 10^{-3}$	540	$4,2 \times 10^{-3}$	540	$3,3 \times 10^{-3}$	540
	^{79}Se	$5,9 \times 10^{-2}$	590	$6,3 \times 10^{-2}$	590	$3,0 \times 10^{-2}$	590
	Cumul	$6,6 \times 10^{-2}$	590	$7,1 \times 10^{-2}$	590	$3,6 \times 10^{-2}$	580
Enfant 10 ans	^{36}Cl	$7,2 \times 10^{-3}$	460	$7,9 \times 10^{-3}$	460		
	^{129}I	$5,8 \times 10^{-3}$	540	$7,2 \times 10^{-3}$	540		
	^{79}Se	$2,2 \times 10^{-1}$	590	$2,3 \times 10^{-1}$	590		
	Cumul	$2,3 \times 10^{-1}$	590	$2,5 \times 10^{-1}$	590		
Enfant 1 an	^{36}Cl	$1,4 \times 10^{-2}$	460	$1,7 \times 10^{-2}$	460		
	^{129}I	$3,8 \times 10^{-3}$	540	$5,2 \times 10^{-3}$	540		
	^{79}Se	$2,5 \times 10^{-1}$	590	$2,9 \times 10^{-1}$	590		
	Cumul	$2,7 \times 10^{-1}$	590	$3,0 \times 10^{-1}$	590		

9.2 Le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA

9.2.1 La description et la conceptualisation du scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA

L'objectif de cette section est de décrire le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA identifié par l'analyse des risques et incertitudes (cf. Chapitre 3 du présent volume) conformément à la démarche de définition des scénarios en après fermeture (cf. Chapitre 1 du présent volume).

Ce scénario postule la perte d'étanchéité prématurée de tous les conteneurs de stockage HA et en conséquence les effets induits sur les modèles de relâchement et le comportement des radionucléides.

Comme présenté au chapitre 3 du présent volume, seuls les composants dysfonctionnant qui sont représentés de manière différente par rapport au SEN (situation de référence et situation enveloppe) sont décrits dans les chapitres suivants.

9.2.1.1 Le choix des conteneurs de stockage dysfonctionnant et date de perte d'étanchéité

Il est considéré de manière conservative, une perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA qui dysfonctionnent par rapport au scénario d'évolution normale, c'est-à-dire que le dysfonctionnement intervient dès la fermeture du stockage.

9.2.1.2 Les effets induits de la perte d'étanchéité sur les modèles de relâchement et sur les caractéristiques de transport et de rétention des radionucléides

Les effets induits de la perte d'étanchéité sur les modèles de relâchement sont les mêmes que pour le SEA, à savoir la prise en compte de l'influence d'un environnement cimentaire dans l'alvéole.

Il est également postulé le dysfonctionnement de l'exigence de limitation de l'utilisation de matières organiques ou de substances complexantes dans l'alvéole HA. La présence postulée de ces substances et leur influence potentielle sur le modèle de relâchement et la migration des éléments dans l'alvéole est prise en compte dans ce scénario.

Afin de couvrir dans ce scénario *What-if* l'ensemble des risques et incertitudes mentionnés au chapitre 2 du présent volume, le terme source des déchets HA est assimilé à un relâchement labile. L'influence des matières organiques sur la migration dans l'alvéole est couverte par les propriétés pénalisantes de solubilité prises en compte en SEN dans la partie utile de l'alvéole HA (solubilité infinie).

Par ailleurs, la perte d'étanchéité prématurée du conteneur de stockage conduit à un relâchement des radionucléides dans un milieu présentant une charge de température plus importante que celle du SEN, qui, au niveau des alvéoles du quartier de stockage HA, influe sur les paramètres de sorption et de transport des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien. L'influence de la température sur les propriétés intrinsèques du Callovo-Oxfordien lors du relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques est prise en compte *via* les mêmes règles qu'en SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume).

9.2.1.2.1 Les indicateurs considérés

Les indicateurs utilisés sont identiques à ceux définis pour les SEA (cf. Chapitre 8.2.1 du présent volume), c'est-à-dire :

- le bilan de masse en sortie de l'alvéole HA ;
- le débit molaire en entrée et sortie des composants ouvragés des quartiers HA en considérant la voie de transfert par les ouvrages et ce jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien ;
- le débit molaire en sortie du toit du Callovo-Oxfordien suivant la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien ;
- la date d'occurrence du maximum des sorties selon la voie de transfert par les ouvrages et celle par la couche du Callovo-Oxfordien (au toit) ;
- la dose si le rapport des indicateurs intermédiaires est significatif entre le scénario *What-if* et la situation du SEN correspondante (cf. Chapitre 1 du présent volume).

9.2.1.2.2 Les radionucléides retenus

Les radionucléides retenus pour le *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA sont identiques à ceux définis pour le SEA (cf. Chapitre 8.2.1 du présent volume), c'est-à-dire les radionucléides mobiles et à vie longue contributeurs en SEN (cf. Chapitre 6 du présent volume) : iode 129, chlore 36 et sélénium 79.

9.2.1.3 La synthèse des choix de représentation

La représentation et les effets induits par le dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA sont restitués dans le tableau 9-9 ci-après.

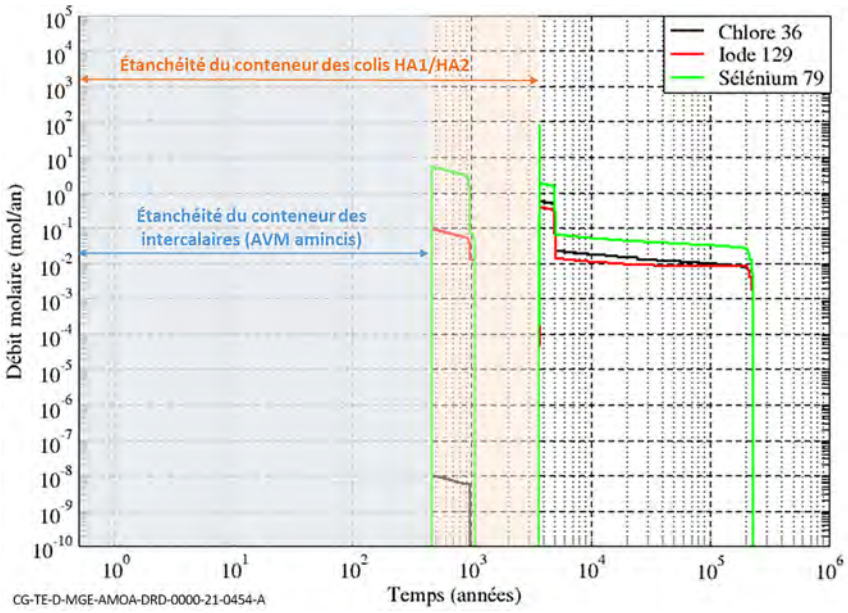
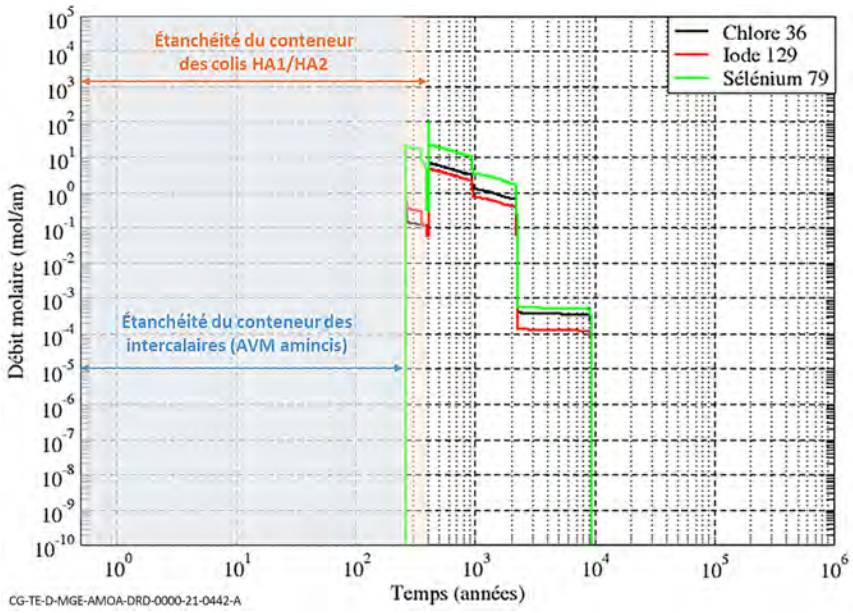
Tableau 9-9 Dysfonctionnements considérés dans le scénario What-if « Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA » et effets induits ou postulés sur le relâchement et la migration (les dysfonctionnements dans le cadre des What-if sont ombrés)

	Quartier pilote HA	Quartier de stockage HA
Conteneur de stockage	Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage	Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage
Représentation de l'alvéole HA	Identique à la situation du SEN considérée	Identique à la situation du SEN considérée
Solubilité dans l'alvéole HA	Identique au SEN (solubilité infinie)	Identique au SEN (solubilité infinie)
Charge thermique	Relâchement dans un milieu avec une température plus importante qu'en SEN	Relâchement dans un milieu avec une température plus importante qu'en SEN
Modèle de relâchement	Labile	Labile

9.2.2 Les résultats des évaluations pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA

9.2.2.1 Les effets induits de la perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage sur les termes sources

Il est considéré la dissolution du verre conduisant à un relâchement des radionucléides sur une année (cf. Figure 9-18). Le terme source des conteneurs de stockage dysfonctionnants est considéré comme labile pour le *What-if* « Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA ».

	Situation de référence	Situation enveloppe
SEN		

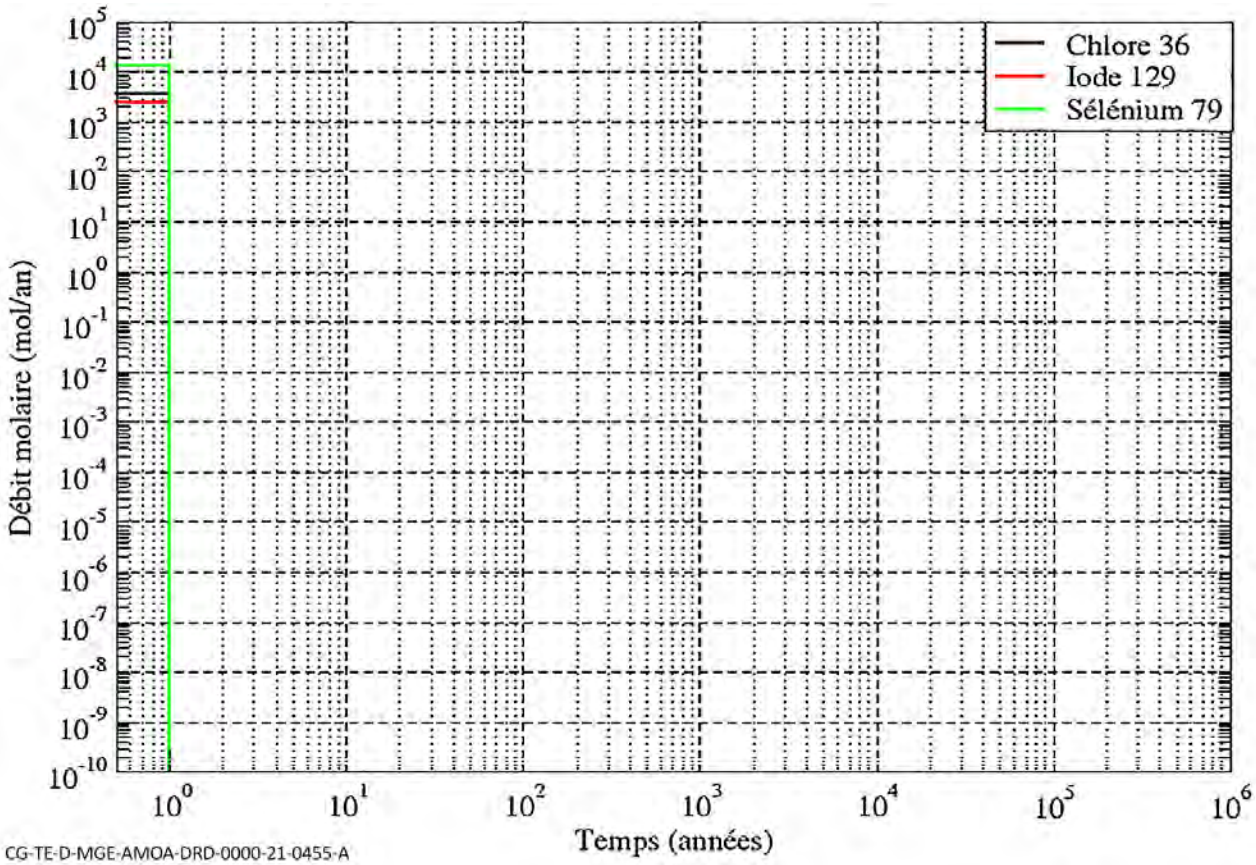
	Situation de référence	Situation enveloppe
What-if « Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA »		

Figure 9-18 *SEN et What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA - hypothèses de la situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) du SEN : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79*

9.2.2.2 Les effets induits sur le comportement hydraulique

L'augmentation temporaire de la perméabilité du Callovo-Oxfordien, du fait de l'élévation de température pendant le relâchement précoce des conteneurs de stockage HA dysfonctionnant, n'est pas significative. Le schéma hydraulique des écoulements d'eau au sein des ouvrages et dans la couche du Callovo-Oxfordien n'est donc pas modifié par rapport à celui du SEN. Les résultats hydrauliques (vitesses d'écoulement et débits d'eau sortant des liaisons surface-fond) sont donc identiques à ceux du SEN obtenus pour les deux situations (situation de référence et situation enveloppe, respectivement aux chapitre 6.2.1 et chapitre 6.3.1 du présent volume).

9.2.2.3 L'évaluation quantitative du transfert des radionucléides

Le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA a été évalué pour chacune des deux situations (référence, enveloppe).

9.2.2.3.1 Le transfert par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond)

Pour le *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA), toute l'activité initiale des colis HA est relâchée de manière précoce. Ainsi, les débits molaires en entrée des galeries d'accès sont plus précoces que ceux du SEN (cf. Figure 9-19 pour la situation de référence et figure 9-20 pour la situation enveloppe). Néanmoins, les débits molaires maximaux arrivant dans les galeries de liaison principales HA (après transfert dans les galeries d'accès) et ceux parvenant en entrée de la zone centrale (après transfert dans les galeries de liaison), sont similaires à ceux du SEN. Enfin, les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien sont globalement identiques à ceux du SEN.

Le relâchement prématuré et labile de tous les colis HA a donc une influence négligeable sur les débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79, aussi bien sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN (cf. Figure 9-19 et tableau 9-10) que sur la base des paramètres de la situation enveloppe du SEN (cf. Figure 9-20 et tableau 9-11). En effet, le seul effet notable des scénario *What-if* (par rapport au SEN), concernent les courbes de débit molaire en entrée des galeries d'accès HA au plus près des alvéoles HA. En s'éloignant des alvéoles HA, les autres indicateurs ne montrent plus aucune différence par rapport au SEN, qu'il s'agisse du maximum de débit molaire en entrée des galeries de liaison HA ou des débits molaires en entrée de la zone principale et *a fortiori* des débits molaires en sortie des LSF et du toit de la couche du Callovo-Oxfordien

À titre d'exemple, et pour chacune des situations (référence, enveloppe), le maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond (au toit du Callovo-Oxfordien) est très inférieur (d'un facteur supérieur à 10^6) au maximum de débit molaire d'iode 129 en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien au droit du stockage (cf. Tableau 9-10, tableau 9-11, figure 9-19 et figure 9-20).

Les ratios des débits molaires maximaux du chlore 36 et du sélénium 79 entre les deux voies de transfert (voie de transfert par les ouvrages, voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien) sont du même ordre que pour l'iode 129.

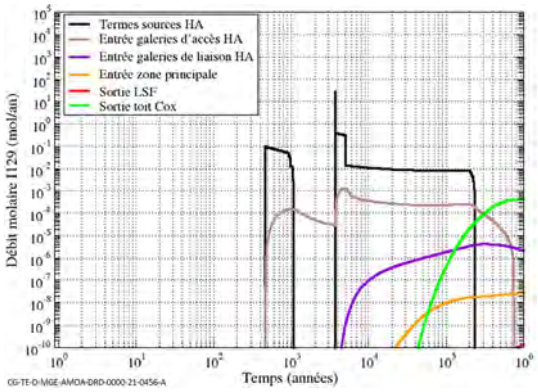
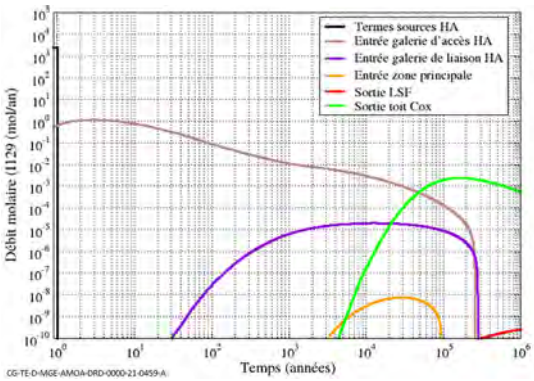
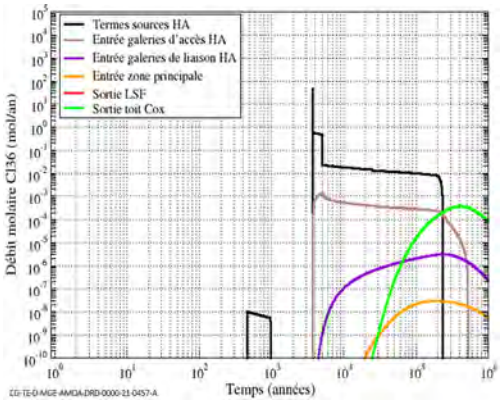
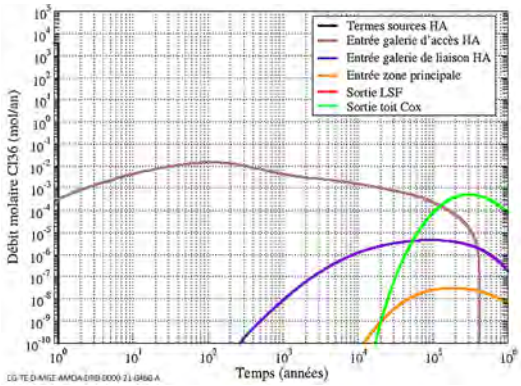
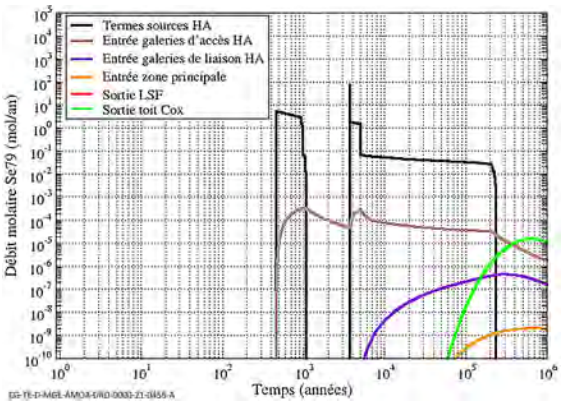
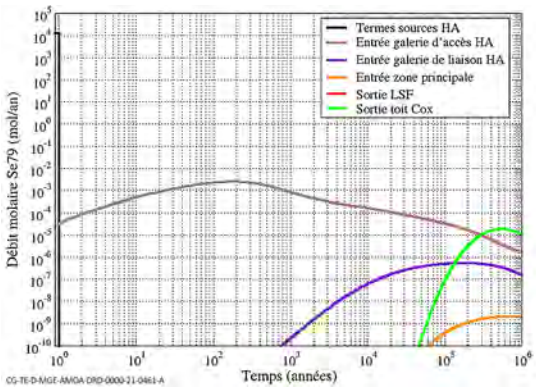
	SEN	*What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs des quartiers HA
	Situation de référence	
Iode 129		
Chlore 36		
Sélénium 79		

Figure 9-19 *What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA - hypothèses de la situation de référence du SEN, quartiers de stockage HA : historique des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)*

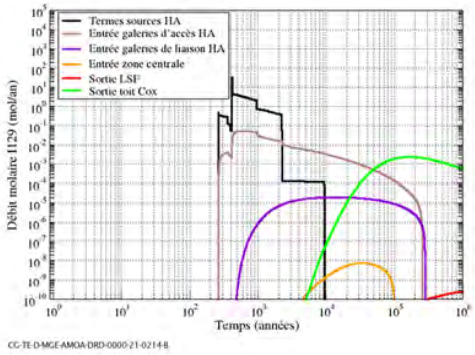
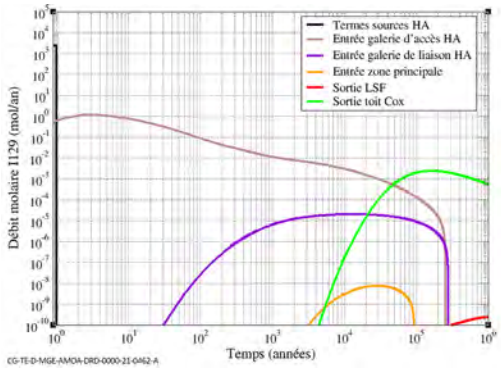
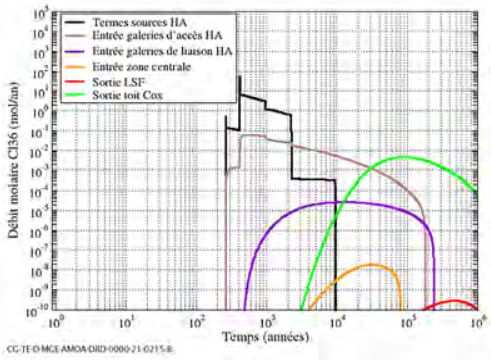
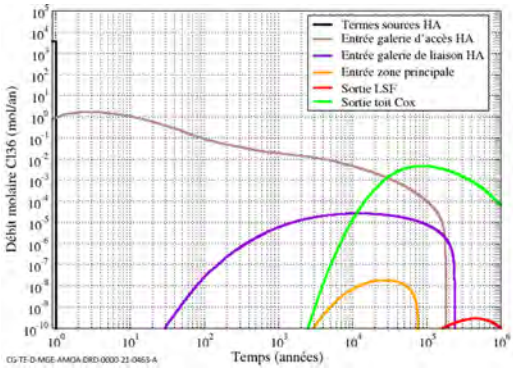
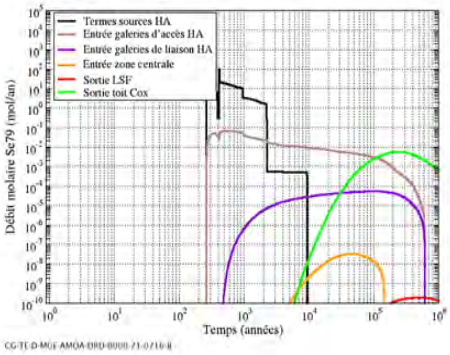
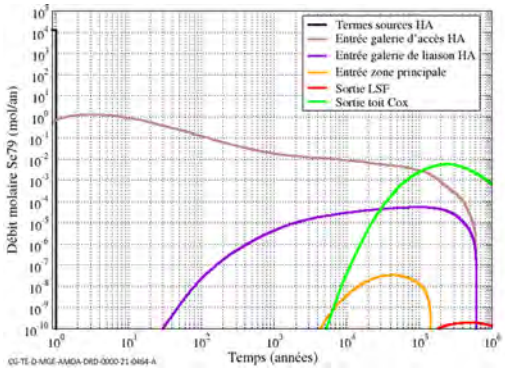
	SEN	*What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs des quartiers HA
	Situation enveloppe	
Iode 129		
Chlore 36		
Sélénium 79		

Figure 9-20 *What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA - hypothèses de la situation enveloppe du SEN, quartiers de stockage HA : historique des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)*

Tableau 9-10 *What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA - hypothèses de la situation de référence du SEN, quartiers de stockage HA : bilans de la quantité d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial des déchets HA) relâchée à un million d'années, entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)*

Situation de référence					
Quantité de radionucléides à un million d'années (en % de l'inventaire total initial des déchets HA)					
	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone centrale	Sortie des liaisons surface-fond	Sortie au toit du Callovo-Oxfordien
Iode 129					
SEN	3,3 %	0,1 %	$<10^{-3}$ %	$<10^{-5}$ %	10,0 %
What-if	3,3 %	0,1 %	$<10^{-3}$ %	$<10^{-5}$ %	11,9 %
Chlore 36					
SEN	2,2 %	<0,1 %	$<10^{-3}$ %	$<10^{-6}$ %	5,6 %
What-if	2,6 %	<0,1 %	$<10^{-3}$ %	$<10^{-6}$ %	7,2 %
Sélénium 79					
SEN	0,1 %	$<10^{-2}$ %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-8}$ %	<0,1 %
What-if	0,1 %	$<10^{-2}$ %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-8}$ %	<0,1 %

Tableau 9-11 *What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA - hypothèses de la situation enveloppe du SEN, quartiers de stockage HA : bilans de la quantité d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial des déchets HA) relâchée à un million d'années, entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)*

Situation enveloppe					
Quantité de radionucléides à un million d'années (en % de l'inventaire total initial des déchets HA)					
	Entrée dans les galeries d'accès	Entrée dans les galeries de liaison	Entrée dans la zone centrale	Sortie des liaisons surface-fond	Sortie au toit du Callovo-Oxfordien
Iode 129					
SEN	6,8 %	<0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	50,7 %
What-if	6,8 %	<0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	50,7 %
Chlore 36					
SEN	6,2 %	<0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	31,4 %
What-if	6,3 %	<0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	32,0 %
Sélénium 79					
SEN	6,4 %	0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	19,9 %
What-if	6,4 %	0,1 %	$<10^{-4}$ %	$<10^{-5}$ %	20,2 %

Au niveau des alvéoles HA et des quartiers HA, l'évaluation des indicateurs de performance montre que la voie de transfert principale est le Callovo-Oxfordien. Cette prépondérance s'explique par l'absence de drain hydraulique dans les galeries du fait de l'efficacité des scellements et donc des conditions de diffusion dominante dans et autour de l'alvéole HA et de la longueur hectométrique des alvéoles HA.

À l'échelle des quartiers HA, le transfert long et limité par diffusion des radionucléides dans les galeries permet une atténuation progressive du flux, du fait d'un échange de masse important depuis les galeries vers la couche du Callovo-Oxfordien.

À l'entrée de la zone centrale, une atténuation similaire supplémentaire est obtenue le long des galeries de la zone centrale et des liaisons surface-fond.

Les temps de transfert dans les ouvrages masquent les effets d'un relâchement labile dès la perte d'étanchéité des conteneurs de stockage HA dysfonctionnants.

9.2.2.3.2 Le transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien

Les résultats associés aux trois radionucléides mobiles à vie longue contributeurs (iode 129, chlore 36, sélénium 79) sont globalement identiques à ceux du SEN (cf. Figure 9-21) pour chacune des deux situations (référence, enveloppe), notamment en termes de niveaux et d'occurrences des valeurs maximales des débits molaires. La légère différence observée en situation de référence dans la phase ascendante de la courbe de débit molaire sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, provient du terme source labile (colis dysfonctionnants), comparé au modèle V_0->V_R (colis non dysfonctionnants).

Il n'y a donc pas d'influence de la thermique des colis dysfonctionnants sur le transfert à grande échelle, et les résultats du transfert de radionucléides au sein de la couche du Callovo-Oxfordien sont globalement identiques entre le SEN et le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA, quelle que soit la situation considérée (référence, enveloppe).

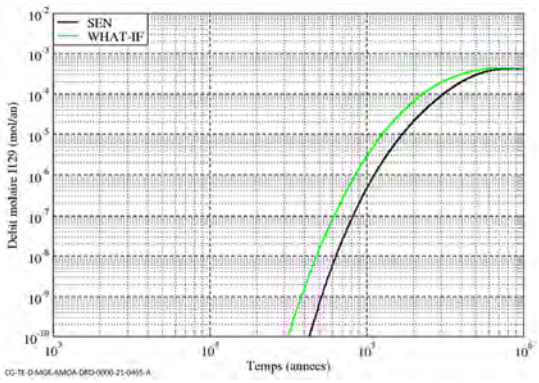
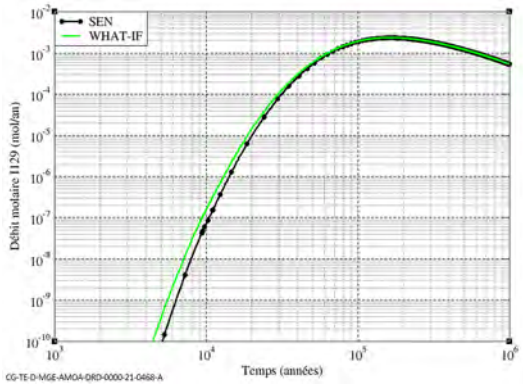
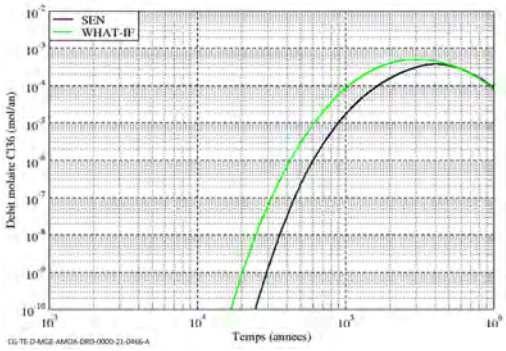
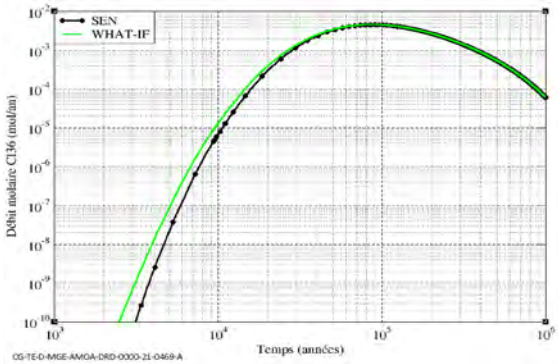
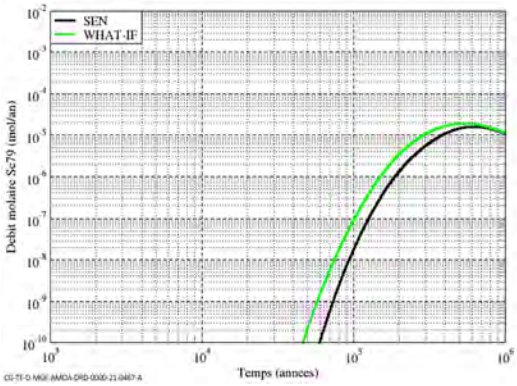
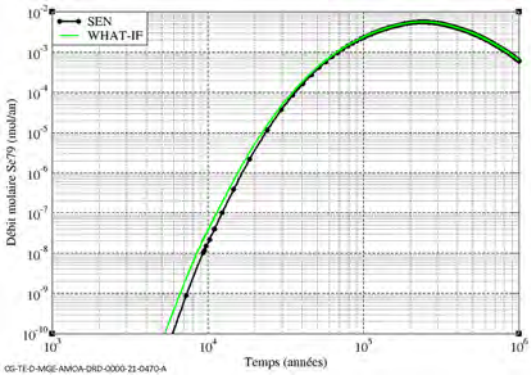
	SEN et *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA	
	Situation de référence	Situation enveloppe
Iode 129		
Chlore 36		
Sélénium 79		

Figure 9-21 *SEN et What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA - situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite), quartiers de stockage HA : historiques des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien pour le SEN et le What-if*

9.3 Les scénarios *What-if* relatifs à une discontinuité non détectée postulée dans la couche du Callovo-Oxfordien

9.3.1 Les éléments de contexte

De l'ensemble des travaux de caractérisation réalisés depuis plus de 25 ans, il ressort que la structurale du site d'implantation des ouvrages souterrains est très localisée et concentrée uniquement sur les failles bordières au pourtour de la zone de transposition, en bordure sud (fossé nord-est/sud-ouest de Gondrecourt) et en bordure ouest (zone nord-ouest/sud-est de fracturation diffuse) (cf. Chapitre 1.1 du volume 7 du présent rapport). Ainsi, l'analyse des risques et incertitudes relatifs aux caractéristiques intrinsèques de la couche du Callovo-Oxfordien présentée au chapitre 2.2.1 du présent volume permet d'exclure la présence, au sein de la pile sédimentaire mésozoïque, de faille de rejet supérieur à 2 mètres.

Néanmoins, l'Andra s'est engagée à traiter un scénario *What-if* postulant l'existence d'une ou plusieurs discontinuités.

Eu égard aux connaissances acquises (cf. Chapitre 1.2 du volume 7 du présent rapport), et l'analyse des risques et incertitudes présentée au chapitre 2.2.1 du présent volume, la considération d'une discontinuité traversant le Callovo-Oxfordien relève d'un scénario de sûreté de type *What-if* (comme cela a été proposé dans le cadre du « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2)). Selon la démarche présentée au chapitre 1 du présent volume, cela conduit à postuler un court-circuit de toute ou partie de l'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien dans la zone d'implantation des ouvrages souterrains qui représenterait une discontinuité non détectée sur le million d'années.

La conceptualisation d'une telle discontinuité n'est donc pas fondée sur des objets réels puisque non détectés mais au contraire sur des objets postulés pour imposer un transfert de radionucléides et de substances toxiques chimiques depuis des ouvrages de stockage vers les formations encaissantes par une discontinuité dans le Callovo-Oxfordien. Pour ce faire, la conceptualisation d'une telle discontinuité considère deux hypothèses :

- la première suppose une discontinuité non détectée qui ne serait pas traversante, c'est-à-dire qu'elle n'affecterait qu'une moitié de la couche du Callovo-Oxfordien par un court-circuit de la couche entre des alvéoles interceptés et une formation encaissante ;
- la seconde suppose une discontinuité non détectée qui serait traversante, c'est-à-dire qu'elle crée un court-circuit de la couche du Callovo-Oxfordien entre les formations aquifères de l'Oxfordien et du Dogger.

Elles conduisent à la définition de deux scénarios distincts dont la description et la conceptualisation sont décrites et détaillées dans le chapitre suivant, incluant les dimensions et caractéristiques hydrauliques postulés.

Ces scénarios *What-if* contribuent à évaluer la robustesse du système de stockage en montrant que même en postulant la présence d'une discontinuité non détectée et hydrauliquement active qui recouperait la couche du Callovo-Oxfordien, le système de stockage reste performant et les éventuelles incidences radiologiques sur l'homme demeurent inférieures aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes (cf. Chapitre 1.3 du présent volume).

Les évaluations quantitatives s'appuient sur les hypothèses et données issues de la situation de référence du scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 5 du présent volume), permettant ainsi d'évaluer l'influence potentielle d'une discontinuité postulée sur les flux d'eau et de radionucléides qui traversent la couche du Callovo-Oxfordien.

Ces études sont focalisées sur les principaux radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), le transfert des autres radionucléides étant limité, comme en scénario d'évolution normale, du fait de leur sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien qui favorise les échanges de masse entre les ouvrages souterrains et la couche du Callovo-Oxfordien.

9.3.2 La description et la conceptualisation des scénarios *What-if* de discontinuité non détectée postulée

9.3.2.1 La représentation de la discontinuité non détectée postulée

La définition de ces scénarios *What-if* postule la présence d'une discontinuité qui n'a pas été détectée dans la couche du Callovo-Oxfordien.

La représentation de ce scénario *What-if* s'appuie sur la représentation du SEN en situation de référence et les deux exutoires qui lui sont associés : le forage d'exploitation du Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse et le forage d'exploitation d'eau dans l'aquifère du Barrois (cf. Chapitre 2.10 du présent volume). Au regard des enseignements du SEN (cf. Chapitre 7 du présent volume), les débits molaires obtenus à l'exutoire du Barrois sont significativement inférieurs à ceux de l'exutoire du Dogger. En conséquence, il est retenu l'exutoire par pompage du Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse tel que défini (cf. Chapitre 2.10 du présent volume). Ainsi, les deux scénarios *What-if* de discontinu dé non détectée sont décrits selon les deux modalités suivantes :

- une discontinuité non détectée et non traversante est postulée dans la moitié inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 9-22), créant un court-circuit de la couche entre les alvéoles interceptés et l'aquifère du Dogger. Avant de s'écouler par convection dans la discontinuité vers l'aquifère du Dogger, l'eau issue de la couche du Callovo-Oxfordien traverse plusieurs alvéoles où elle se charge en radionucléides, contribuant ainsi à augmenter le débit molaire de radionucléides transitant dans la discontinuité postulée ;
- une discontinuité non détectée et traversante est postulée créant un court-circuit de la couche du Callovo-Oxfordien entre les formations aquifères de l'Oxfordien et du Dogger, induisant ainsi un débit hydraulique maximal entre les deux formations encaissantes et en conséquence un débit molaire de radionucléides majoré.

La voie de transfert des radionucléides entre les alvéoles interceptés et l'exutoire transite par la discontinuité qui constitue un court-circuit de la couche du Callovo-Oxfordien, puis par l'aquifère du Dogger. Les radionucléides sont alors transportés vers la zone de fracturation diffuse où est retenu l'exutoire forage d'exploitation de l'aquifère du Dogger à des fins de consommation d'eau et d'exploitation agricole par un groupe de référence hypothétique. Les modalités de représentation de la biosphère sont identiques à celles définies pour l'exutoire Dogger (cf. Chapitre 4 du présent volume). Du fait que l'objectif de ces scénarios est d'évaluer la robustesse du système de stockage, l'évaluation de l'impact radiologique se limite à la classe d'âge « adulte » du groupe de référence hypothétique « multi-activités », avec une biosphère tempérée.

9.3.2.2 L'emplacement, l'extension et l'orientation de la discontinuité non détectée postulée

L'emplacement de la discontinuité est postulé en fonction de l'hydrogéologie du secteur (cf. Volume 7 du présent rapport), de sorte que le gradient de charge hydraulique favorise le transfert convectif des radionucléides entre les alvéoles interceptés vers l'exutoire Dogger :

- la discontinuité non détectée est représentée à l'emplacement où le gradient de charge hydraulique assure un transfert convectif maximal vers le Dogger. Le gradient de charge hydraulique descendant atteint - 0,04 $m.m^{-1}$ au sud du quartier de stockage MA-VL, contribuant ainsi au transfert convectif des radionucléides depuis les ouvrages souterrains vers la formation encaissante du Dogger ;

- compte tenu du gradient de charge hydraulique ascendant au droit du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA pendant la période considérée (un million d'années), le cas d'une discontinuité interceptant ces quartiers n'est pas retenu.

Concernant l'extension verticale de la discontinuité postulée :

- dans le cas d'une discontinuité non traversante assurant le court-circuit hydraulique entre les alvéoles du quartier de stockage MA-VL et l'aquifère du Dogger, l'extension verticale est de l'ordre de 100 mètres ;
- dans le cas d'une discontinuité traversante assurant le court-circuit hydraulique entre les aquifères de l'Oxfordien calcaire et du Dogger, l'extension verticale est au moins égale à l'épaisseur de la formation.

Pour la conceptualisation de la discontinuité non détectée, il est postulé que l'extension horizontale de la discontinuité est de l'ordre de 200 mètres et qu'elle intercepte quatre alvéoles du quartier de stockage MA-VL (cf. Figure 9-22).

Il est retenu pour sa conceptualisation une orientation cohérente avec celle des failles les plus proches de la zone de transposition. Ainsi, compte tenu de l'orientation des réseaux de failles observés en bordure sud (fossé (nord-est) - (sud-ouest) de Gondrecourt) et en bordure ouest (zone (nord-ouest) - (sud-est) de fracturation diffuse) de la zone de transposition (ZT), la discontinuité postulée peut être orientée perpendiculairement (N135-155°E) ou parallèlement (N35°E) à la faille de Gondrecourt. La position de la discontinuité postulée, au sud-est du quartier de stockage MA-VL, étant plus proche de la faille de Gondrecourt que de la zone de fracturation diffuse, il est fait le choix de la représenter parallèle à la faille de Gondrecourt.

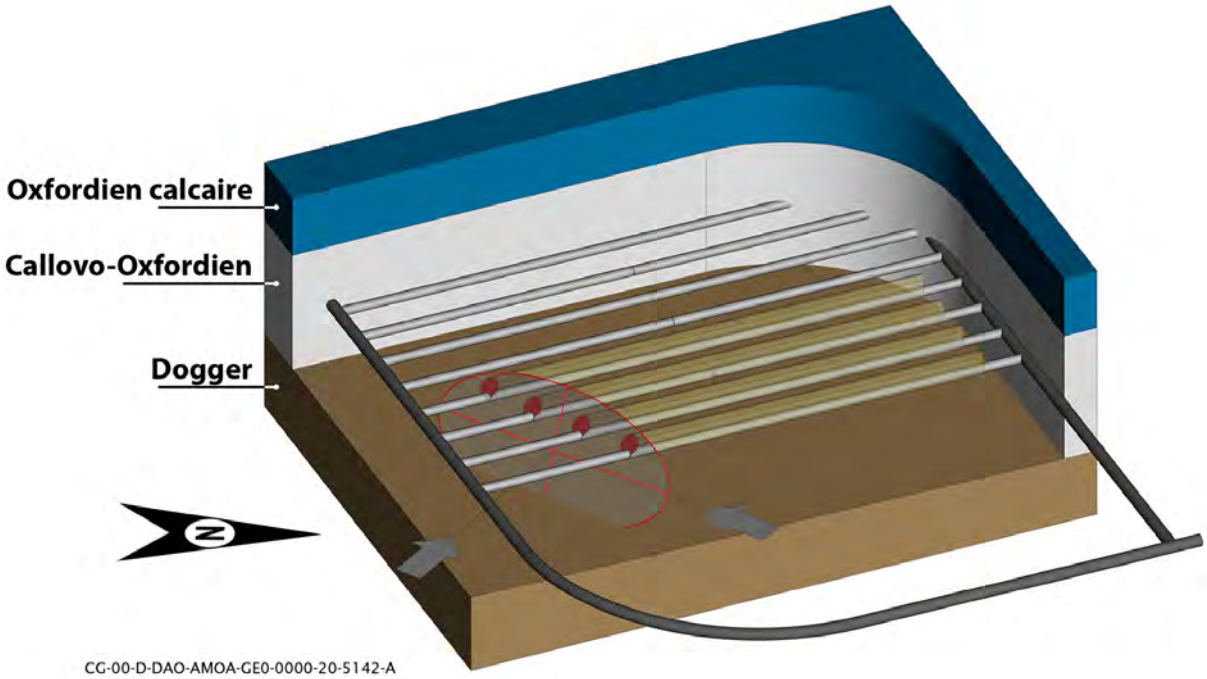


Figure 9-22 *Représentation schématique d'une discontinuité non détectée postulée non traversante et qui intercepte quatre alvéoles de stockage MA-VL, à l'extrémité sud du quartier de stockage MA-VL. Le modèle numérique représente une discontinuité au nord-est du quartier de stockage MA-VL (les flèches sont respectivement parallèles et perpendiculaires à la faille de Gondrecourt)*

9.3.2.3 L'ouverture et la transmissivité de la discontinuité non détectée postulée pour chacun des deux scénarios

Il est fait le choix d'attribuer à la discontinuité postulée une gamme de conductivité hydraulique représentative d'une gamme de transmissivité hydraulique[101] majorant les transferts et minimisant les temps de transfert. La couche du Callovo-Oxfordien n'étant pas en extension à l'actuel et sur le prochain million d'années, il est postulé que la discontinuité s'apparente à de l'argilite broyée et compactée et non pas à une fracture ouverte ou à des fractures ouvertes. Dès lors, la discontinuité est représentée comme une gouge d'épaisseur pluri-centimétrique (4 cm), assimilable à un milieu poreux continu équivalent.

Afin d'évaluer la sensibilité des résultats à la conductivité hydraulique de la discontinuité et d'identifier un potentiel effet « seuil » sur les débits d'eau drainés par la discontinuité, les évaluations ont été réalisées avec 4 valeurs de conductivité hydraulique : 10^{-8}, 10^{-7}, 10^{-6} et 10^{-5} m.s^{-1}. Cette gamme de valeurs est représentative de la conductivité hydraulique des matériaux poreux peu compacts, qui peut atteindre 1×10^{-5} m.s^{-1} pour un matériau type granulaire. Avec de telles valeurs de conductivité hydraulique, la quantité d'eau drainée par une discontinuité non traversante serait limitée par la faible conductivité hydraulique de la couche du Callovo-Oxfordien. En revanche, la quantité d'eau drainée par une discontinuité traversante peut augmenter en fonction de sa conductivité hydraulique.

9.3.2.4 Les propriétés de transfert de la discontinuité non détectée postulée

Comme en scénario d'évolution normale, il est considéré que le stockage est saturé dès sa fermeture, ce qui permet d'assurer une prise en compte « conservative » du transfert des radionucléides. Les propriétés de transport du matériau constitutif de discontinuité non détectée sont considérées comme équivalentes à celles du matériau mis en place pour le remblayage des galeries (cf. Tableau 9-12).

Tableau 9-12 Paramètres pour la représentation de la discontinuité non détectée postulée

	Matériau constitutif de discontinuité non détectée
Dimensions	Épaisseur : 4 cm Extension verticale : ≈100 m (discontinuité non traversante) >150 m (discontinuité traversante) Extension latérale ≈200 m
Conductivité hydraulique (K), en m.s^{-1}	De 1×10^{-8} à 1×10^{-5}
Porosité totale	30 %
Porosité cinématique (ω_{cin}), sans unités	30 %
Coefficient de diffusion effectif (De), en m^2.s^{-1}	$6{,}9 \times 10^{-10}$
Porosité accessible (ω_{acc}), sans unités	30 %
Densité sèche ρ_s, en kg.m^{-3}	S.O.
Coefficient de distribution (Kd), en m^3.kg^{-1}	0
Limite de solubilité (C_{sat}) en mol.L^{-1}	Infinie

[101] La transmissivité hydraulique est le produit de la conductivité hydraulique par l'épaisseur de la discontinuité.

Hormis la discontinuité, tous les composants du système de stockage et de son environnement sont représentés avec les mêmes modèles et paramètres que pour l'évaluation quantitative du scénario d'évolution normale, en situation de référence, à l'exception de la distribution de l'inventaire radiologique (cf. Chapitres 9.3.2.1 et 9.3.2.5 du présent volume).

9.3.2.5 L'inventaire radiologique dans les alvéoles interceptés par la discontinuité non détectée postulée

Il est considéré une distribution de l'inventaire radiologique MA-VL, dans le quartier de stockage et dans les alvéoles MA-VL, qui vise une mobilisation maximale du transfert par la discontinuité, pour chacun des trois radionucléides mobiles et à vie longue étudiés (iode 129, chlore 36 et sélénium 79). À cette fin, trois distributions distinctes de l'inventaire radiologique sont définies en considérant successivement chacun de ces radionucléides comme « pilote » de la redistribution[102]. Ainsi, les incidences radiologiques liées à ces trois radionucléides ne sont pas sommées.

Par ailleurs, il est fait l'hypothèse que la discontinuité non détectée postulée intercepte les quatre alvéoles regroupés côte à côte contenant l'essentiel de l'inventaire radiologique des radionucléides mobiles du quartier de stockage MA-VL (cf. Figure 9-12). Ainsi, chaque évaluation des incidences prend en compte environ 80 % de l'inventaire du radionucléide considéré du quartier de stockage MA-VL (cf. Tableau 9-13 ci-après).

Afin de faciliter la conceptualisation numérique, à l'identique de celle mise en œuvre pour les autres scénarios, le modèle numérique considère une discontinuité non détectée représentée au nord-est du quartier de stockage MA-VL, couplée au gradient de charge hydraulique maximal descendant observé au sud du quartier (cf. Chapitres 9.3.2.1 et 9.3.2.2 du présent volume).

Le tableau 9-13 précise, pour chacun des trois radionucléides considérés, le pourcentage de l'inventaire radiologique du quartier de stockage MA-VL contenu dans les quatre alvéoles interceptés par la discontinuité non détectée. Les quatre alvéoles interceptés contiennent environ 80 % de l'inventaire radiologique MA-VL des trois radionucléides mobiles et à vie longue considérés.

Tableau 9-13 Pourcentage de l'inventaire radiologique du quartier de stockage MA-VL contenu dans les quatre alvéoles interceptés par la discontinuité non détectée postulée, pour chacun des trois radionucléides considérés, en lien avec la distribution pénalisante de l'inventaire

Radionucléide « pilote »	Pourcentage de l'inventaire du quartier de stockage MA-VL contenu dans les quatre alvéoles interceptés par la discontinuité non détectée postulée, en lien avec la distribution pénalisante de l'inventaire
^{129}I	81 %
^{36}Cl	86 %
^{79}Se	83 %

[102] Tout en respectant les règles de co-stockage géométrique et physico-chimique des colis (cf. Volume 3 du présent rapport).

9.3.2.6 Les indicateurs considérés

Les indicateurs utilisés pour évaluer la robustesse du système de stockage, ainsi que les incidences radiologiques sur l'homme, sont les mêmes que ceux retenus pour l'évaluation quantitative du scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 5.4 du présent volume), c'est-à-dire :

- les champs de charges hydrauliques et les débits d'eau drainés par la discontinuité. Ces indicateurs permettent d'apprécier l'influence de la discontinuité non détectée sur les circulations hydrauliques dans le système de stockage ;
- les débits molaires instantanés des trois radionucléides mobiles à vie longue transitant jusqu'au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, par la discontinuité et hors discontinuité. Cet indicateur permet d'apprécier l'influence de la discontinuité non détectée sur le transfert des radionucléides jusqu'à l'aquifère du Dogger ;
- la dose annuelle à l'exutoire Dogger pour chacun des trois radionucléides.

9.3.3 Les résultats des évaluations pour les scénarios *What-if* de discontinuité non détectée

9.3.3.1 Le scénario *What-if* d'une discontinuité non détectée et non traversante limitée à la moitié inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien

9.3.3.1.1 Le comportement hydraulique

La figure 9-23 présente les champs des pertes de charges hydrauliques (différences de charges hydrauliques par rapport à celles du SEN) dans un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage, pour le scénario *What-if* avec discontinuité non détectée et non traversante, pour les quatre valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité considérées (cf. Chapitre 9.3.2.3 du présent volume).

Ces pertes de charges sont de l'ordre du mètre pour la conductivité hydraulique minimale dans la discontinuité (10^{-8} m.s^{-1}) et de l'ordre de 4,5 mètres pour la conductivité hydraulique maximale (10^{-5} m.s^{-1}), avec un effet de seuil marqué lorsque la conductivité hydraulique atteint 10^{-7} m.s^{-1} et les valeurs supérieures, puis un effet d'asymptote lorsqu'elle atteint de l'ordre de 10^{-6} m.s^{-1}. Le champ des pertes de charges hydrauliques obtenu met en évidence une influence hydraulique de la discontinuité s'étendant à tout le quartier de stockage MA-VL pour les conductivités hydrauliques les plus élevées, avec une perte de charge uniforme dans l'ensemble du quartier (galeries, alvéoles de stockage, Callovo-Oxfordien (sain ou endommagé) entre alvéoles).

Pour une conductivité hydraulique supérieure ou égale à 10^{-6} m.s^{-1}, la charge hydraulique des ouvrages de stockage est égale à celle du toit du Dogger (mur de la couche du Callovo-Oxfordien).

Pertes de charges hydrauliques dans le plan horizontal traversant les ouvrages de stockage	
Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-8}$ m.s^{-1})	Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-7}$ m.s^{-1})
Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-6}$ m.s^{-1})	Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-5}$ m.s^{-1})

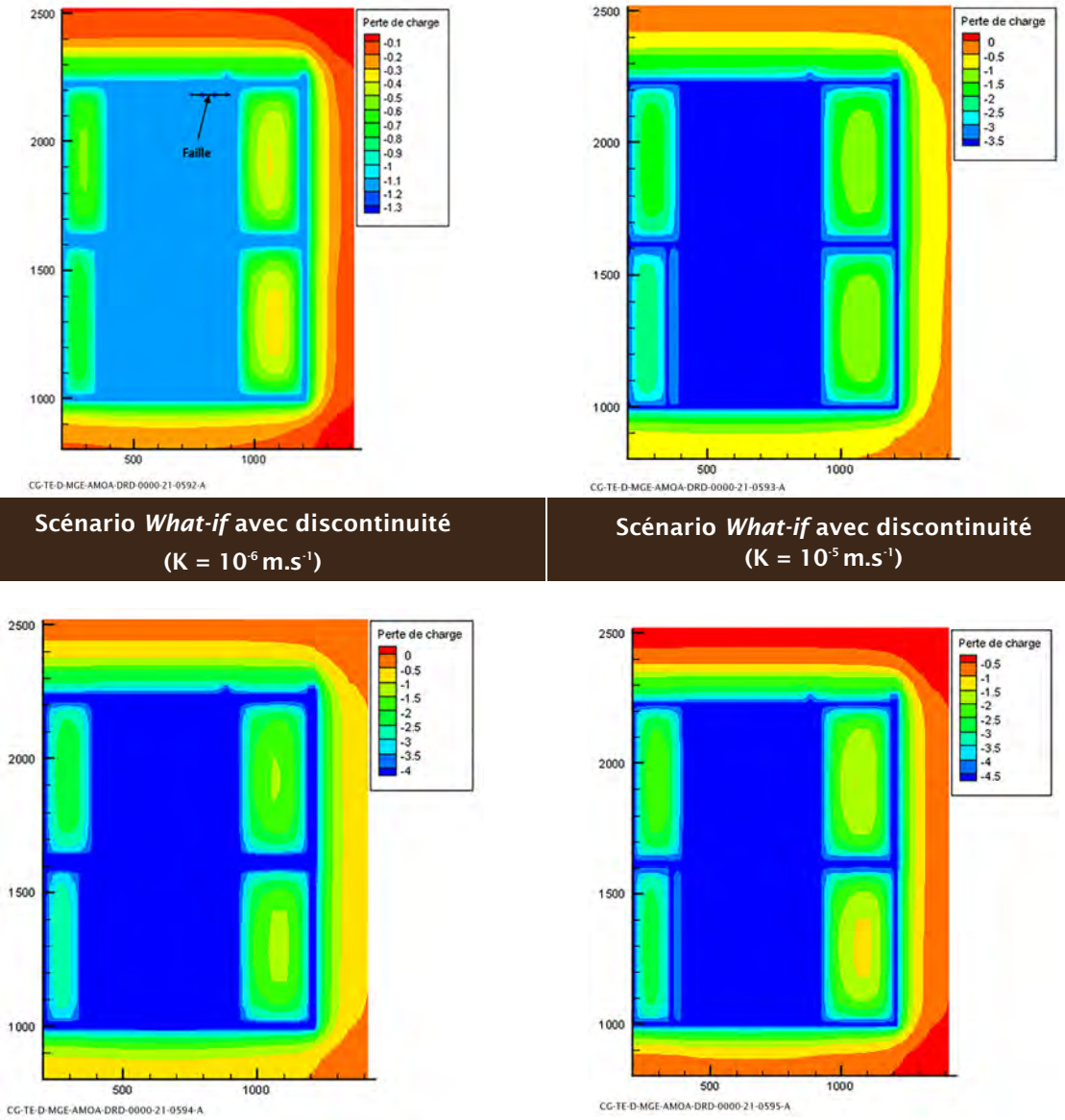


Figure 9-23 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) - quartier de stockage MA-VL : champ des pertes de charges hydrauliques (en mètres) induites par la discontinuité selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)*

Le tableau 9-14 présente les débits d'eau drainés par la discontinuité non détectée et non traversante en fonction de sa conductivité hydraulique.

En lien avec les pertes de charges indiquées précédemment, il est observé une forte sensibilité des débits d'eau à la conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée lorsque celle-ci est inférieure à 10^{-6} m.s^{-1}, puis un effet d'asymptote à partir d'une conductivité hydraulique de 10^{-6} m.s^{-1}, conduisant à un débit d'eau drainé par la discontinuité de l'ordre de 500 L.an^{-1} en régime permanent.

Cet effet d'asymptote provient de l'effet limitant de la couche du Callovo-Oxfordien à « fournir » de l'eau au système de stockage, de par sa faible conductivité hydraulique et un faible gradient de charge hydraulique vertical.

Tableau 9-14 Évolution du débit d'eau drainé par la discontinuité non détectée postulée et non traversante, en fonction de sa conductivité hydraulique

Conductivité hydraulique de la discontinuité ($m.s^{-1}$)	Débit d'eau drainé par la discontinuité ($L.an^{-1}$)
10^{-8}	134
10^{-7}	396
10^{-6}	498
10^{-5}	512

9.3.3.1.2 Le transfert des radionucléides dans le système de stockage, par la discontinuité non détectée postulée et dans la couche du Callovo-Oxfordien

Les graphes de la figure 9-24 présentent pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79, les historiques des débits molaires sortant par la discontinuité non détectée et non traversante au mur de la couche du Callovo-Oxfordien pour les quatre valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée postulées.

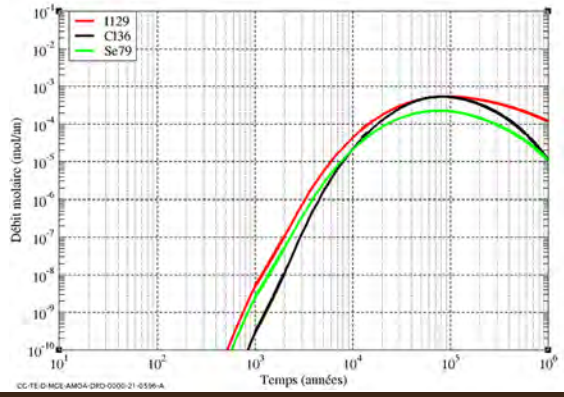
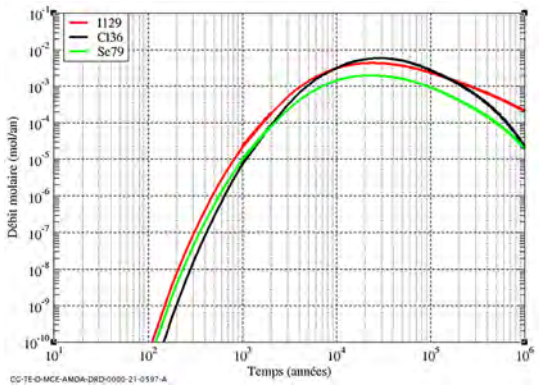
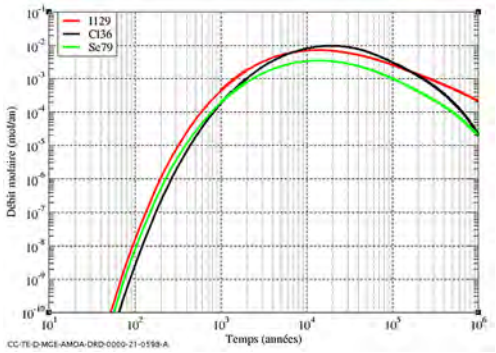
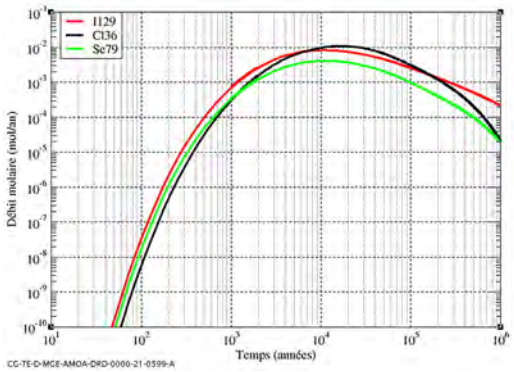
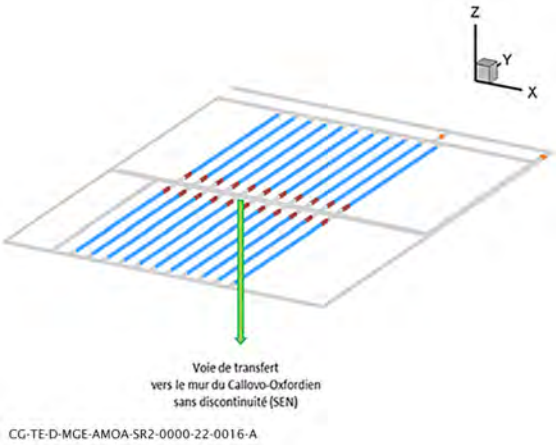
Historiques des débits molaires en sortie de la discontinuité au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	
Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-8}$ m.s^{-1})	Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-7}$ m.s^{-1})
	
Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-6}$ m.s^{-1})	Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-5}$ m.s^{-1})
	

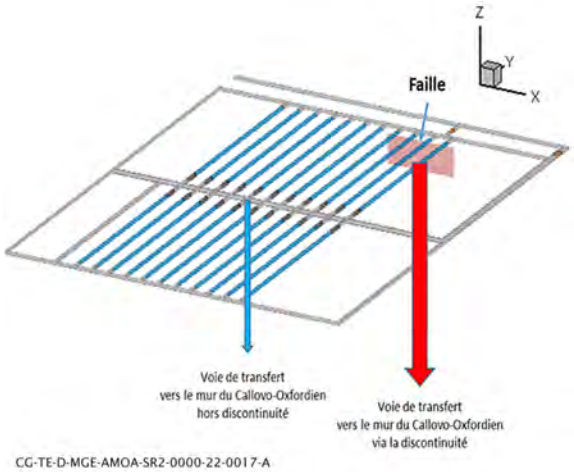
Figure 9-24 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : historiques des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, en sortie de la discontinuité (au mur de la couche du Callovo-Oxfordien) pour les quatre valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité considérées*

Les graphes de la figure 9-25 présentent pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79, les historiques des débits molaires sortant au droit du quartier de stockage MA-VL au mur de la couche du Callovo-Oxfordien selon les deux voies de transfert (débit molaire capté par la discontinuité[103] non détectée et non traversante et débit molaire migrant à travers la couche du Callovo-Oxfordien (hors discontinuité)) et situent ces voies de transfert par rapport à celle obtenue pour le SEN pour les deux bornes de la gamme de valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée étudiée (10^{-8} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1}).

[103] Les courbes de débit molaire sortant par la discontinuité non détectée (couleur rouge sur les graphes de la figure 9-25) tiennent compte du transfert des radionucléides par diffusion latérale de part et d'autre des alvéoles interceptés et de la discontinuité.

Historiques des débits molaires issus du quartier de stockage MA-VL au mur de la couche du Callovo-Oxfordien



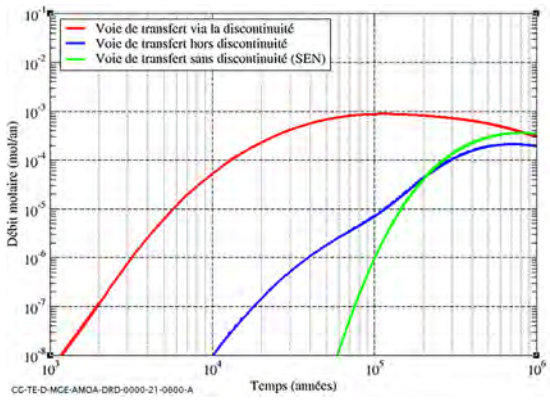


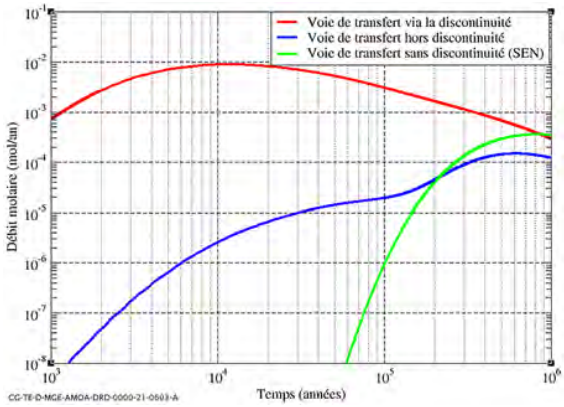
Couleur verte : SEN (absence de discontinuité) - voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien

Couleur bleue : Scénario *What-if* avec discontinuité non détectée postulée – voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien (hors discontinuité)

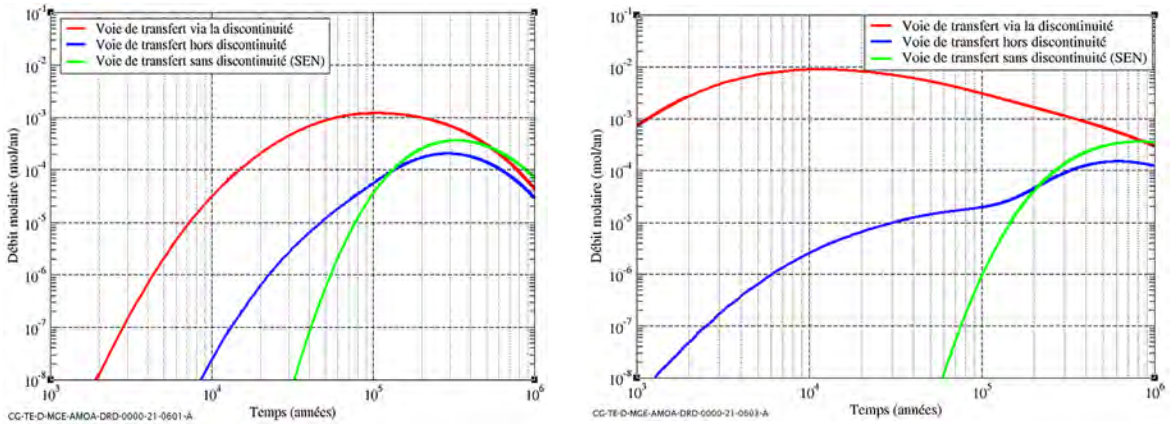
Couleur rouge : Scénario *What-if* avec discontinuité non détectée postulée – voie de transfert par la discontinuité

$K=10^{-8}$ m.s^{-1} (conductivité hydraulique minimale)	$K=10^{-5}$ m.s^{-1} (conductivité hydraulique maximale)
Iode 129	





Chlore 36



Sélénium 79

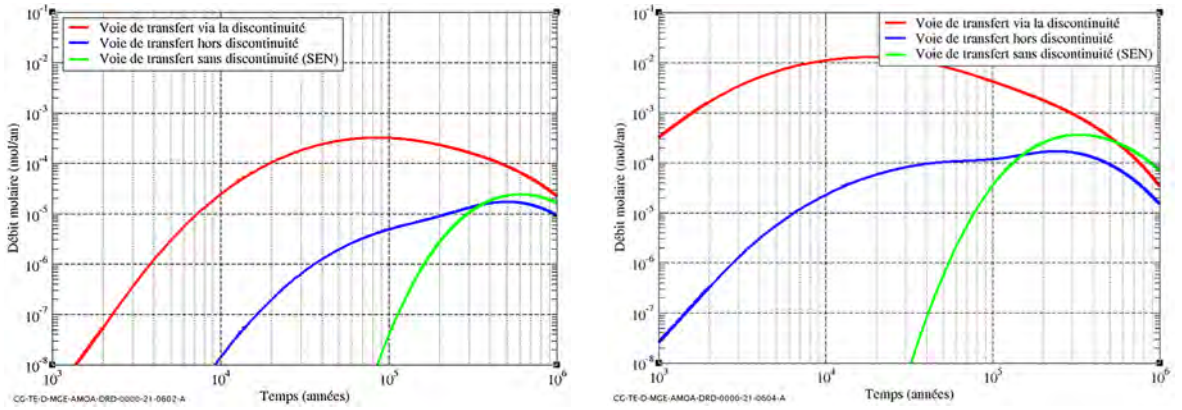


Figure 9-25 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) – quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, par la discontinuité et par la couche du Callovo-Oxfordien, pour les deux bornes de la gamme de valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité étudiée (10^{-8} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1})*

Le tableau 9-15 ci-après présente les débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (au droit du quartier de stockage MA-VL, discontinuité non détectée postulée comprise) et les dates d'occurrence de ces débits maximaux pour la situation de référence du SEN et pour le scénario *What-if* d'une discontinuité non détectée et non traversante, pour les trois radionucléides et les quatre valeurs de conductivité hydraulique dans la discontinuité postulée.

Tableau 9-15 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien et dates d'occurrence de ces débits maximaux, en SEN et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)*

	SEN – situation de référence		Scénario *What-if* avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure)							
			$K = 10^{-8}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-7}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-6}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-5}$ m.s^{-1}	
Radionucléide	Débit max. (mol.an^{-1})	Date du débit max. (an)	Débit max. (mol.an^{-1})	Date du débit max. (an)	Débit max. (mol.an^{-1})	Date du débit max. (an)	Débit max. (mol.an^{-1})	Date du débit max. (an)	Débit max. (mol.an^{-1})	Date du débit max. (an)
^{129}I	$3,8 \times 10^{-4}$	$7,8 \times 10^{5}$	$8,7 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{5}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{4}$	$7,9 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{4}$	$8,9 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{4}$
^{36}Cl	$4,0 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{5}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{5}$	$7,4 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{4}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{4}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{4}$
^{79}Se	$2,7 \times 10^{-5}$	$5,8 \times 10^{5}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$8,7 \times 10^{4}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{4}$	$3,8 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{4}$	$4,4 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{4}$

L'analyse des résultats présentés ci-avant (cf. Figure 9-24, figure 9-25 et tableau 9-15 montre que :

- globalement, les débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien se stabilisent pour une conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-6} m.s^{-1}, en lien avec l'effet « seuil » déjà constaté pour les débits d'eau drainés (cf. Chapitre 9.3.3.1 du présent volume) ; ceci traduit un comportement « asymptotique » des débits molaires lorsque la conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée postulée augmente, et ainsi une limite du système au-delà d'une conductivité hydraulique de 10^{-6} m.s^{-1} ;
- pour une conductivité hydraulique de discontinuité de 10^{-8} m.s^{-1}, la discontinuité seule (toutes choses égales par ailleurs) induit une augmentation des débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien d'un facteur environ 2 (par rapport au SEN) pour l'iode 129, environ 3 pour le chlore 36 et environ 10 pour le sélénium 79, et les dates d'occurrence des débits molaires maximaux sont de l'ordre de 100 000 ans (plus précoces qu'en SEN de l'ordre de 600 000 ans) ;
- l'augmentation de la conductivité hydraulique dans la discontinuité induit, par rapport au cas 10^{-8} m.s^{-1}, une augmentation supplémentaire des débits molaires maximaux d'un facteur environ 5 (pour une conductivité hydraulique de 10^{-7} m.s^{-1}) à 10 (pour une conductivité hydraulique de 10^{-6} m.s^{-1}). Une conductivité hydraulique de 10^{-5} m.s^{-1} induit, par rapport au cas 10^{-6} m.s^{-1}, une augmentation des débits molaires maximaux d'environ 10 % supplémentaires. Pour cette conductivité hydraulique maximale de 10^{-5} m.s^{-1}, les débits molaires maximaux sont d'un à deux ordres de grandeur supérieurs à ceux évalués pour le SEN (facteur 25 pour l'iode 129, 30 pour le chlore 36 et 160 pour le sélénium 79), avec des occurrences plus précoces (de 12 000 ans à 18 000 ans).

Le tableau 9-16 présente, pour chacun des trois radionucléides considérés et en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée retenue, la fraction de l'inventaire initial des quatre alvéoles interceptés (et celle de l'inventaire initial du quartier de stockage MA-VL), qui sort **au mur de la couche du Callovo-Oxfordien par la discontinuité**, cumulé sur un million d'années.

La fraction de l'inventaire en radionucléides des quatre alvéoles interceptés en supposant une discontinuité non détectée, qui est sorti au mur du Callovo-Oxfordien à un million d'années est de l'ordre de 15 % à 30 % pour la conductivité hydraulique minimale de 10^{-8} m.s^{-1}.

En lien avec l'effet de seuil obtenu pour les débits d'eau drainés, les fractions d'inventaires se stabilisent à partir d'une conductivité hydraulique de 10^{-6} m.s^{-1}. Pour les deux valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées considérées (10^{-6} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1}), environ 70 % de l'inventaire initial des 4 alvéoles interceptés en iode 129 atteint le mur de la couche du Callovo-Oxfordien sur un million d'années par la discontinuité. Ce pourcentage est d'environ 50 % pour le chlore 36 et le sélénium 79.

Tableau 9-16 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : inventaire sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien par la discontinuité, cumulé sur un million d'années, rapporté à l'inventaire initial des quatre alvéoles interceptés, en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité retenue, pour chacun des trois radionucléides considérés*

	Scénario *What-if* avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure)			
	K = 10^{-8} m.s^{-1}	**K = 10^{-7} m.s^{-1}**	**K = 10^{-6} m.s^{-1}**	**K = 10^{-5} m.s^{-1}**
Radionucléide	Inventaire sortant par la discontinuité non détectée postulée sur 1 un million d'années/inventaire des 4 quatre alvéoles interceptés (%)			
^{129}I	30 %	63 %	71 %	72 %
^{36}Cl	15 %	41 %	49 %	50 %
^{79}Se	15 %	42 %	51 %	52 %

Le tableau 9-17 présente, pour chacun des trois radionucléides considérés et en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée retenue, la fraction de l'inventaire initial du quartier de stockage MA-VL qui sort **au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (discontinuité comprise)**, cumulé sur un million d'années.

Pour la conductivité hydraulique minimale de 10^{-8} m.s^{-1} dans la discontinuité non détectée retenue, environ 30 % de l'inventaire en iode 129 du quartier de stockage MA-VL atteint le mur de la couche du Callovo-Oxfordien (principalement par la discontinuité) sur un million d'années. Ce pourcentage est d'environ 15 % pour le chlore 36 et le sélénium 79.

Les résultats illustrent également, à partir d'une conductivité hydraulique de 10^{-6} m.s^{-1}, un comportement « asymptotique » des fractions de l'inventaire initial sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Pour les deux valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées considérées (10^{-6} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1}), environ 60 % de l'inventaire initial en iode 129 du quartier de stockage MA-VL atteint le mur de la couche du Callovo-Oxfordien (principalement par la discontinuité) sur un million d'années. Ce pourcentage est d'environ 45 % pour le chlore 36 et le sélénium 79.

Tableau 9-17 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : inventaire sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (discontinuité comprise), cumulé sur un million d'années, rapporté à l'inventaire du quartier de stockage MA-VL, en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité retenue, pour chacun des trois radionucléides considérés*

	SEN – situation de référence	Scénario *What-if* avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure)			
		$K = 10^{-8}$ m.s^{-1}	$K = 10^{-7}$ m.s^{-1}	$K = 10^{-6}$ m.s^{-1}	$K = 10^{-5}$ m.s^{-1}
Radionucléide	Inventaire sortant au mur du Callovo-Oxfordien sur 1 million d'années/inventaire du quartier de stockage MA-VL (%)				
^{129}I	11 %	31 %	57 %	62 %	63 %
^{36}Cl	7 %	16 %	38 %	45 %	45 %
^{79}Se	2 %	13 %	36 %	43 %	44 %

9.3.3.1.3 Les incidences radiologiques à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »

Les débits molaires sortant par la discontinuité non détectée au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (présentés à la figure 9-25 du chapitre 9.3.3.1.2 du présent volume servent de données d'entrée aux évaluations conduites à l'échelle du milieu géologique (formations encaissantes inférieures), utilisant le modèle hydrogéologique et de transfert des solutés mis en œuvre pour la situation de référence du scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 5.2.7.2 du présent volume).

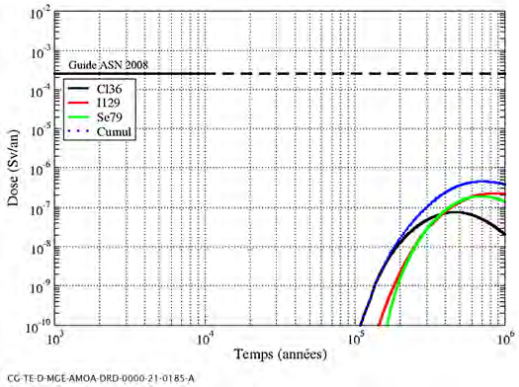
Les graphes de la figure 9-26 ci-après présentent les historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les trois radionucléides considérés, pour (i) la situation de référence du SEN (rappel du résultat SEN), et (ii) le scénario *What-if* de discontinuité non détectée et non traversante interceptant les quatre alvéoles MA-VL les plus chargés, pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée, la classe d'âge « adulte », et pour les différentes valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité considérées.

Le tableau 9-18 présente les valeurs maximales des doses et les dates d'occurrence de ces doses maximales pour (i) la situation de référence du SEN (rappel du résultat du SEN), et (ii) le scénario *What-if* de discontinuité non détectée (discontinuité non traversante), pour les trois radionucléides et les quatre valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité considérées.

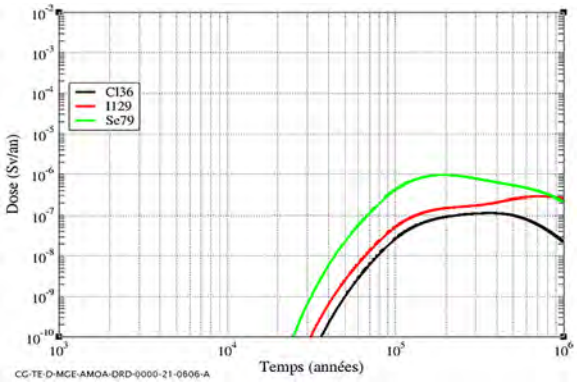
Pour le scénario *What-if* d'une discontinuité non détectée et non traversante (limitée à la garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien), et en considérant les deux valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées étudiées (10^{-6} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1}), la dose maximale du sélénium 79 (principal radionucléide contributeur en *What-if*) à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » est de l'ordre de 0,007 mSv.an^{-1} à environ 100 000 ans. Ce niveau de dose maximale reste ainsi très inférieur aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes (cf. Chapitre 1.3 du présent volume).

Historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »

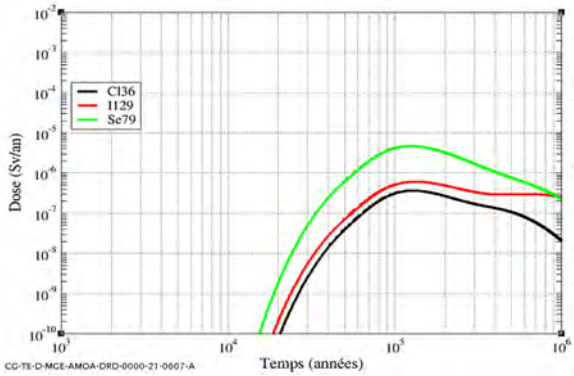
SEN (absence de discontinuité)



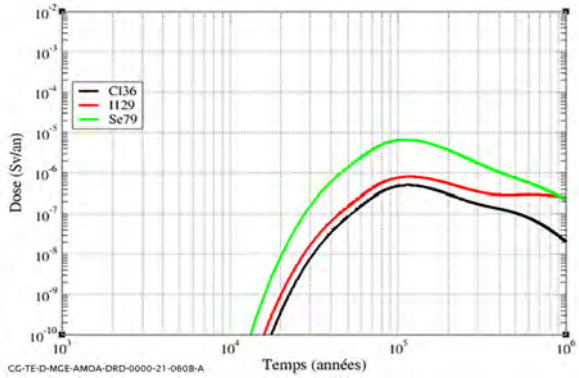
Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-8}$ m.s^{-1})



Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-7}$ m.s^{-1})



Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-6}$ m.s^{-1})



Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-5}$ m.s^{-1})

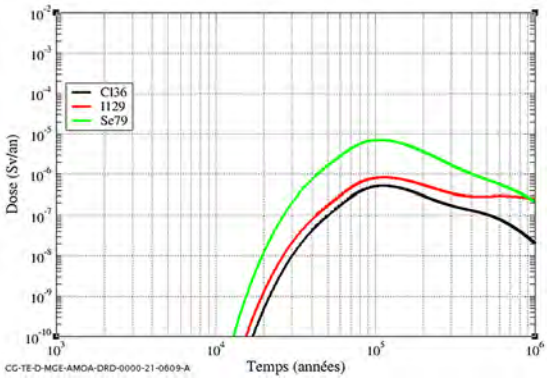


Figure 9-26 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée, la classe d'âge « adulte », pour la situation de référence du le scénario d'évolution normale, et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)*

Tableau 9-18 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » et dates d'occurrence de ces doses maximales, pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée et la classe d'âge « adulte », en SEN et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)*

	SEN – situation de référence		Scénario *What-if* avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure)							
			$K = 10^{-8}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-7}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-6}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-5}$ m.s^{-1}	
Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de la dose max. (an)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de la dose max. (an)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de la dose max. (an)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de la dose max. (an)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de la dose max. (an)
^{129}I	$2,2 \times 10^{-4}$	$8,6 \times 10^{5}$	$2,8 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{5}$	$6,0 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{5}$	$8,0 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{5}$	$8,3 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{5}$
^{36}Cl	$7,7 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{5}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{5}$	$3,6 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{5}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{5}$	$5,2 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{5}$
^{79}Se	$1,9 \times 10^{-4}$	$6,9 \times 10^{5}$	$9,5 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{5}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{5}$	$6,6 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{5}$	$7,0 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{5}$

9.3.3.2 Le scénario *What-if* d'une discontinuité non détectée postulée traversant toute la couche du Callovo-Oxfordien

9.3.3.2.1 Le comportement hydraulique

La figure 9-27 présente les champs des pertes de charges hydrauliques (différences de charges hydrauliques par rapport à celles de la situation de référence du SEN) dans un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage, pour le scénario *What-if* avec discontinuité non détectée et traversante, pour les quatre valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité considérées (cf. Chapitre 9.3.2.3 du présent volume).

Ces pertes de charges sont inférieures au mètre pour la conductivité hydraulique minimale dans la discontinuité (10^{-8} m.s^{-1}). Cependant, elles augmentent peu avec la conductivité hydraulique et se stabilisent à environ 1,5 m pour les valeurs élevées de la conductivité hydraulique (10^{-6} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1}).

Comme pour le scénario *What-if* d'une discontinuité non détectée et non traversante exposée au chapitre 9.3.3.1.1 du présent volume, le champ des pertes de charges hydrauliques obtenu met en évidence une influence hydraulique de la discontinuité s'étendant à tout le quartier de stockage MA-VL pour les conductivités hydrauliques les plus élevées, avec une perte de charge uniforme dans l'ensemble du quartier (galeries, alvéoles de stockage, Callovo-Oxfordien (sain ou endommagé) entre alvéoles).

Le tableau 9-19 présente les débits d'eau drainés par la discontinuité non détectée et traversante en fonction de sa conductivité hydraulique.

Les débits d'eau drainés augmentent en proportion de la conductivité hydraulique pour une discontinuité traversante (comme la vitesse de Darcy dans la discontinuité), car ils sont dans ce cas directement alimentés depuis l'Oxfordien. Ce n'était pas le cas pour une discontinuité non traversante restreinte à la partie inférieure du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 9.3.3.1.1 du présent volume), scénario pour lequel la limitation du débit d'eau provenait de l'alimentation par le Callovo-Oxfordien.

Tableau 9-19 Évolution du débit d'eau drainé par la discontinuité non détectée postulée et traversante en fonction de sa conductivité hydraulique

Conductivité hydraulique de la discontinuité (m.s^{-1})	Débit d'eau drainé par la discontinuité (L.an^{-1})
10^{-8}	156
10^{-7}	1 216
10^{-6}	10 685
10^{-5}	103 600

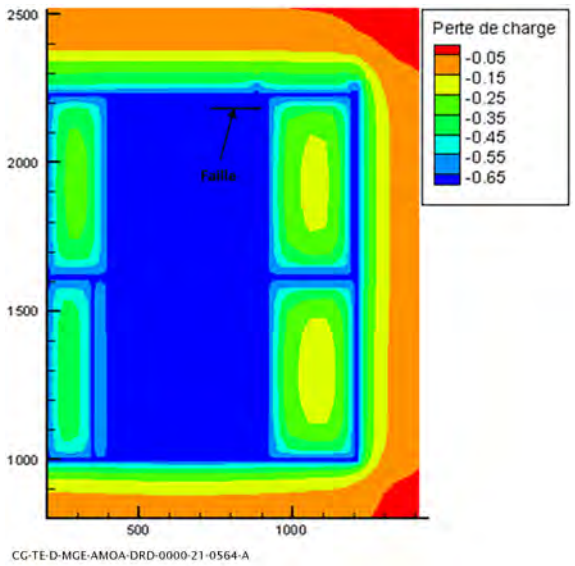
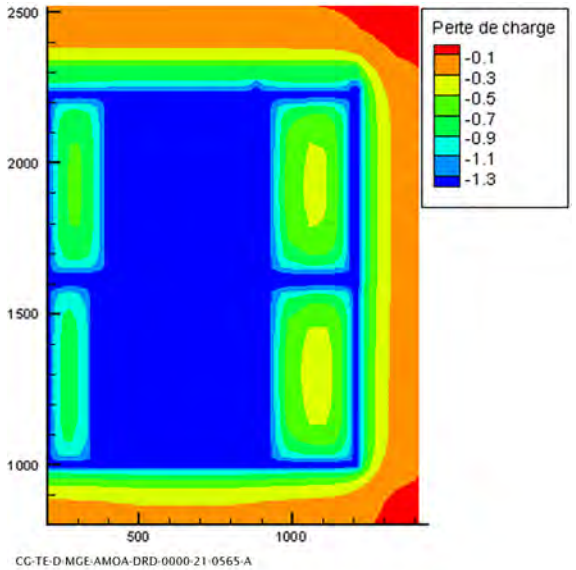
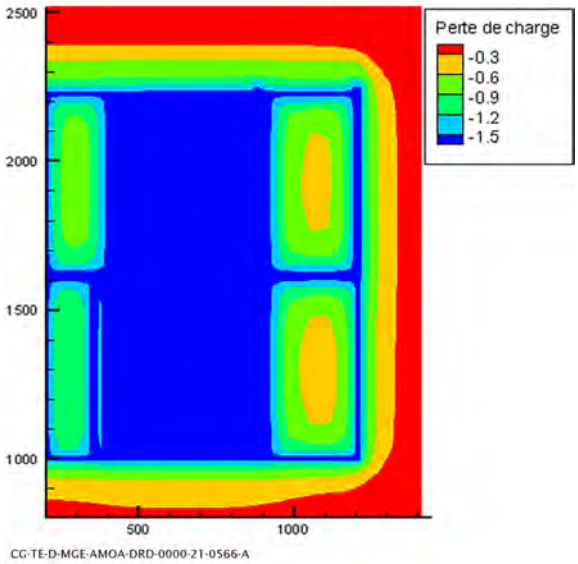
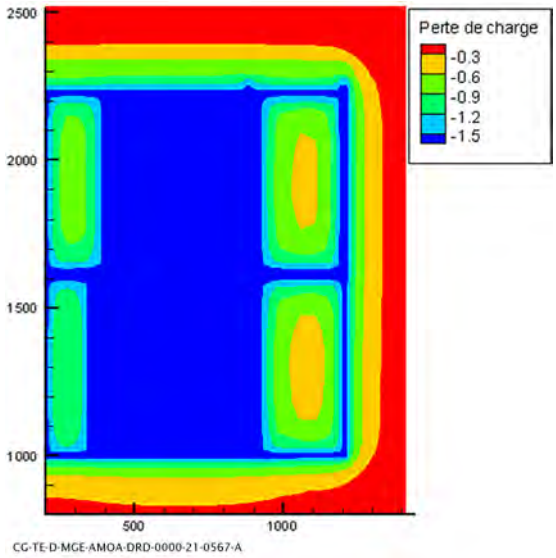
Pertes de charges hydrauliques dans le plan horizontal traversant les ouvrages de stockage	
Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-8}$ m.s^{-1})	Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-7}$ m.s^{-1})
	
Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-6}$ m.s^{-1})	Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-5}$ m.s^{-1})
	

Figure 9-27 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante - quartier de stockage MA-VL : champ des pertes de charges hydrauliques (en mètres) induites par la discontinuité selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)*

9.3.3.2.2 Le transfert des radionucléides dans le système de stockage, par la discontinuité non détectée postulée et dans la couche du Callovo-Oxfordien

Les graphes de la figure 9-28 présentent pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79, les historiques des débits molaires sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien par la discontinuité non détectée postulée et traversante, pour les quatre valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité considérées.

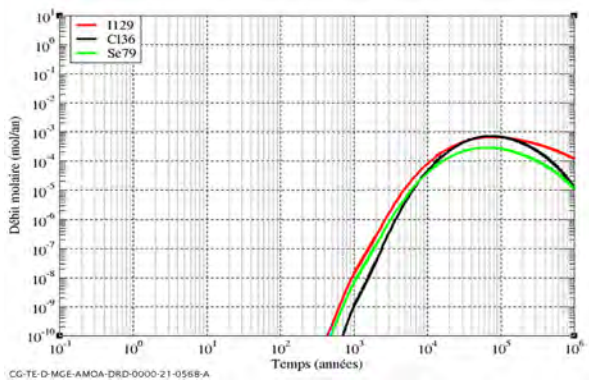
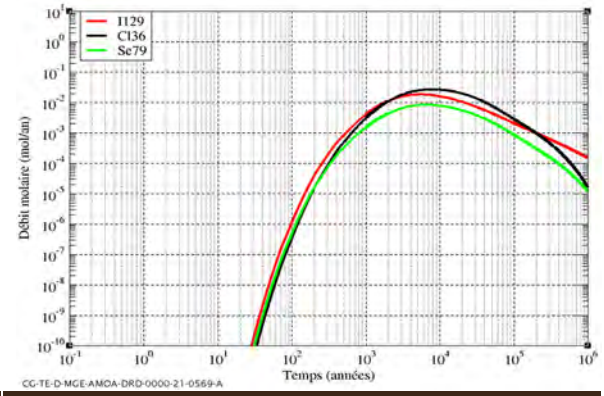
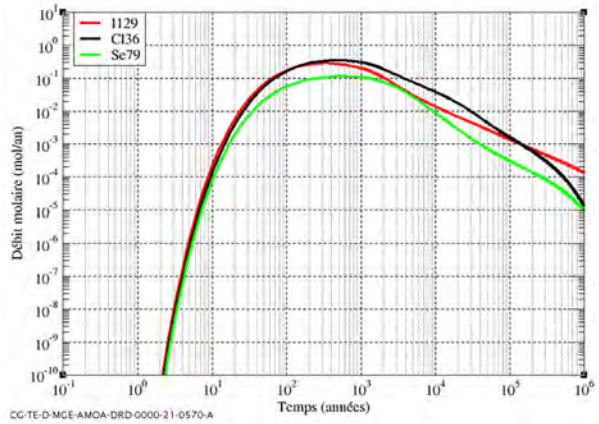
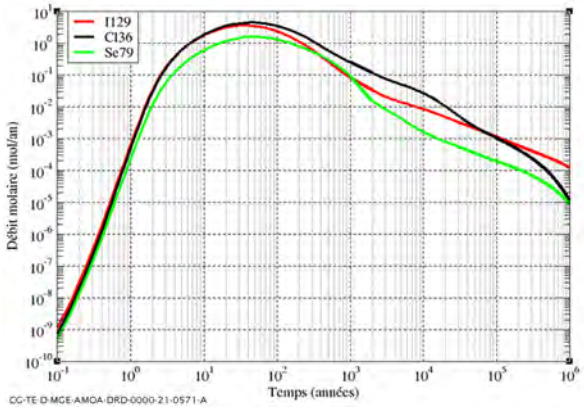
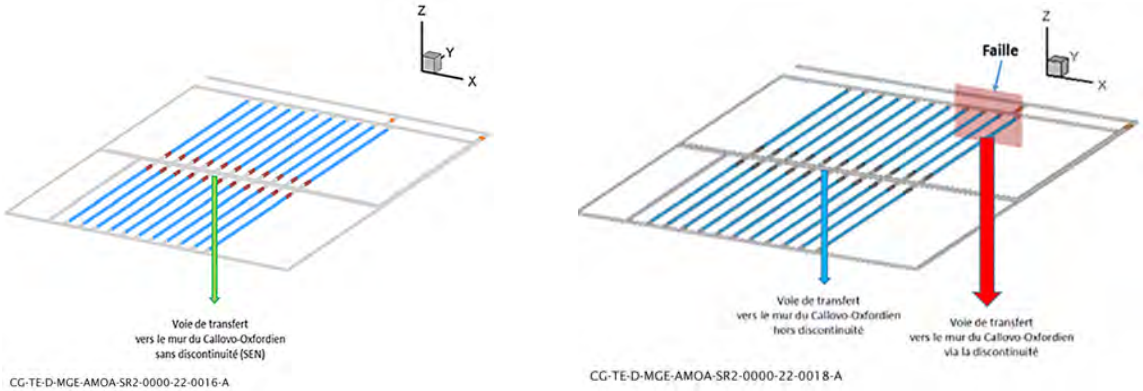
Historiques des débits molaires en sortie de discontinuité au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	
Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-8}$ m.s^{-1})	Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-7}$ m.s^{-1})
	
Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-6}$ m.s^{-1})	Scénario *What-if* avec discontinuité ($K = 10^{-5}$ m.s^{-1})
	

Figure 9-28 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante : historiques des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, en sortie de la discontinuité (au mur de la couche du Callovo-Oxfordien) pour les quatre valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité considérées*

Les graphes de la figure 9-29 présentent pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79, les historiques des débits molaires sortant au droit du quartier de stockage MA-VL au mur de la couche du Callovo-Oxfordien selon les deux voies de transfert (débit molaire capté par la discontinuité[104] non détectée et traversante et débit molaire migrant à travers la couche du Callovo-Oxfordien (hors discontinuité) et situent ces voies de transfert par rapport à celle obtenue pour le SEN, pour les deux bornes de la gamme de valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité étudiée (10^{-8} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1}).

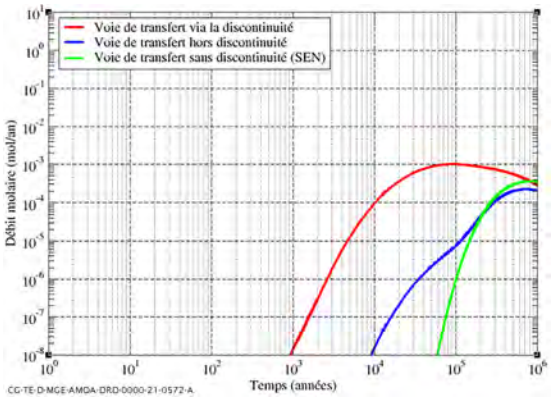
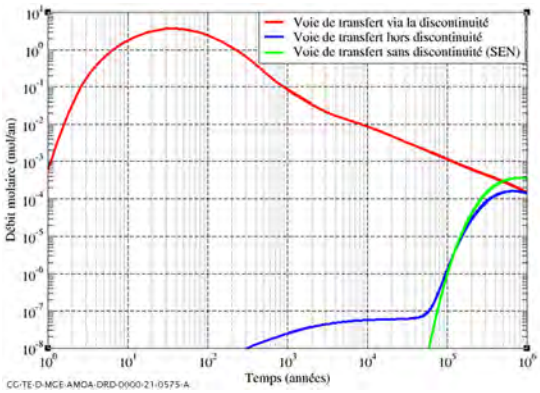
Historiques des débits molaires issus du quartier de stockage MA-VL au mur de la couche du Callovo-Oxfordien



Couleur verte : SEN (absence de discontinuité) - voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien

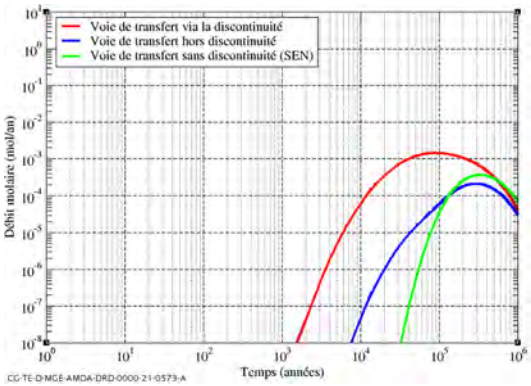
Couleur bleue : Scénario *What-if* avec discontinuité non détectée postulée – voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien (hors discontinuité)

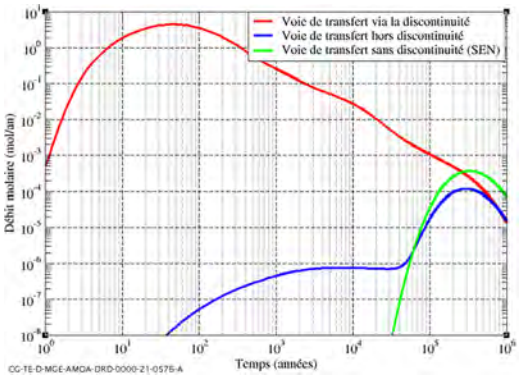
Couleur rouge : Scénario *What-if* avec discontinuité non détectée postulée – voie de transfert par la discontinuité

K = 10^{-8} m.s^{-1} (conductivité hydraulique minimale)	K = 10^{-5} m.s^{-1} (conductivité hydraulique maximale)
Iode 129	
	

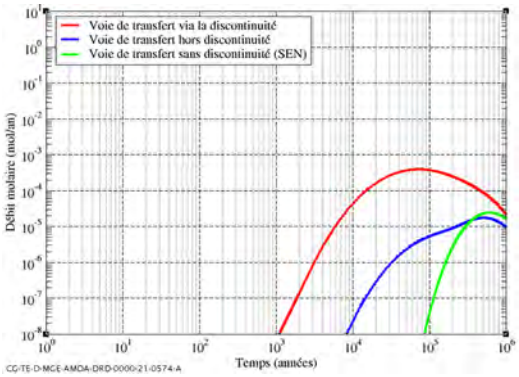
[104] Les courbes de débit molaire sortant par la discontinuité non détectée (couleur rouge sur les graphes de la figure 9-29) tiennent compte du transfert des radionucléides par diffusion latérale de part et d'autre des alvéoles interceptés et de la discontinuité.

Chlore 36





Sélénium 79



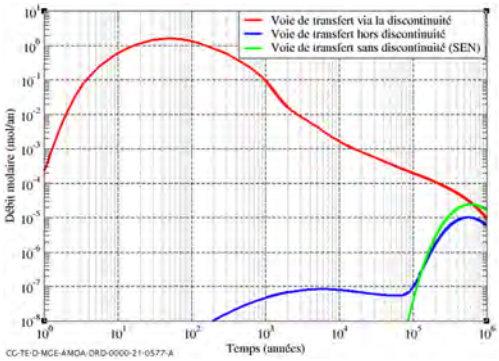


Figure 9-29 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante - quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, par la discontinuité et par la couche du Callovo-Oxfordien, pour les deux bornes de la gamme de valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité étudiée (10^{-8} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1})*

Le tableau 9-20 ci-après présente les débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (au droit du quartier de stockage MA-VL, discontinuité non détectée postulée comprise) et les dates d'occurrence de ces débits maximaux pour la situation de référence du SEN et pour le scénario *What-if* d'une discontinuité non détectée et traversante, pour les trois radionucléides et les quatre valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité considérés.

Tableau 9-20 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante : débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien et dates d'occurrence de ces débits maximaux, en SEN et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)*

	SEN – situation de référence		Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante							
			$K = 10^{-8}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-7}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-6}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-5}$ m.s^{-1}	
Radionucléide	Débit max. (mol.an^{-1})	Date du débit max. (an)	Débit max. (mol.an^{-1})	Date du débit max. (an)	Débit max. (mol.an^{-1})	Date du débit max. (an)	Débit max. (mol.an^{-1})	Date du débit max. (an)	Débit max. (mol.an^{-1})	Date du débit max. (an)
^{129}I	$3,8 \times 10^{-4}$	$7,8 \times 10^{5}$	$9,9 \times 10^{-4}$	$9,3 \times 10^{4}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^{3}$	$2,9 \times 10^{-1}$	$3,1 \times 10^{2}$	$3,7 \times 10^{0}$	$3,5 \times 10^{1}$
^{36}Cl	$4,0 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{5}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$9,6 \times 10^{4}$	$2,9 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{3}$	$3,6 \times 10^{-1}$	$4,4 \times 10^{2}$	$4,5 \times 10^{0}$	$4,2 \times 10^{1}$
^{79}Se	$2,7 \times 10^{-5}$	$5,8 \times 10^{5}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$7,4 \times 10^{4}$	$8,7 \times 10^{-3}$	$6,6 \times 10^{3}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$5,3 \times 10^{2}$	$1,6 \times 10^{0}$	$5,0 \times 10^{1}$

L'analyse des résultats présentés ci-avant (cf. Figure 9-28, figure 9-29 et tableau 9-20) montre que :

- globalement, les débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien augmentent en ordre de grandeur en proportion de la conductivité hydraulique et les dates d'occurrence des débits molaires maximaux sont réduites en conséquence, jusqu'à seulement quelques dizaines d'années après la fermeture du stockage pour la conductivité hydraulique maximale (10^{-5} m.s^{-1}) ;
- pour une conductivité hydraulique de discontinuité de 10^{-8} m.s^{-1}, la discontinuité seule (toutes choses égales par ailleurs) induit une augmentation des débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien d'un facteur environ deux (par rapport au SEN) pour l'iode 129, environ trois pour le chlore 36 et environ 10 pour le sélénium 79, et les dates d'occurrence des débits molaires maximaux sont de l'ordre de 100 000 ans (plus précoces qu'en situation de référence du SEN de l'ordre de 700 000 ans) ;
- l'augmentation de la conductivité hydraulique dans la discontinuité induit, par rapport au cas 10^{-8} m.s^{-1}, une augmentation supplémentaire des débits molaires maximaux d'un facteur environ 20 (pour une conductivité hydraulique de 10^{-7} m.s^{-1}) à 300 (pour une conductivité hydraulique de 10^{-6} m.s^{-1}). Une conductivité hydraulique de 10^{-5} m.s^{-1} induit, par rapport au cas 10^{-6} m.s^{-1}, une augmentation des débits molaires maximaux d'environ un facteur 12 à 15 supplémentaire. Pour cette conductivité hydraulique maximale de 10^{-5} m.s^{-1}, les débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien sont multipliés par un facteur environ 10 000 pour l'iode 129 et le chlore 36 et environ 60 000 pour le sélénium 79 (par rapport au SEN), et sont atteints avant 50 ans.

Le tableau 9-21 présente, pour chacun des trois radionucléides considérés, et en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée retenue, la fraction de l'inventaire initial des quatre alvéoles interceptés (et celle de l'inventaire initial du quartier de stockage MA-VL), qui sort **au mur de la couche du Callovo-Oxfordien par la discontinuité**, cumulé sur un million d'années.

La fraction de l'inventaire en radionucléides des quatre alvéoles interceptés en radionucléides qui sortent au mur du Callovo-Oxfordien par la discontinuité non détectée postulée et traversante sur un million d'années, est de l'ordre de 15 % à 30 % pour une conductivité hydraulique de 10^{-8} m.s^{-1} dans la discontinuité.

Pour la valeur de conductivité hydraulique la plus élevée considérée (10^{-5} m.s^{-1}), environ 80 % de l'inventaire initial des quatre alvéoles interceptés en iode 129, en chlore 36 et en sélénium 79, atteint le mur de la couche du Callovo-Oxfordien sur un million d'années par la discontinuité.

Tableau 9-21 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante : inventaire sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien par la discontinuité, cumulé sur un million d'années, rapporté à l'inventaire initial des quatre alvéoles interceptés, en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité retenue, pour chacun des trois radionucléides considérés*

	Scénario *What-if* avec discontinuité non détectée postulée et traversante			
	K = 10^{-8} m.s^{-1}	K = 10^{-7} m.s^{-1}	K = 10^{-6} m.s^{-1}	K = 10^{-5} m.s^{-1}
Radionucléide	Inventaire sortant par la discontinuité sur 1 million d'années/inventaire des 4 alvéoles interceptés (%)			
^{129}I	31 %	65 %	73 %	78 %
^{36}Cl	17 %	57 %	75 %	83 %
^{79}Se	16 %	55 %	73 %	80 %

Le tableau 9-22 présente, pour chacun des trois radionucléides considérés, et en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée retenue, la fraction de l'inventaire initial du quartier de stockage MA-VL qui sort **au mur du Callovo-Oxfordien (discontinuité comprise)**, cumulé sur un million d'années.

Pour la conductivité hydraulique minimale de 10^{-8} m.s^{-1} dans la discontinuité non détectée retenue, environ 30 % de l'inventaire en iode 129 du quartier de stockage MA-VL atteint le mur de la couche du Callovo-Oxfordien (principalement par la discontinuité) sur un million d'années. Ce pourcentage est d'environ 20 % pour le chlore 36 et 15 % pour le sélénium 79.

Pour les valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées considérées (10^{-6} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1}), environ les deux tiers de l'inventaire initial du quartier de stockage MA-VL en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 atteint le mur de la couche du Callovo-Oxfordien (discontinuité comprise) sur un million d'années, soit en moyenne environ 30 % de plus (de 10 % à 50 % selon le radionucléide) que dans le cas d'une discontinuité non détectée et non traversante (cf. Chapitre 9.3.3.1 du présent volume).

Tableau 9-22 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante : inventaire sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (discontinuité comprise), cumulé sur un million d'années, rapporté à l'inventaire du quartier de stockage MA-VL, en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité retenue, pour chacun des trois radionucléides considérés*

	SEN – situation de référence	Scénario *What-if* avec discontinuité non détectée postulée et traversante			
		K = 10^{-8} m.s^{-1}	K = 10^{-7} m.s^{-1}	K = 10^{-6} m.s^{-1}	K = 10^{-5} m.s^{-1}
Radionucléide	Inventaire sortant au mur du Callovo-Oxfordien sur 1 million d'années/inventaire du quartier de stockage MA-VL (%)				
^{129}I	11 %	32 %	58 %	65 %	68 %
^{36}Cl	7 %	18 %	51 %	66 %	73 %
^{79}Se	2 %	14 %	47 %	61 %	67 %

9.3.3.2.3 Les incidences radiologiques à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »

Les débits molaires sortant par la discontinuité non détectée postulée au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (présentés à la figure 9-29 du chapitre 9.3.3.2.3 du présent volume) servent de données d'entrée aux évaluations conduites à l'échelle du milieu géologique (formations encaissantes inférieures), utilisant le modèle hydrogéologique et de transfert des solutés mis en œuvre pour la situation de référence du scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 5.2.7.2 du présent volume).

Les graphes de la figure 9-30 ci-après présentent les historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les trois radionucléides considérés, pour (i) la situation de référence du SEN (rappel du résultat SEN), et (ii) le scénario *What-if* de discontinuité non détectée postulée et traversante interceptant les quatre alvéoles MA-VL les plus chargés, pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée, la classe d'âge « adulte », et pour les différentes valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité considérées.

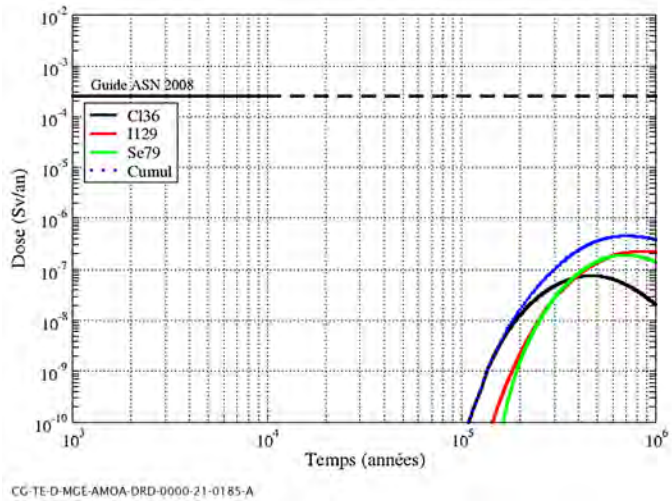
Le tableau 9-23 présente les valeurs maximales des doses et les dates d'occurrence de ces doses maximales pour (i) la situation de référence du SEN (rappel du résultat SEN), et (ii) le scénario *What-if* de discontinuité non détectée (discontinuité traversante), pour les trois radionucléides et les quatre valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité considérées.

Pour le scénario *What-if* d'une discontinuité non détectée traversant la couche du Callovo-Oxfordien, et en considérant les deux valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées étudiées (10^{-6} et 10^{-5} $m.s^{-1}$) :

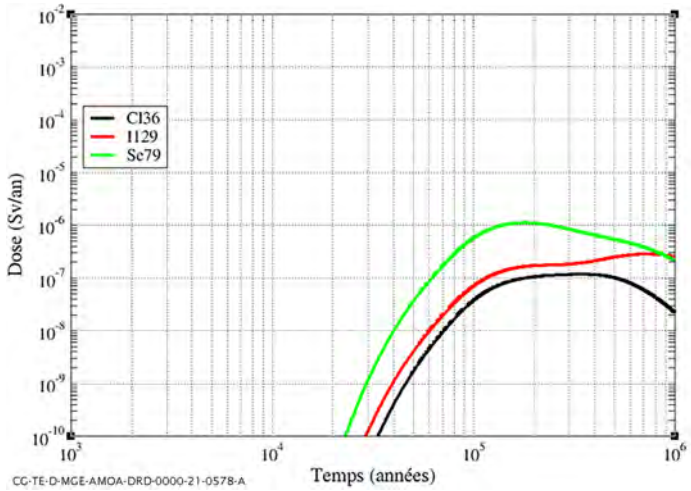
- les doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » relatives aux trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), sont plus élevées d'un facteur 3 à 4 par rapport à celles du scénario *What-if* d'une discontinuité non détectée et non traversante (limitée à la garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) ;
- la dose maximale du sélénium 79 (principal radionucléide contributeur en *What-if*) à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » est de l'ordre de 0,025 $mSv.an^{-1}$ à environ à 70 000 ans. Ce niveau de dose maximale reste ainsi très inférieur aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes (cf. Chapitre 1.3 du présent volume).

Historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »

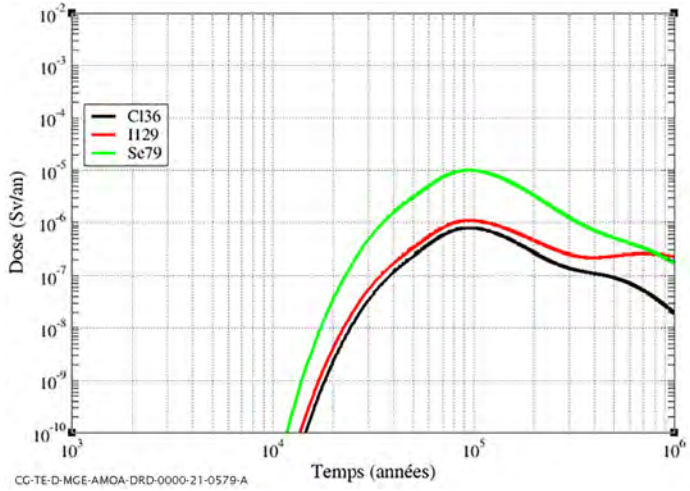
SEN (absence de discontinuité)



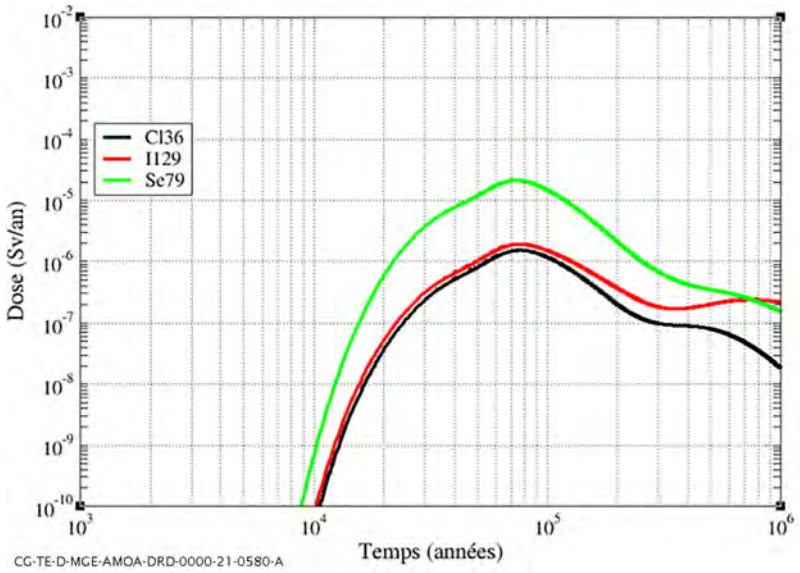
What-if avec discontinuité (K=10^{-8} m.s^{-1})



What-if avec discontinuité (K=10^{-7} m.s^{-1})



What-if avec discontinuité (K=10^{-6} m.s^{-1})	*What-if* avec discontinuité (K=10^{-5} m.s^{-1})



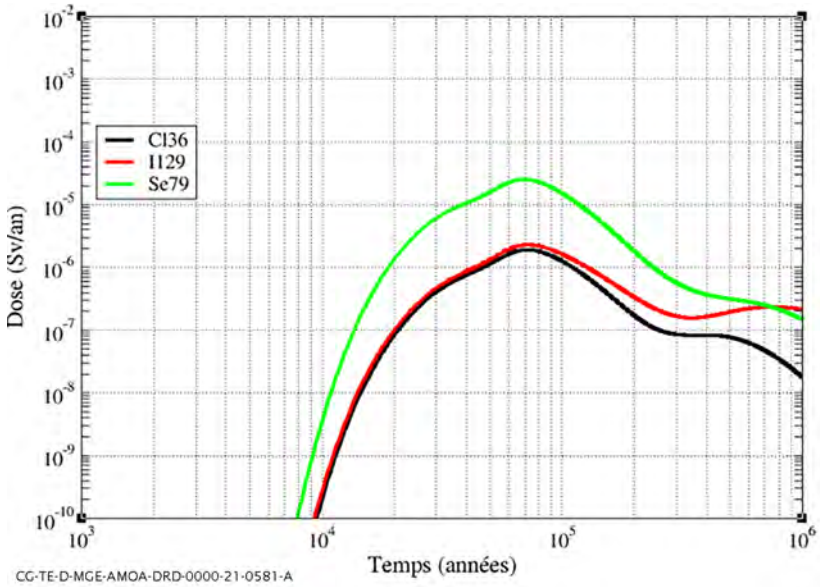


Figure 9-30 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée et traversante : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée, la classe d'âge « adulte », pour le scénario d'évolution normale, et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)*

Tableau 9-23 *Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante : doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » et dates d'occurrence de ces doses maximales, pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée et la classe d'âge « adulte », en SEN et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)*

	SEN – situation de référence		Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante							
			$K = 10^{-8}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-7}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-6}$ m.s^{-1}		$K = 10^{-5}$ m.s^{-1}	
Radionucléide	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de la dose max. (an)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de la dose max. (an)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de la dose max. (an)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de la dose max. (an)	Dose max. (mSv.an^{-1})	Date de la dose max. (an)
^{129}I	$2,2 \times 10^{-4}$	$8,6 \times 10^{5}$	$2,8 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{5}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$9,5 \times 10^{4}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$7,6 \times 10^{4}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$7,2 \times 10^{4}$
^{36}Cl	$7,7 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{5}$	$1,2 \times 10^{-4}$	$3,4 \times 10^{5}$	$7,9 \times 10^{-4}$	$9,5 \times 10^{4}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$7,6 \times 10^{4}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$7,2 \times 10^{4}$
^{79}Se	$1,9 \times 10^{-4}$	$6,9 \times 10^{5}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{5}$	$9,9 \times 10^{-3}$	$9,5 \times 10^{4}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$7,4 \times 10^{4}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$7,0 \times 10^{4}$

9.4 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios *What-if*

9.4.1 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface

Pour mémoire, les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface (scellements des liaisons surface-fond uniquement, scellements des galeries uniquement ou tous les scellements) visent à évaluer l'influence de la perte potentielle de la fonction de sûreté « s'opposer à la circulation de l'eau » et de la dégradation de la fonction « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques ».

Ces scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface sont représentés par le choix de paramètres hydrodispersifs « conservatifs » : noyau assimilé à un remblai et une mauvaise interface avec la couche du Callovo-Oxfordien. Chaque scénario fait l'objet de deux évaluations reprenant respectivement les hypothèses et données des situations de référence et enveloppe du SEN, à l'exception des paramètres hydrauliques relatifs aux interfaces et noyaux argileux des scellements[105] (cf. Chapitre 9.1.1 du présent volume synthétisant la description de ces scénarios).

Les indicateurs retenus pour l'évaluation de l'influence du dysfonctionnement des scellements sont :

- les débits d'eau sortant des liaisons surface-fond et les vitesses d'écoulement de l'eau dans les ouvrages souterrains ;
- les débits molaires sortant par la voie « ouvrage » (galeries et liaisons surface-fond) et les débits molaires sortant par la couche du Callovo-Oxfordien.

La dose aux exutoires est évaluée pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements basés sur la situation enveloppe (cf. Chapitre 9.1.2.3.2 du présent volume), les résultats des indicateurs intermédiaires de débits molaires sortant par la couche du Callovo-Oxfordien étant significativement différents de ceux du SEN dans ce cas (cf. Chapitre 9.1.2.2 du présent volume).

9.4.1.1 Les enseignements relatifs au comportement hydraulique du système de stockage

Du point de vue du comportement hydraulique (vitesses d'écoulement et débits d'eau dans les ouvrages souterrains), en relation avec la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau », en cas de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface, les enseignements sont similaires à ceux des SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface (cf. Chapitre 8.3.1 du présent volume), c'est-à-dire que les effets sur le régime hydraulique dans les ouvrages souterrains restent limités, du fait :

- de conditions hydrauliques favorables du Callovo-Oxfordien (faibles gradients de charge et faibles perméabilités) ;
- de choix de conception de l'architecture limitant les écoulements au sein des ouvrages souterrains, en particulier la disposition groupée des liaisons surface-fond (puits et base des descenderies), la borgnitude des quartiers de stockage et la longueur des alvéoles de stockage ;

[105] Dans la définition de ces scénarios de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface, seuls les paramètres des interfaces et des noyaux sont modifiés par rapport au SEN, et notamment leurs performances hydrauliques.

- un écoulement lent dans les galeries du stockage, orienté depuis les quartiers au sud du stockage (MA-VL) vers les quartiers au nord du stockage (HA), en lien avec le faible gradient de charge hydraulique horizontal dans l'Oxfordien.

Les lignes de défense citées précédemment contribuent ainsi à la robustesse du système de stockage en cas de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface.

En effet, en cas de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond ou de tous les scellements, par le noyau argileux et par l'interface, les vitesses d'écoulement de l'eau dans les ouvrages souterrains (notamment en sortie du quartier de stockage MA-VL le plus sollicité du point de vue hydraulique) sont augmentées par rapport à celles du SEN, d'environ un ordre de grandeur pour les évaluations basées sur la situation de référence et pour celles basées sur la situation enveloppe. Les débits d'eau en sortie des liaisons surface-fond sont augmentés par rapport à ceux du SEN, d'environ 3 ordres de grandeur pour les évaluations basées sur la situation de référence et d'environ 2 ordres de grandeur pour celles basées sur la situation enveloppe (cf. Tableau 9-3 du chapitre 9.1.2.1.3 du présent volume). Ces niveaux de débits d'eau, d'environ un ordre de grandeur supérieur à ceux obtenus pour les SEA de dysfonctionnement des scellements par leur interface, illustrent le rôle hydraulique des noyaux des scellements des liaisons surface-fond.

L'influence limitée de l'augmentation des vitesses d'écoulement et des débits d'eau en cas de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface s'évalue également par l'analyse des débits de radionucléides (cf. Chapitre 9.4.1.2 du présent volume), en lien avec la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques ».

9.4.1.2 Les enseignements relatifs au transfert des radionucléides

Les enseignements présentés ci-après sont pour l'essentiel axés sur l'analyse des résultats obtenus pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), c'est-à-dire les trois radionucléides prépondérants issus des évaluations du SEN (cf. Chapitres 6.2 et 6.3 du présent volume). Le transfert des radionucléides peu à très peu mobiles n'est pas modifié par le dysfonctionnement des scellements, par rapport au SEN, du fait de leur sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien, entraînant des échanges de masse importants entre les ouvrages souterrains (alvéoles de stockage, galeries) et la couche du Callovo-Oxfordien, et permettant ainsi de retenir ces radionucléides dans les premiers mètres de la couche du Callovo-Oxfordien.

La comparaison du comportement du stockage à travers l'analyse de l'évolution des débits molaires de radionucléides en sortie des liaisons surface-fond, entre le scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond uniquement et celui de dysfonctionnement des scellements des galeries uniquement, souligne le rôle de chaque groupe de scellements (efficaces), en regard du dysfonctionnement de l'autre groupe de scellements par le noyau argileux et par l'interface.

9.4.1.2.1 La redondance entre le groupe de scellements des galeries et celui des liaisons surface-fond

En se basant sur la situation de référence, les historiques des débits molaires des trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) en sortie des liaisons surface-fond (au toit du Callovo-Oxfordien) montrent la redondance entre les scellements des liaisons surface-fond et les scellements des galeries : les débits molaires maximaux en sortie des puits et descenderies sont du même ordre de grandeur pour les deux scénarios de dysfonctionnement. En relatif, l'efficacité de l'un ou l'autre des groupes de scellements des liaisons surface-fond et des galeries, permet (cf. Les graphes de gauche des figure 9-12, figure 9-13 et figure 9-14 du chapitre 9.1.2.2 du présent volume) :

- d'atténuer le maximum de débit molaire des trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) en sortie des liaisons surface-fond de deux à trois ordres de grandeur par rapport au scénario de dysfonctionnement de tous les scellements ;
- de garantir que la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste toujours la voie de transfert dominante.

Aussi, lorsque les sollicitations hydrauliques des scellements sont celles de la situation de référence, la redondance du groupe de scellements (scellements des galeries et scellements des liaisons surface-fond) est assurée : l'efficacité de l'un ou l'autre groupe de scellements permet de compenser le dysfonctionnement par le noyau et par l'interface de l'autre groupe, et de garantir que la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert principale.

9.4.1.2.2 Le rôle du groupe de scellements des liaisons surface-fond

En se basant sur la situation enveloppe, comme pour les SEA de dysfonctionnement, lorsque les scellements sont soumis à des sollicitations hydrauliques plus importantes (perméabilité et gradient de charge « conservatifs »), associés à des conductivités hydrauliques « conservatives » de la ZFC dans l'Unité Argileuse, le rôle des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) devient nettement supérieur à celui des scellements des galeries.

En effet, les résultats (cf. Les graphes de droite des figure 9-12, figure 9-13 et figure 9-14 du chapitre 9.1.2.2 du présent volume) montrent que lorsque les scellements des liaisons surface-fond sont dysfonctionnants par le noyau argileux et par l'interface, les débits molaires maximaux des trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) en sortie des liaisons surface-fond sont de trois à quatre ordres de grandeur supérieurs à ceux d'une configuration avec tous scellements efficaces (SEN) et similaires à ceux obtenus en considérant le dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface (*What-if*).

Ces mêmes résultats montrent également que lorsque les scellements des galeries sont dysfonctionnants par le noyau argileux et par l'interface, les débits molaires maximaux des trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) en sortie des liaisons surface-fond ne sont supérieurs que d'environ un ordre de grandeur à ceux d'une configuration avec tous scellements efficaces (SEN). Cet effet très limité souligne le rôle de redondance assuré par les scellements des liaisons surface-fond.

9.4.1.2.3 Le rôle de l'architecture de stockage

En se basant sur la situation de référence, du fait de conditions hydrauliques favorables du Callovo-Oxfordien (faibles gradients de charge et perméabilités), associées à des choix de conception de l'architecture limitant les écoulements au sein des ouvrages souterrains (regroupement des liaisons surface-fond à leur base, borgnitude des quartiers de stockage, longueur des alvéoles…), seulement 1 % de l'inventaire total initial en iode 129 (provenant essentiellement des colis de déchets MA-VL) atteint, sur le million d'années, les liaisons surface-fond, lorsque les noyaux argileux et les interfaces de tous les scellements sont dysfonctionnants.

Pour tous les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements par leur noyau argileux et par leur interface et quelle que soit la situation du SEN retenue comme base d'évaluation, le transfert des radionucléides depuis les alvéoles de stockage vers les galeries reste limité. En effet, la longueur des alvéoles et celle des galeries offrent une grande surface d'échanges avec le Callovo-Oxfordien. Le transfert des radionucléides dans les galeries depuis les sorties d'alvéoles vers la base des liaisons surface-fond permet ainsi une atténuation et un retard des débits de radionucléides en sortie des liaisons surface-fond (au niveau du toit du Callovo-Oxfordien) sur les quelques centaines de mètres de transfert. À titre illustratif, en se basant sur la situation de référence du SEN, le débit molaire maximal d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond est atténué d'environ deux ordres de grandeur uniquement par le transfert de l'iode depuis les quartiers de stockage vers les liaisons surface-fond (cf. Figure 9-11 du chapitre 9.1.2.2.1 du présent volume). Cela illustre la robustesse du système de stockage après fermeture en particulier du fait des choix de conception de l'architecture, dont sa borgnitude, la disposition groupée des liaisons surface-fond et les longueurs des alvéoles de stockage, contribuant à atténuer le transfert en solution dans les ouvrages souterrains.

9.4.1.2.4 L'influence sur les incidences sanitaires sur l'homme

À l'exception des scénarios *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements ou des scellements des liaisons surface-fond uniquement, basés sur la situation enveloppe, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert principale, et le maximum de débit molaire au toit de la couche du Callovo-Oxfordien reste identique à celui du SEN. Ainsi, dans ces cas, le transfert des radionucléides dans les encaissants supérieurs et la dose aux exutoires n'ont pas été réévalués, car identiques à ceux obtenus en SEN.

Entre les scénarios *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements et celui de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond uniquement, seul le premier scénario, qui s'avère le plus conservatif au regard des débits molaires en sortie des liaisons surface-fond (cf. Figure 9-12), a fait l'objet d'une évaluation du transfert dans les encaissants supérieurs, et des doses aux exutoires d'intérêt concernés (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) »).

Pour le scénario de dysfonctionnement de tous les scellements, les débits molaires des trois anions mobiles à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) en sortie au toit du Kimméridgien, et par conséquent les doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », sont augmentés d'environ 20 % à 35 % selon le radionucléide (cf. Chapitre 9.1.2.3.2 du présent volume).

Pour le scénario de dysfonctionnement de tous les scellements, les débits molaires des trois anions mobiles à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) au niveau de la zone de fracturation diffuse de l'Oxfordien, et par conséquent les doses à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) », sont augmentés d'environ 25 % à 40 % selon le radionucléide (cf. Chapitre 9.1.2.3.2 du présent volume).

Pour l'exutoire « Pompage dans le Barrois », et quel que soit le type de biosphère (tempérée, chaude), les incidences radiologiques associées au groupe de référence « multi-activités » restent principalement pilotées par le sélénium 79, et le chlore 36 dans une moindre mesure. Les valeurs maximales de la dose cumulée, obtenues pour la biosphère chaude, sont d'environ 2×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'adulte, 6×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans, et 8×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an.

Pour l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) », et quel que soit le type de biosphère (tempérée, chaude), les incidences radiologiques associées au groupe de référence « multi-activités » restent pilotées par le sélénium 79. Les valeurs maximales de la dose cumulée, obtenues pour la biosphère chaude, sont d'environ 7×10^{-2} mSv.an^{-1} pour l'adulte, $2{,}5 \times 10^{-1}$ mSv.an^{-1} pour l'enfant de 10 ans, et 3×10^{-1} mSv.an^{-1} pour l'enfant de 1 an.

Ces incidences radiologiques sur la santé de l'homme restent ainsi du même ordre de grandeur que celles obtenues en SEN pour la situation enveloppe (cf. Chapitre 6.3 du présent volume) et sont donc très inférieures aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes (cf. Chapitre 1.3 du présent volume).

Conclusions relatives aux scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements

Pour les scénarios postulés *What-if* de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface, les résultats des évaluations montrent la robustesse du système de stockage par rapport aux fonctions de sûreté « S'opposer à la circulation de l'eau » et « Retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques », du fait :

- des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- des choix de conception de l'architecture limitant les écoulements au sein des ouvrages souterrains, en particulier le regroupement des liaisons surface-fond à leur base, la borgnitude des quartiers de stockage et la longueur des alvéoles de stockage.

Les résultats des évaluations montrent :

- la redondance des deux groupes de scellements (liaisons surface-fond, galeries) pour les scénarios se basant sur la situation de référence du SEN ;
- le rôle important des scellements des liaisons surface-fond pour les scénarios se basant sur la situation enveloppe du SEN, la performance hydraulique des scellements des liaisons surface-fond permettant d'assurer la redondance lorsque les scellements des galeries sont dysfonctionnants. Le dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par le noyau argileux et par l'interface met en exergue le rôle important de l'architecture, en particulier sa borgnitude et le regroupement des liaisons surface-fond à leur base.

Les effets d'un dysfonctionnement des scellements des galeries et/ou des liaisons surface-fond sont limités. Même en cas de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau argileux et par l'interface, l'évolution du régime hydraulique dans le stockage reste limitée par rapport à celle du scénario d'évolution normale.

À l'exception des scénarios *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements ou des scellements des liaisons surface-fond uniquement, basés sur la situation enveloppe du SEN, la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert principale sur toute la durée de l'évaluation, et les débits molaires maximaux au toit de la couche du Callovo-Oxfordien (et donc les incidences sanitaires maximales aux exutoires sur l'homme) restent identiques à ceux du SEN (cf. Chapitres 6.2.2 et 6.3.2 du présent volume).

Pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau argileux et par l'interface, et basé sur la situation enveloppe du SEN uniquement, l'augmentation par rapport au SEN, de la dose annuelle des trois principaux radionucléides mobiles à vie longue, reste limitée, de l'ordre de 20 % à 35 % pour l'exutoire « Pompage dans le Barrois » et de l'ordre de 25 % à 40 % pour l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) ». **Les doses annuelles des radionucléides et la dose cumulée restent ainsi du même ordre de grandeur que celles du SEN, et donc très inférieures aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes (cf. Chapitre 1.3 du présent volume)**.

9.4.2 Les enseignements tirés de l'évaluation du scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA

Pour mémoire, ce scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA vise à évaluer l'influence de l'altération de la fonction de sûreté « limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage ».

Deux évaluations du scénario *What-if* ont été effectuées en considérant comme base de définition du scénario, soit les paramètres de la situation de référence du SEN, soit ceux de la situation enveloppe du SEN. Par ailleurs, ils prennent en compte un relâchement labile des verres pour tous les conteneurs de stockage HA dysfonctionnants.

Les indicateurs retenus pour l'évaluation de l'influence du dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA sont :

- les débits molaires en différents points de la voie « ouvrage » jusqu'en sortie des liaisons surface-fond ;
- les débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien.

Les résultats de ces indicateurs intermédiaires étant identiques à ceux du SEN (cf. Chapitre 1 et chapitre 9.2.2.3 du présent volume), la dose aux exutoires n'est pas évaluée pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA.

L'analyse des résultats du scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA (cf. Chapitre 0 du présent volume) conduit à identifier les enseignements listés ci-après. Ils focalisent sur l'influence potentielle du dysfonctionnement sur le fonctionnement hydraulique du système de stockage d'une part, et sur le transfert des radionucléides depuis les alvéoles des quartiers HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien d'autre part, incluant la voie « ouvrages ».

Les résultats des évaluations montrent que :

- l'influence de la température sur la perméabilité du Callovo-Oxfordien pendant le relâchement précoce des conteneurs dysfonctionnants ne modifie pas le schéma hydraulique des écoulements d'eau au sein des alvéoles de stockage, des ouvrages souterrains et dans le Callovo-Oxfordien. Les résultats relatifs à l'hydraulique (débits d'eau sortant des liaisons surface-fond, vitesses d'écoulement de l'eau dans les ouvrages souterrains) sont identiques à ceux du SEN ;
- à l'échelle des alvéoles HA, la voie de transfert principale reste celle par la couche du Callovo-Oxfordien. En effet, sur un million d'années et comme en SEN, seulement 3 % de l'inventaire total initial d'iode 129 dans le cas du scénario *What-if* basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN (7 % dans le cas du *What-if* basé sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN), entre dans les galeries d'accès. Cette prépondérance de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien s'explique par l'absence de drain hydraulique dans les galeries et par les choix de conception du quartier de stockage HA, notamment la longueur hectométrique des alvéoles HA ;
- les débits molaires des radionucléides mobiles entrant dans les galeries d'accès apparaissent plus précocément par rapport à ceux du SEN (cf. Figure 9-19 et figure 9-20 du chapitre 9.2.2.3.1 du présent volume), en raison du relâchement prématuré des radionucléides lorsque les conteneurs de stockage HA sont dysfonctionnants (perte d'étanchéité du conteneur et relâchement labile). Cependant, les temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien et par les ouvrages souterrains (galeries, liaisons surface-fond) sont suffisamment longs pour totalement masquer cet effet ;
- le transfert des radionucléides qui entrent dans les galeries d'accès selon la voie « ouvrage » reste lent et limité par diffusion. Comme pour le SEN, ce transfert lent et limité par les ouvrages souterrains permet aux radionucléides de diffuser depuis les ouvrages vers la couche du Callovo-Oxfordien. Ainsi, comme pour le SEN, on observe une atténuation des débits molaires de ces radionucléides de 2 à 3 ordres de grandeur en entrée de la zone centrale, et une atténuation

supplémentaire d'un ordre de grandeur le long des liaisons surface-fond. Ainsi, le débit molaire en sortie des liaisons surface-fond reste identique à celui obtenu en SEN pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA. Il reste donc inférieur de plusieurs ordres de grandeur au débit molaire de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, quelle que soit la situation (référence, enveloppe).

Comme pour les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface, aucun effet sur les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien n'est observé du fait du dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA. La voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert prédominante. À ce titre, le dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA n'a pas d'influence sur les débits molaires aux exutoires (et par conséquent sur les doses), qui restent pilotés par les débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien et identiques à ceux du SEN.

Conclusions relatives au scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA

Les résultats des évaluations montrent que le système de stockage est robuste vis-à-vis du scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA. En effet :

- le dysfonctionnement prématuré de tous les conteneurs de stockage du quartier de stockage HA, entraînant le relâchement des radionucléides dès le début de la phase après fermeture en milieu saturé (perte de la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »), est sans influence :
  - ✓ sur les performances globales du système de stockage ; en effet, les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien sont les mêmes que pour le SEN ;
  - ✓ et donc sur l'incidence sur la santé de l'homme, le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA n'induisant pas de modification du transfert des solutés jusqu'aux exutoires ;
- les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien sont identiques entre le scénario d'évolution normale et le scénario *What-if* de dysfonctionnement prématuré de tous les conteneurs de stockage HA ;
- les performances de la couche du Callovo-Oxfordien et l'efficacité des scellements apportent les lignes de défense robustes en cas de perte de la fonction « Limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage ».

9.4.3 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios *What-if* relatifs à une discontinuité non détectée postulée dans la couche du Callovo-Oxfordien

Pour mémoire, les deux scénarios *What-if* postulant la présence d'une discontinuité non détectée dans la couche du Callovo-Oxfordien répondent à une demande de l'ASN. En cohérence avec la démarche, l'évaluation des conséquences de la présence de ces discontinuités postulées vise à conforter la robustesse du système de stockage bien que cet événement pris en compte soit jugé très peu vraisemblable au regard de l'ensemble des connaissances acquises depuis de nombreuses années sur la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 9.3.1 du présent volume).

Deux types de discontinuité non détectée dans la couche de Callovo-Oxfordien sont postulées dans deux scénarios *What-if* distincts : l'un postulant une discontinuité non traversante limitée à la moitié inférieure (garde inférieure) de la couche du Callovo-Oxfordien, et l'autre postulant une discontinuité traversant la totalité de la couche du Callovo-Oxfordien.

Pour mémoire (cf. Chapitre 9.3.2 du présent volume), les hypothèses suivantes sont retenues :

- un gradient de charge hydraulique vertical descendant maximal dans la couche de Callovo-Oxfordien vers la formation encaissante du Dogger et reprenant les hypothèses et données de la situation de référence du SEN (définie au chapitre 5 du présent volume) ;
- une discontinuité non détectée postulée interceptant quatre alvéoles de stockage MA-VL contenant respectivement l'inventaire radiologique le plus important en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 (environ 80 % de l'inventaire radiologique MA-VL pour chacun des radionucléides retenus est contenu dans quatre alvéoles placés côte à côté dans le quartier de stockage MA-VL) ;
- une discontinuité non détectée postulée correspondant à une discontinuité avec une gouge d'épaisseur pluricentimétrique (4 cm), et donc assimilée à un milieu poreux continu équivalent ;
- une gamme de valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée postulée allant de 10^{-8} m.s^{-1} à 10^{-5} m.s^{-1}.

Les indicateurs retenus pour l'évaluation de l'influence de la discontinuité non détectée sont :

- les débits d'eau drainés par la discontinuité ;
- les débits molaires sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien selon les deux voies de transfert (débit molaire capté et transitant par la discontinuité et débit molaire migrant à travers la couche du Callovo-Oxfordien (hors discontinuité) ;
- les doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les trois principaux radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79).

L'analyse des résultats des deux scénarios *What-if* postulant la présence d'une discontinuité non détectée dans la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 9.3.3 du présent volume) conduit aux enseignements présentés ci-après et relatifs à l'influence potentielle de la discontinuité sur (i) le fonctionnement hydraulique du système de stockage, (ii) le transfert des radionucléides depuis les alvéoles interceptés par la discontinuité jusqu'au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, et (iii) l'incidence radiologique à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) ».

9.4.3.1 Les enseignements relatifs au comportement hydraulique du système de stockage

De manière générale, quelle que soit l'extension verticale de la discontinuité non détectée (discontinuité non traversante ou traversant la couche du Callovo-Oxfordien), sa capacité à drainer des radionucléides est limitée par la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien et le faible gradient de charge hydraulique vertical. La discontinuité intercepte directement quatre alvéoles de stockage MA-VL et l'influence hydraulique de la discontinuité s'étend à l'ensemble du quartier de stockage MA-VL par le réseau de galeries, avec des pertes de charges uniformes dans l'ensemble du quartier, notamment pour les valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée postulée les plus élevées :

- dans le cas du scénario avec une discontinuité non détectée postulée et non traversante limitée à la garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien, le comportement hydraulique du quartier de stockage MA-VL est sensible à la conductivité hydraulique de la discontinuité jusqu'à des valeurs de conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-6} m.s^{-1}. Au-delà de cette valeur, la charge hydraulique du Dogger se transmet dans les ouvrages souterrains et la quantité d'eau maximale drainée par une discontinuité non détectée est de l'ordre de 500 L.an^{-1} en régime permanent, quelle que soit sa conductivité hydraulique, du fait de l'effet limitant de la couche du Callovo-Oxfordien à « fournir » de l'eau au système de stockage ;

- dans le cas du scénario avec une discontinuité non détectée postulée traversant la totalité de la couche du Callovo-Oxfordien, la connexion établie par la discontinuité entre l'Oxfordien (formation encaissante supérieure) et le Dogger (formation encaissante inférieure), conduit à limiter l'effet de l'influence hydraulique de la discontinuité dans le stockage (pertes de charges hydrauliques trois fois inférieures à celles induites par une discontinuité limitée à la garde inférieure) : la quantité d'eau traversant la discontinuité n'est plus limitée par la couche du Callovo-Oxfordien, mais elle est alimentée directement par l'Oxfordien, et directement proportionnelle à la conductivité hydraulique de la discontinuité. Cette quantité d'eau est de l'ordre de 10 $m^3.an^{-1}$ pour une conductivité hydraulique de 10^{-6} $m.s^{-1}$ et de 100 $m^3.an^{-1}$ pour une conductivité hydraulique de 10^{-5} $m.s^{-1}$.

9.4.3.2 Les enseignements relatifs au transfert des radionucléides

Les enseignements présentés ci-après sont axés sur l'analyse des résultats obtenus pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), c'est-à-dire les trois radionucléides prépondérants issus des évaluations du SEN (cf. Chapitre 6.2 du présent volume).

Du point de vue du transfert des radionucléides, et en lien avec les conditions hydrauliques indiquées au chapitre 9.4.3.1 du présent volume. De manière générale :

- les effets de la perturbation hydraulique conduisent à générer un transfert convectif des radionucléides au sein des alvéoles et du réseau de galeries du quartier de stockage MA-VL ;
- compte tenu des hypothèses retenues, la voie de transfert par la discontinuité non détectée est toujours plus rapide (en temps) et supérieure ou égale (en intensité) à celle par la couche du Callovo-Oxfordien;
- sur un million d'années, la fraction de l'inventaire radiologique des quatre alvéoles interceptés et mobilisée par la discontinuité non détectée postulée est de l'ordre de :
  - ✓ 15 % à 30 %, pour la conductivité hydraulique minimale de 10^{-8} $m.s^{-1}$, quelle que soit la discontinuité postulée (non traversante ou traversante) ;
  - ✓ 50 % à 70 % pour la discontinuité non traversante et de 70 % à 80 % pour la discontinuité traversante, pour les valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité les plus élevées ;
- dans le cas du scénario avec une discontinuité non détectée postulée et non traversante limitée à la garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien, le comportement en solution des radionucléides est identique au comportement hydraulique du système de stockage :
  - ✓ pour des conductivités hydrauliques de la discontinuité inférieures ou égales à 10^{-8} $m.s^{-1}$, le maximum de débit molaire en radionucléides en sortie de la discontinuité est du même ordre de grandeur que celui par la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien, mais avec des occurrences des débits maximaux de l'ordre de la centaine de milliers d'années, en comparaison de plusieurs centaines de milliers d'années pour le transfert à travers la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ pour des conductivités hydrauliques de la discontinuité comprises entre 10^{-8} $m.s^{-1}$ et 10^{-6} $m.s^{-1}$, le débit molaire en radionucléides en sortie de la discontinuité augmente avec la conductivité hydraulique, avec des occurrences des débits maximaux atteignant de l'ordre de la dizaine de milliers d'années ;
  - ✓ pour des conductivités hydrauliques de la discontinuité supérieures ou égales à 10^{-6} $m.s^{-1}$, en lien avec la limite hydraulique de la couche du Callovo-Oxfordien à fournir de l'eau compte tenu de sa faible perméabilité et du faible gradient de charge hydraulique, le débit molaire en radionucléides devient insensible à la conductivité hydraulique de la discontinuité. Ce débit molaire est augmenté d'un à deux ordres de grandeur par rapport à celui (très faible) de la situation de référence du SEN, et avec des occurrences des débits maximaux d'environ 10 000 ans ;

- dans le cas du scénario avec une discontinuité non détectée postulée et traversant la totalité de la couche du Callovo-Oxfordien, en termes de débit molaire, le comportement en solution des radionucléides est identique au comportement hydraulique du système de stockage :
  - ✓ pour des conductivités hydrauliques de la discontinuité inférieures ou égales à 10^{-8} m.s^{-1}, le maximum de débit molaire en radionucléides en sortie de la discontinuité est du même ordre de grandeur que celui par la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien (et que celui du scénario avec discontinuité non traversante limitée à la garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien), mais avec des occurrences des débits maximaux de l'ordre de la centaine de milliers d'années, en comparaison de plusieurs centaines de milliers d'années pour le transfert à travers la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ pour des conductivités hydrauliques de la discontinuité supérieures à 10^{-8} m.s^{-1}, le débit molaire en radionucléides en sortie de la discontinuité augmente proportionnellement à la conductivité hydraulique : le débit molaire maximal est ainsi augmenté d'environ quatre ordres de grandeur par rapport au scénario sans discontinuité, avec des occurrences des débits maximaux de l'ordre de quelques dizaines d'années. Environ les deux tiers de l'inventaire initial MA-VL en radionucléides mobiles considérés atteignent le mur de la couche du Callovo-Oxfordien sur un million d'années (principalement par la discontinuité), soit en moyenne environ 30 % de plus (de 10 % à 50 % selon le radionucléide), c'est à dire moins d'un facteur 2 de plus que pour le scénario avec discontinuité non traversante limitée à la garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien.

9.4.3.3 Les enseignements relatifs à l'incidence radiologique à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »

Pour mémoire (cf. Chapitre 9.3.2 du présent volume), l'exutoire retenu pour l'évaluation de l'incidence radiologique est l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », après transfert des radionucléides en quelques dizaines de milliers d'années dans l'aquifère du Dogger sur la base de la situation de référence du SEN. L'incidence radiologique sur l'homme, exprimée en termes de dose annuelle, est évaluée pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », la biosphère tempérée et la classe d'âge « adulte » (cf. Chapitre 9.3.1 du présent volume).

En lien avec les conditions hydrauliques et de transfert indiquées aux deux chapitres précédents (cf. Chapitres 9.4.3.1 et 9.4.3.2 du présent volume), les incidences radiologiques des scénarios *What-if* **postulant** la présence d'une discontinuité non détectée sont pilotées par la voie de transfert par la discontinuité :

- pour le scénario *What-if* postulant une discontinuité non détectée et non traversante limitée à la garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien, et en considérant les deux valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées étudiées (10^{-6} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1}), la dose maximale du sélénium 79 (principal radionucléide contributeur en *What-if*) à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » est de l'ordre de 0,007 mSv.an^{-1} à environ 100 000 ans ;
- pour le scénario *What-if* postulant une discontinuité non détectée traversant la totalité de la couche du Callovo-Oxfordien, et en considérant les deux valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées étudiées (10^{-6} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1}) :
  - ✓ les doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » relatives aux trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79), sont plus élevées d'un facteur 3 à 4 par rapport à celles du scénario *What-if* postulant une discontinuité non traversante (limitée à la garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) ;
  - ✓ la dose maximale du sélénium 79 (principal radionucléide contributeur en *What-if*) à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » est de l'ordre de 0,025 mSv.an^{-1} à environ 70 000 ans.

Ces niveaux de doses restent très inférieurs aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes (cf. « Guide de sûreté n°1 de l'ASN » (1) et chapitre 1.3 du présent volume).

Conclusions relatives aux scénarios *What-if* postulant une discontinuité non détectée

Pour évaluer l'influence d'une discontinuité non détectée postulée dans la couche du Callovo-Oxfordien, deux types de discontinuité, l'une non traversante localisée dans la partie inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien, l'autre traversante sur toute l'épaisseur de la couche sont retenues.

Les hypothèses sont les suivantes :

- un gradient de charge hydraulique vertical descendant maximal dans la couche de Callovo-Oxfordien vers la formation encaissante du Dogger et reprenant les hypothèses et données de la situation de référence du SEN ;
- une discontinuité non détectée interceptant quatre alvéoles de stockage MA-VL contenant respectivement l'inventaire radiologique le plus important en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 (environ 80 % de l'inventaire radiologique MA-VL pour chacun des radionucléides retenus est contenu dans quatre alvéoles placés côte à côté dans le quartier de stockage MA-VL) ;
- la discontinuité non détectée correspondant à une discontinuité avec une gouge d'épaisseur pluricentimétrique (4 cm), et donc assimilée à un milieu poreux continu équivalent, en lien avec le caractère argileux du Callovo-Oxfordien et le champ de contraintes mécaniques naturelles *in situ*.
- une gamme de valeurs de la conductivité hydraulique allant de 10^{-8} m.s^{-1} à 10^{-5} m.s^{-1}.

Les résultats des évaluations montrent que le système de stockage est robuste vis-à-vis de la présence d'une discontinuité non détectée postulée dans la couche du Callovo-Oxfordien. En effet :

- en cas de présence d'une discontinuité non détectée postulée, les débits d'eau drainés vers la formation encaissante inférieure du Dogger restent maîtrisés :
  - ✓ pour le cas d'une discontinuité non détectée postulée et non traversante localisée dans la partie inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien :
    - par la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien qui limite de fait la quantité d'eau drainée (et par voie de conséquence les débits molaires) par la discontinuité : celle-ci est proportionnelle à la conductivité hydraulique de la discontinuité jusqu'à une valeur « seuil » de l'ordre de 10^{-6} m.s^{-1} (au-delà de cette valeur, la quantité d'eau drainée est insensible à la conductivité hydraulique de la discontinuité, ce qui se traduit par un comportement « asymptotique » des débits d'eau et des débits molaires obtenus lorsque la conductivité hydraulique de la discontinuité non détectée postulée atteint cette valeur) ;
  - ✓ pour le cas d'une discontinuité non détectée postulée et traversant la totalité de la couche du Callovo-Oxfordien :
    - par l'alimentation depuis l'Oxfordien ; dans ce cas, la quantité d'eau drainée (et par voie de conséquence les débits molaires) par la discontinuité est directement proportionnelle à la conductivité hydraulique de la discontinuité jusqu'aux valeurs élevées de la gamme de variation considérée ;
- les effets de la perturbation hydraulique conduisent à générer un transfert convectif des radionucléides au sein des alvéoles et du réseau de galeries du quartier de stockage MA-VL. La voie de transfert par la discontinuité non détectée est toujours plus rapide (en temps) et supérieure ou égale (en intensité) à celle par la couche du Callovo-Oxfordien, du fait de temps de transfert réduits ;
- sur un million d'années, une fraction de l'inventaire radiologique des quatre alvéoles interceptés est mobilisée par la discontinuité non détectée postulée :
  - ✓ de l'ordre de 15 % à 30 %, pour la conductivité hydraulique de 10^{-8} m.s^{-1}, quelle que soit la discontinuité postulée (non traversante ou traversante) ;
  - ✓ de 50 % à 70 % pour la discontinuité non traversante pour les valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité les plus élevées ; le comportement « asymptotique » observé

précédemment pour les débits d'eau et les débits molaires, s'applique également aux fractions de l'inventaire mobilisées par la discontinuité non détecté postulée lorsque sa conductivité hydraulique augmente ;

- ✓ de 70 % à 80 % pour la discontinuité traversante, pour les valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité les plus élevées ;

- en lien avec les conditions hydrauliques et de transfert des radionucléides indiquées ci-avant, les incidences radiologiques des scénarios *What-if* postulant la présence d'une discontinuité non détectée postulée, évaluées à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », sont pilotées par la voie de transfert par la discontinuité :
  - ✓ pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », une biosphère tempérée et la classe d'âge « adulte », les incidences radiologiques maximales du sélénium 79 (principal radionucléide contributeur pour ces scénarios *What-if*) obtenues à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », sont de l'ordre de 0,007 $mSv.an^{-1}$ pour une discontinuité non détectée postulée et non traversante et de 0,025 $mSv.an^{-1}$ pour une discontinuité non détectée postulée et traversante.

Les niveaux de doses maximales restent donc très inférieurs aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes (cf. « Guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 » et chapitre 1.3 du présent volume).

10

Les scénarios d'intrusion humaine involontaire

10.1 Le scénario « Forage avec prélèvement de carottes » 604

10.2 Le scénario « Forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage » 607

10.3 Le scénario de forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle 637

10.4 Le scénario de forage exploratoire pendant le transitoire hydraulique-gaz 662

10.5 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios d'intrusion humaine involontaire 665

Les scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI) constituent une classe de scénarios spécifique étudiée selon les recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (1). Ils permettent d'apporter une vision complémentaire sur la robustesse du stockage (cf. Chapitre 1.3.2.4 du présent volume). L'évaluation des incidences sur l'homme pour ce type de scénario suit la recommandation du guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008, d'être « *suffisamment faible par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes* ».

Le risque d'intrusion humaine involontaire est analysé de manière déterministe sans jugement de la vraisemblance de son occurrence. Leur définition conduit ainsi à considérer que :

- l'intrusion humaine involontaire suppose la méconnaissance de l'existence du stockage dès 500 ans après sa fermeture conformément aux recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 ;
- compte tenu de la profondeur d'implantation de l'installation souterraine de stockage, les intrusions humaines involontaires correspondent à des activités de forages profonds[106].

Tel qu'indiqué au chapitre 3 du présent volume, quatre scénarios d'intrusion humaine involontaire par forage sont retenus :

- un scénario forage avec extraction de carottes ;
- un scénario forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage ;
- un scénario forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle ;
- un scénario forage d'exploration qui traverse un alvéole MA-VL pendant le transitoire hydraulique-gaz.

Leur description, leur évaluation et les enseignements que l'on peut en tirer sont présentés successivement dans les quatre chapitres suivants.

10.1 Le scénario « Forage avec prélèvement de carottes »

Pour mémoire, le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1), indique que : « *L'exploitation de carottes constituées de déchets de haute activité donne lieu à une exposition externe qui sera évaluée en fonction du type d'examen effectué sur ces carottes* ».

En cohérence avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN, un scénario forage avec prélèvement de carotte est retenu pour les évaluations de sûreté après fermeture.

Ce scénario considère un forage carotté, destiné à la caractérisation scientifique de la couche du Callovo-Oxfordien, qui viendrait traverser un ouvrage de stockage. La réalisation de ce forage intercepte ainsi des colis stockés et induit un nouvel accès vers les déchets en court-circuitant la couche du Callovo-Oxfordien. Le prélèvement de carotte va exposer un opérateur à des rayonnements ionisants.

L'objectif de ce scénario est d'évaluer l'incidence potentiellement générée par la manipulation et l'observation de telles carottes sur les opérateurs par exposition externe.

[106] Pour mémoire, l'installation de stockage en profondeur est « isolée des intrusions humaines banales », c'est-à-dire de travaux de terrassement de faible profondeur par exemple.

10.1.1 La description du scénario forage avec prélèvement de carottes et hypothèses associées

10.1.1.1 La présentation du scénario

La définition du scénario repose sur la remontée en surface, pour analyse scientifique, des carottes extraites (cf. Figure 10-1) :

- d'une part de déchets stockés dans le quartier de stockage MA-VL ;
- et d'autre part de déchets stockés dans le quartier de stockage HA.

Figure 10-1 Photo illustrant l'examen d'une carotte remontée en surface

La longueur maximale usuelle d'un élément de carottier peut atteindre neuf mètres. À la remontée du carottier en surface, son contenu est généralement examiné et transféré par le foreur dans des contenants dont la longueur usuelle est d'un mètre.

Les caractéristiques des carottes prélevées dans chacun des quartiers de stockage HA et MA-VL sont les suivantes :

- pour les colis de déchet HA et MA-VL stockés horizontalement en quartier de stockage HA, la hauteur de la partie active de la carotte est limitée au diamètre interne du conteneur primaire (430, 498 ou 690 mm) ;
- pour les colis de déchets MA-VL stockés verticalement dans le quartier de stockage MA-VL, il est considéré la hauteur de la carotte est entièrement constituée du bloc de déchet traversé.

En se basant sur ces éléments, le scénario considère ainsi :

- que le mètre de carotte extraite et manipulée par le foreur est constitué en totalité par le bloc de déchets traversé par le forage. Il est supposé une composition homogène de la carotte, l'inventaire radiologique est alors réparti de façon homogène sur toute la longueur de la partie active de la carotte ;
- que le diamètre utile usuellement retenu pour ce type de manipulation et d'investigation par carottage est de 100 mm[107], (cf. Figure 10-1).

En cohérence avec les prescriptions du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1), la première date possible pour la survenue d'un forage potentiellement intrusif est fixée, de manière conventionnelle, à 500 ans après la fermeture définitive du stockage.

L'indicateur retenu est la dose reçue par le foreur en fonction de la durée d'exposition. La durée d'exposition aux carottes pour le foreur correspond essentiellement à l'extraction des éléments de carottes du carottier, au fractionnement éventuel en morceaux inférieurs à un mètre de longueur et au positionnement dans les contenants prévus. On peut estimer, sur la base du retour d'expérience[108], que la durée moyenne de ces opérations est d'environ 10 minutes.

À cet égard, le calcul réalisé considère une exposition de face du foreur, pendant 10 minutes, à une distance moyenne de 40 cm par rapport au point le plus proche de la génératrice de la carotte cylindrique.

10.1.1.2 La sélection des familles de colis de déchets

Afin de déterminer les colis de stockage potentiellement les plus impactant, une analyse a été conduite afin de hiérarchiser les familles de colis à retenir pour les évaluations d'impact sur le foreur. L'objectif de cette hiérarchisation est de considérer les colis de déchets susceptibles de conduire à l'exposition la plus importante pour le foreur.

Les inventaires radiologiques considérés pour cette hiérarchisation des familles sont les inventaires « margés » retenus pour les évaluations quantitatives des scénarios après-fermeture (cf. Volume 3 du présent rapport). L'analyse conduit à tenir compte :

- de l'activité des radionucléides contribuant majoritairement à une exposition externe du foreur à la date de 500 ans, date retenue pour la réalisation du forage carotté. Pour cela l'analyse repose sur des calculs de radioprotection ;
- du débit énergétique émis par cm^3 du bloc de déchet considéré.

Cette hiérarchisation a permis d'identifier une quarantaine de familles de colis de déchets d'intérêt pour les évaluations d'exposition externe. Pour chacune d'entre elles des calculs d'exposition externe ont été menés. Dans la suite du document ne sont présentés que les résultats obtenus pour les familles de colis de déchets HA et MA-VL les plus dosantes vis-à-vis de cette voie d'exposition.

10.1.2 Les résultats du scénario forage avec prélèvements de carottes

Les résultats de la dose intègrent uniquement la part de dose due au rayonnement gamma, la dose correspondant aux neutrons étant négligeable pour ces familles de colis de déchets.

L'exposition externe maximale du foreur résultant de la manipulation de carottes extraites du quartier de stockage MA-VL est estimée à 7,0 mSv ce qui reste bien inférieur aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

---

[107] Diamètre qui correspond également au retour d'expérience de l'Andra lors des investigations de la couche du Callovo-Oxfordien.
[108] Pour mémoire, cette durée correspond à celle retenue pour les options de sûreté après fermeture.

Selon les cas de calcul et les hypothèses associées, les contributeurs principaux à l'exposition externe à une carotte de déchets MA-VL, prélevée à 500 ans, sont soit le niobium 94, soit le thorium 229 et le neptunium 237.

L'exposition externe maximale du foreur résultant de la manipulation de carottes extraites du quartier de stockage HA est estimée à 11,2 mSv, ce qui reste bien inférieur aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

Selon les cas de calcul et les hypothèses associées, les contributeurs principaux à l'exposition externe à une carotte de déchets HA, prélevée à 500 ans, sont soit le niobium 94, soit le thorium 229 et le neptunium 237, soit l'américium 241 et l'américium 243.

Les enseignements tirés des résultats de ce scénario forage avec prélèvement de carottes sont présentés au chapitre 10.5.1 du présent volume.

10.2 Le scénario « Forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage »

10.2.1 La présentation générale du scénario

Le scénario de « forage géothermique arrêté au niveau du stockage » considère qu'un forage destiné à l'exploitation géothermique du Trias est abandonné avant d'atteindre sa profondeur cible, après avoir constaté une anomalie au niveau du stockage. La spécificité de ce forage réside dans le diamètre de foration, plus important que celui de forages exploratoires, tel que décrit dans le chapitre suivant.

10.2.2 La description du scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage

Un forage de 445 mm de diamètre est réalisé à des fins d'exploitation géothermique du Trias. Il traverse les formations sus-jacentes et la garde supérieure de Callovo-Oxfordien jusqu'à ce qu'il intercepte un ouvrage de l'installation souterraine.

Il est ensuite abandonné à la cote du stockage (sans poursuivre le forage au-delà de l'alvéole ou de la galerie) et remblayé par un matériau dont la conductivité hydraulique est équivalente à celle d'un matériau granulaire (10^{-5} m.s^{-1}). La continuité hydraulique est supposée effective entre les ouvrages souterrains et le Barrois (cf. Figure 10-2).

L'évaluation quantitative est réalisée en s'appuyant sur les données et paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale hormis pour le gradient de charge hydraulique vertical et la répartition de l'inventaire dans les alvéoles MA-VL, en effet :

- pour les scénarios d'intrusion humaine par forage, il est fait le choix de retenir la valeur maximale du gradient de charge hydraulique vertical ascendant à l'échelle du quartier concerné par le forage ;
- la distribution de l'inventaire radiologique est pilotée par l'activité de chaque radionucléide selon une approche similaire à celle retenue dans le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2).

L'exutoire retenu est le forage d'exploitation de la nappe du Barrois considéré en relais avec le forage géothermique arrêté au niveau du stockage (cf. Figure 10-2). Les modalités de représentation de cet exutoire sont les mêmes que celles définies à des fins de consommation d'eau et d'exploitation agricole par le groupe de référence hypothétique multi-activités défini pour l'exutoire Barrois (cf. Chapitre 4 du présent volume).

L'évaluation considère :

- un groupe de référence hypothétique « multi-activités » ;
- une biosphère tempérée et une biosphère chaude type Cr ;
- les adultes, les enfants de 10 ans et les enfants de 1 an.

La date de l'intrusion humaine involontaire est définie en cohérence avec les recommandations du Guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1), elle est fixé à 500 ans après la fermeture définitive du stockage.

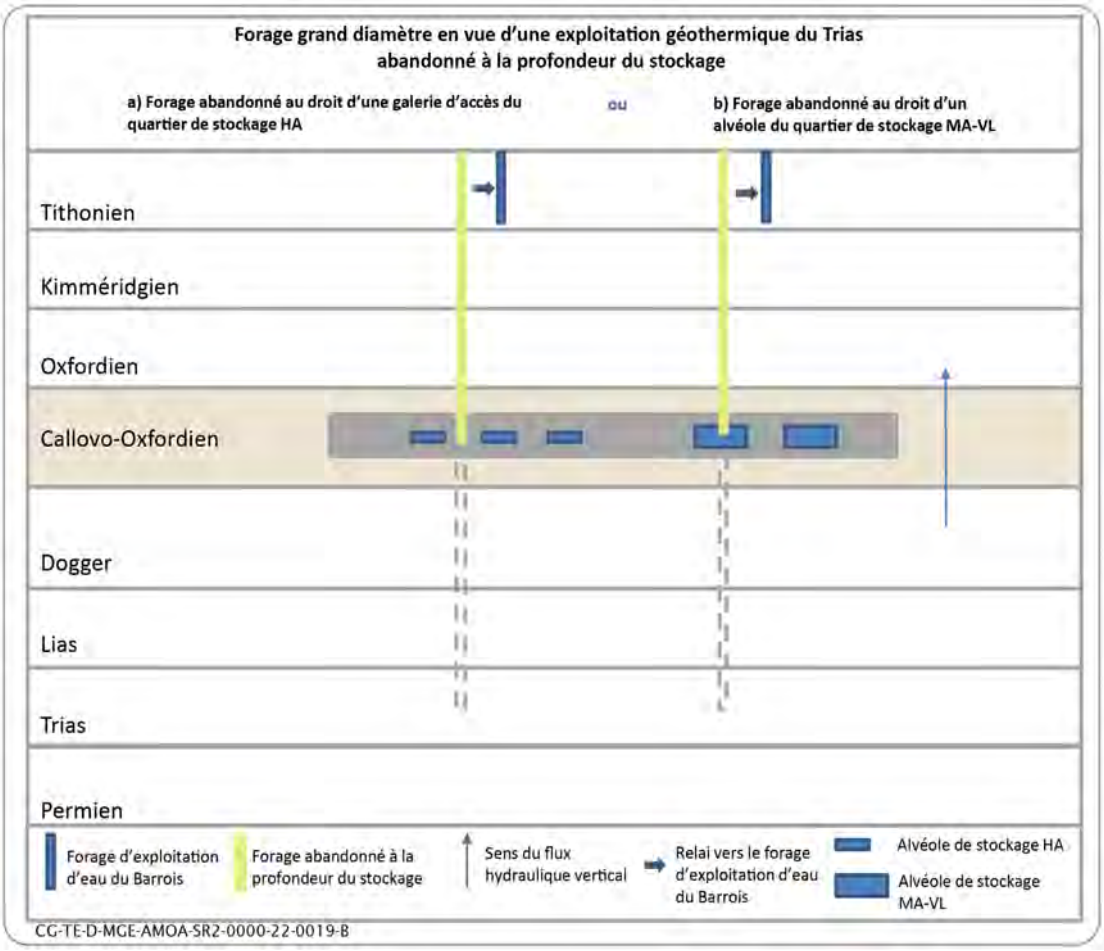


Figure 10-2 *Représentation schématique du scénario de forage intrusif en vue d'une exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage*

10.2.2.1.1 La localisation du forage

Le scénario est traité en considérant un seul forage intrusif, abandonné au niveau du stockage. Le traitement de ce scénario d'intrusion humaine involontaire dépend étroitement de la conception du centre de stockage Cigéo et de son architecture. Deux emplacements distincts sont traités séparément :

- l'un postule un forage localisé dans le quartier de stockage HA. Le forage est positionné dans la galerie d'accès sud à la tranche nord-ouest du quartier de stockage des déchets HA1, au droit des alvéoles de déchets COG-800 dont l'activité en iode 129 par unité de surface est la plus forte (cf. Figure 10-3) ;
- l'autre postule un forage dans un alvéole du quartier de stockage MA-VL. Le forage est positionné à l'emplacement où le gradient de charge hydraulique ascendant est favorable au transfert convectif des radionucléides vers l'aquifère du Barrois, au droit du fond de l'alvéole MA-VL situé au fond (nord-est) du quartier de stockage MA-VL.

10.2.2.1.2 L'inventaire radiologique et sa distribution

L'inventaire radiologique considéré est l'inventaire « margé » retenu pour le SEN (cf. Chapitre 5 du présent volume). Le transfert entre les alvéoles de stockage concernés par l'intrusion et le forage d'exploitation de l'eau du Barrois étant relativement rapide, l'étude inclut tous les radionucléides qui n'auront pas entièrement décru après 500 ans (*e.g.* De période supérieure à 20 ans), ainsi que les radionucléides produits par filiation.

Pour le forage interceptant le quartier de stockage HA, il est retenu la distribution de l'inventaire radiologique du scénario d'évolution normale (cf. Figure 10-3).

Pour le forage interceptant le quartier de stockage MA-VL, il a été fait le choix de reconduire les hypothèses considérées pour le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2) : pour chaque radionucléide étudié, l'alvéole MA-VL cible est celui qui contient l'inventaire radiologique maximal (cf. Figure 10-4). L'analyse évalue distinctement l'incidence associée à chaque radionucléide, en supposant que l'alvéole cible contient les familles de déchets qui ont la plus forte concentration du radionucléide étudié. Il y a donc autant de répartitions de l'inventaire radiologique que de radionucléides et les incidences radiologiques correspondantes n'ont pas vocation à être sommées. En cohérence avec le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2) également, la répartition de l'inventaire du radionucléide étudié est supposée uniforme dans l'alvéole cible et dans chacun des alvéoles MA-VL.

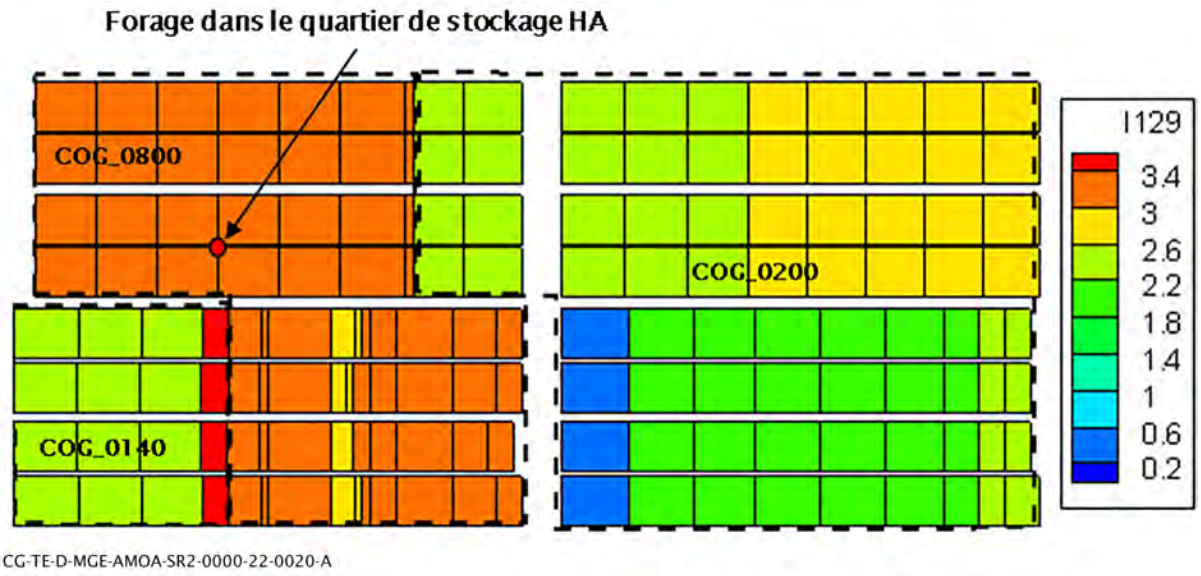


Figure 10-3 *Distribution de l'inventaire en iode 129 (en moles par alvéole), familles de colis et position du forage au sein du quartier de stockage HA pour le traitement des scénarios d'intrusion humaine (échelles verticale et horizontale non respectées)*

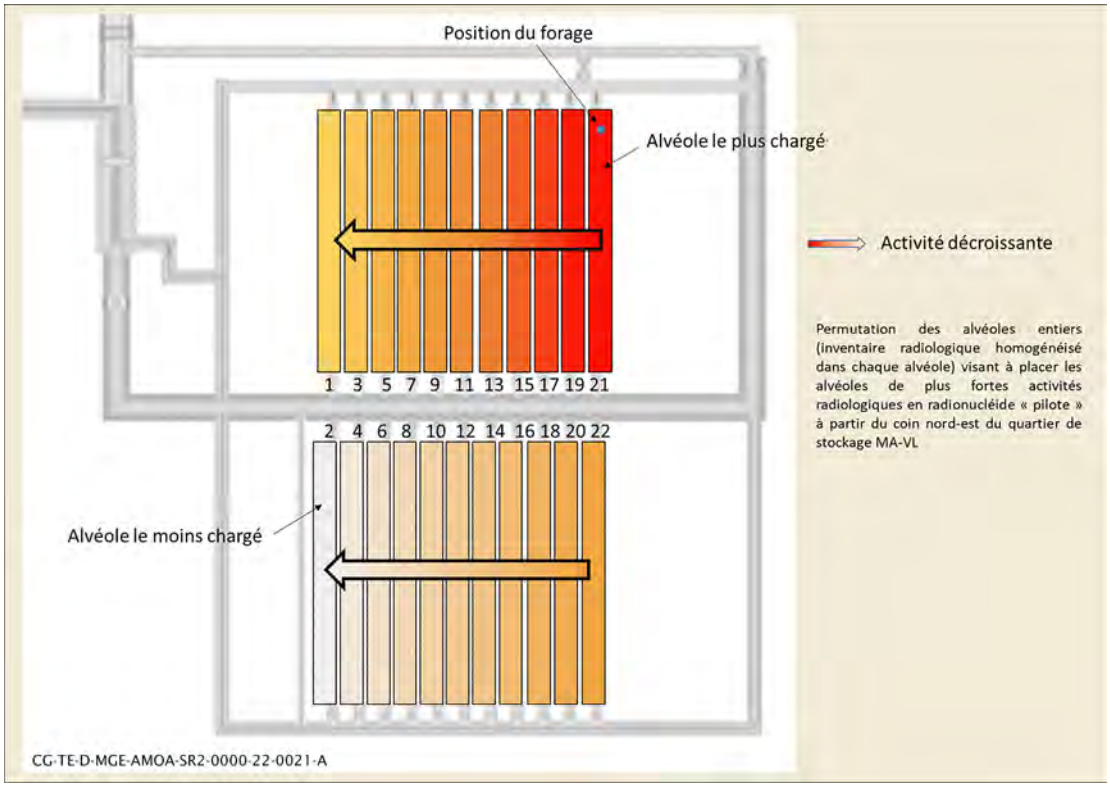


Figure 10-4 *Mode de répartition de l'inventaire radiologique et position du forage au sein du quartier de stockage MA-VL retenus pour le traitement des scénarios d'intrusion humaine*

10.2.2.2 La conceptualisation du forage

Afin d'assurer une représentation majorante du transport convectif dans le forage intrusif, ce scénario s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- les ouvrages souterrains sont implantés avec une garde supérieure de Callovo-Oxfordien de 50 mètres ;
- le gradient de charge hydraulique ascendant au droit du forage dans le quartier de stockage HA est le gradient ascendant maximal estimé au droit de la ZIOS en situation enveloppe par le modèle hydrogéologique reposant sur l'évolution géodynamique maximaliste, soit 0,21 $m.m^{-1}$;
- le gradient de charge hydraulique ascendant au droit du forage dans le quartier de stockage MA-VL est le gradient ascendant maximal estimé au droit de la ZIOS en situation enveloppe par le modèle hydrogéologique reposant sur l'évolution géodynamique maximaliste, soit 0,14 $m.m^{-1}$;
- comme en scénario d'évolution normale, le stockage est supposé initialement saturé ;
- la conductivité hydraulique du matériau utilisé pour remblayer le forage est 10^{-5} $m.s^{-1}$, afin de garantir un débit d'eau maximal par le forage ;
- l'eau de l'alvéole (et les radionucléides qu'elle contient) est directement prélevée par le forage intrusif ;
- dans le cas du forage dans le quartier de stockage HA, l'intrusion humaine involontaire a lieu dans une galerie d'accès. Le transfert entre les alvéoles et le forage intrusif contribue à atténuer le flux de radionucléides ;
- les matériaux utilisés pour remblayer le forage intrusif n'ont pas de propriétés de rétention ($Csat = \infty$, $Kd = 0$) et les coefficients de diffusion sont définis en fonction de la porosité ($De = 6,9 \times 10^{-10}$ $m^2.s^{-1}$).

10.2.2.3 Les indicateurs considérés

Les indicateurs utilisés pour évaluer la robustesse du système de stockage, ainsi que les incidences radiologiques sur l'homme, sont quantifiés au niveau du stockage, en sortie du forage intrusif, et dans le forage d'exploitation à l'exutoire du Barrois :

- les champs de charges hydrauliques et les débits d'eau drainés par le forage permettent d'apprécier l'influence du forage intrusif sur les circulations hydrauliques dans le système de stockage ;
- les débits molaires de radionucléides transitant par le forage jusqu'au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, qui permettent d'apprécier l'influence du forage intrusif sur le transfert des radionucléides ;
- l'indicateur final d'évolution de la dose annuelle à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », évaluée selon les hypothèses définies pour cet exutoire pour chacun des radionucléides qui y parvient. Dans le cas particulier des forages (SIHI), il n'y a pas de sommation au sens cumul des doses des différents radionucléides, car cela supposerait qu'un alvéole puisse contenir les familles contenant tous les radionucléides à leur concentration maximale ce qui n'a pas de sens physique pour ces scénarios (cf. Chapitre 4 du présent volume).

10.2.3 Les résultats pour le scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage

10.2.3.1 Le comportement hydraulique

10.2.3.1.1 Le forage intrusif dans le quartier de stockage HA

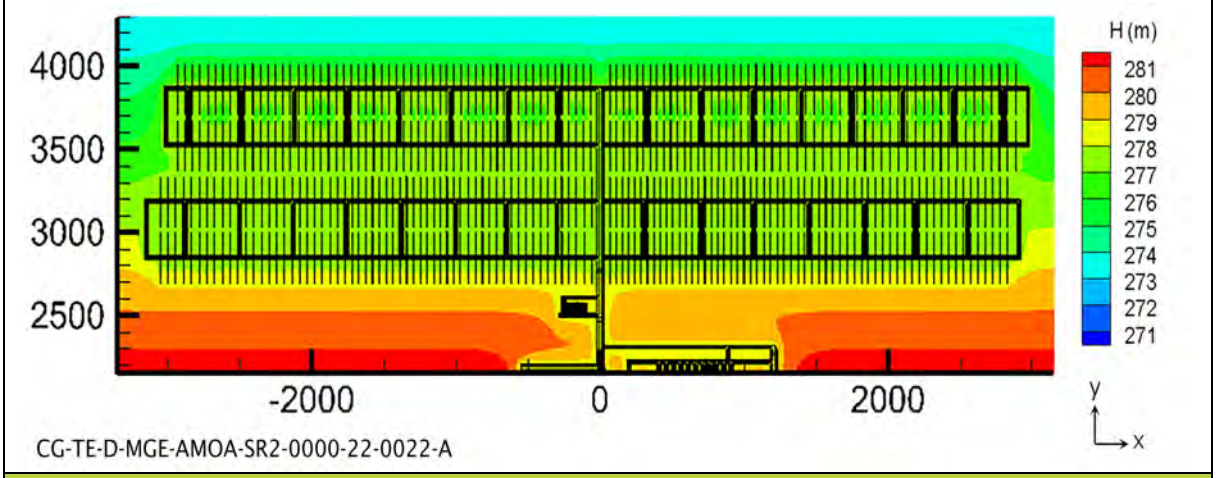
La figure 10-5 présente les champs de charges hydrauliques dans un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif. La figure 10-6 met en évidence le champ des pertes de charges hydrauliques (différences de charges entre les cas avec et sans forage intrusif) induites par le forage dans les ouvrages de stockage dans un plan 2D horizontal.

Ces résultats montrent que :

- l'abandon du forage géothermique à la cote du stockage engendre une alimentation en eau du forage essentiellement par les ouvrages dont la capacité d'alimentation en eau est plus élevée que celle de la couche du Callovo-Oxfordien. Cette capacité est cependant contrôlée par la quantité d'eau que peut fournir la couche du Callovo-Oxfordien *via* les surfaces d'échange ;
- l'apport d'eau limité et la forte perméabilité du forage engendrent une diminution des charges hydrauliques dans le forage qui induit des phénomènes convectifs en direction de celui-ci. À l'équilibre hydraulique (*i.e.* Régime permanent), le rayon d'influence hydraulique du forage s'étend sur l'intégralité du quartier de stockage HA et le quartier pilote HA ;
- au sein des ouvrages de stockage, la perte de charge hydraulique est légèrement plus forte (7,8 mètres) dans la tranche nord-ouest dans laquelle est localisé le forage, mais l'intrusion affecte également l'ensemble des galeries du quartier de stockage HA (perte de charge de l'ordre de 7,5 mètres) et le quartier pilote HA (perte de charge de 6,5 mètres) ;
- le forage draine un débit d'eau de l'ordre de 6 mètres cube par an.

Cartographie de charges hydrauliques dans le plan horizontal traversant les ouvrages de stockage

Sans forage



Avec forage

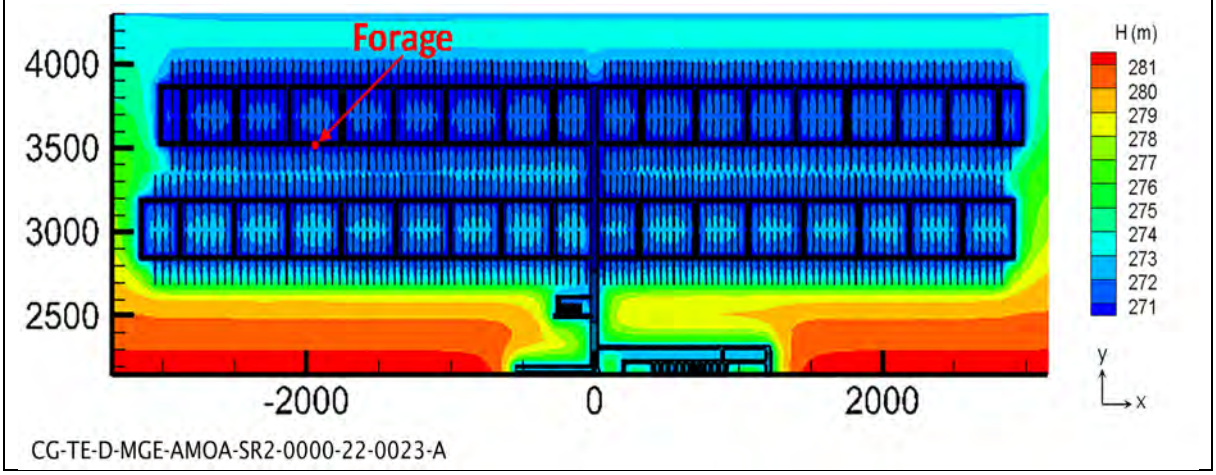


Figure 10-5 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage HA : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif*

Pertes de charges hydrauliques dans le plan horizontal traversant les ouvrages de stockage

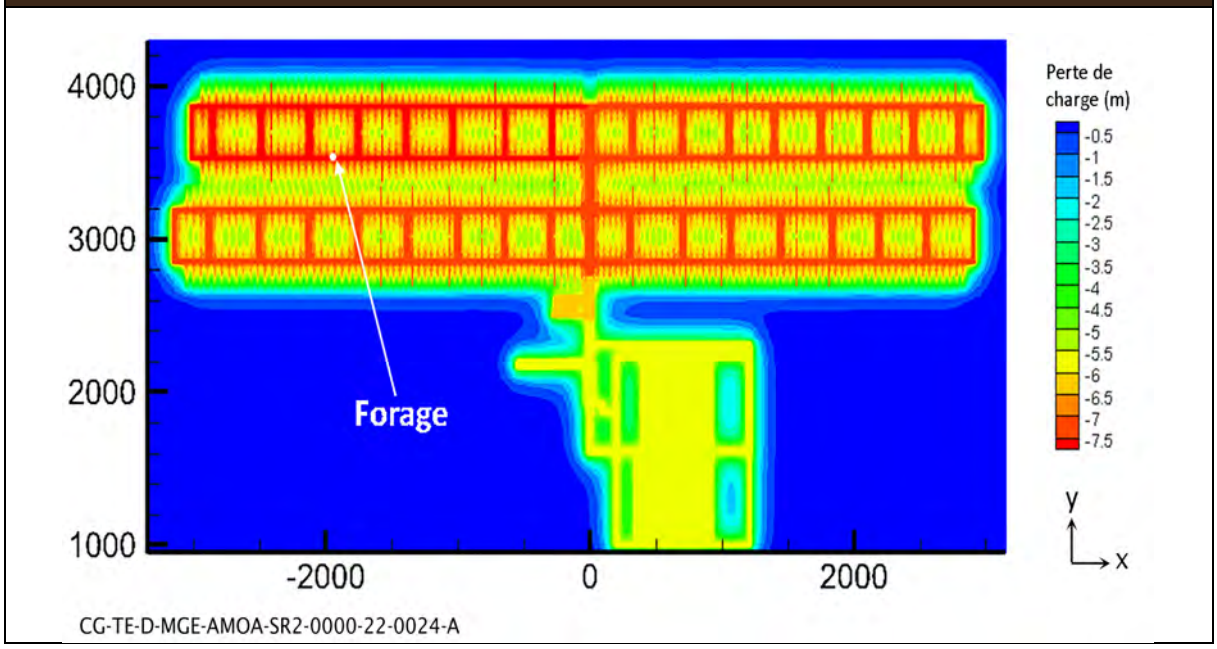


Figure 10-6 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage HA : champ des pertes de charges hydrauliques (en mètres) induites par le forage selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage*

10.2.3.1.2 Le forage intrusif dans le quartier de stockage MA-VL

La figure 10-7 présente les champs de charges hydrauliques dans un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif. La figure 10-8 met en évidence le champ des pertes de charges (différences de charges entre les cas avec et sans forage intrusif) induites par le forage dans les ouvrages de stockage dans un plan 2D horizontal.

En cohérence avec le comportement hydraulique observé avec le forage dans le quartier de stockage HA, l'analyse de ces résultats montre que :

- l'apport d'eau limité et la forte perméabilité du forage engendrent une diminution des charges hydrauliques dans le forage qui induit des phénomènes convectifs en direction de celui-ci. À l'équilibre hydraulique (*i.e.* Régime permanent), le rayon d'influence hydraulique du forage s'étend sur l'intégralité du quartier de stockage MA-VL avec une perte de charge d'environ 4,5 mètres ;
- le forage draine un débit d'eau de l'ordre de 4 mètres cube par an.

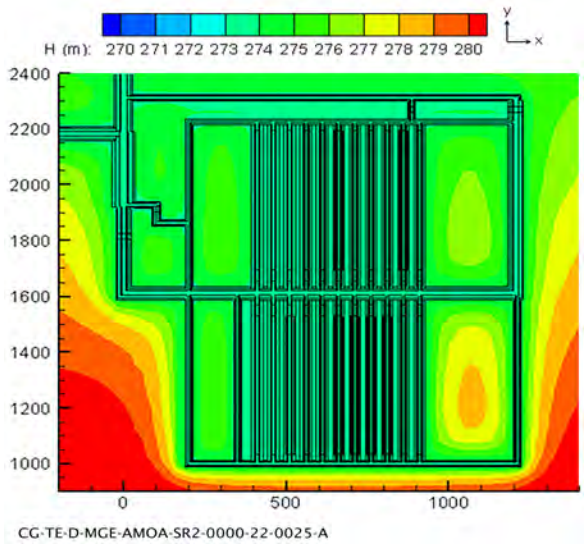
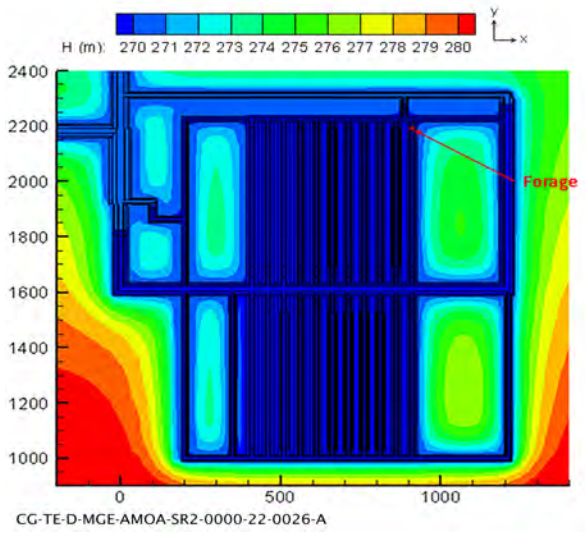
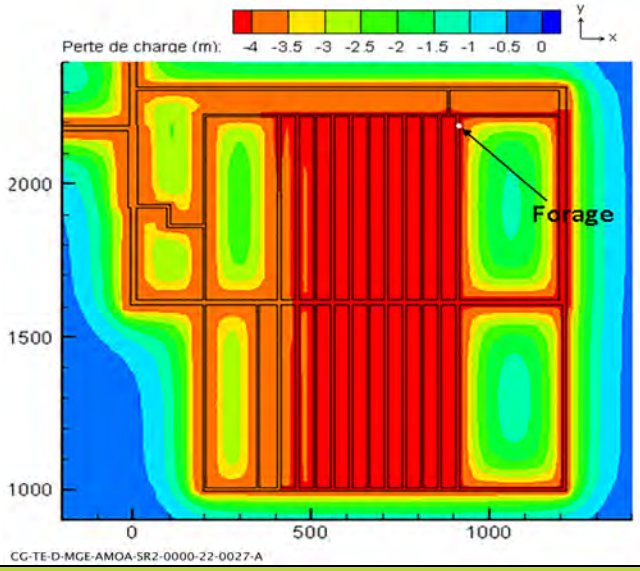
Cartographie de charges hydrauliques dans le plan horizontal traversant les ouvrages de stockage	
Sans forage	**Avec forage**
	

Figure 10-7 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage MA-VL : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif*

Pertes de charges hydrauliques dans le plan horizontal traversant les ouvrages de stockage

À l'échelle du quartier de stockage MA-VL



À l'échelle du stockage

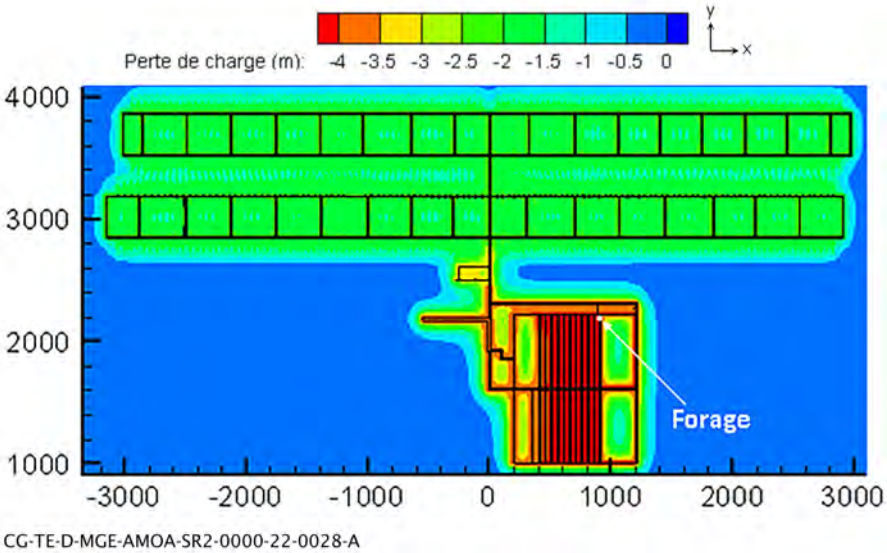


Figure 10-8 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – échelle quartier de stockage MA-VL (en haut) et échelle stockage (en bas) : champ des pertes de charges hydrauliques (en mètres) induites par le forage selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage*

10.2.3.2 Le transfert des radionucléides dans le stockage et dans le forage

10.2.3.2.1 Le forage intrusif dans le quartier de stockage HA

La figure 10-9 présente les historiques des débits molaires en sortie du forage au niveau du toit du Callovo-Oxfordien, pour les radionucléides dont le débit molaire maximal excède 10^{-10} mol.an^{-1} sur le million d'années.

L'analyse des résultats montre que :

- les débits molaires instantanés les plus élevés sont obtenus pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue (sélénium 79, chlore 36 et iode 129), avec des valeurs maximales de débit molaire respectives de $8{,}3 \times 10^{-4}$ mol.an^{-1} pour le sélénium 79, $5{,}0 \times 10^{-4}$ mol.an^{-1} pour le chlore 36 et $4{,}0 \times 10^{-4}$ mol.an^{-1} pour l'iode 129 ;
- la fraction d'inventaire radiologique du quartier de stockage HA sortant du forage sur un million d'années est d'environ 3 % pour le sélénium 79, 3,5 % pour le chlore 36 et 11 % pour l'iode 129.

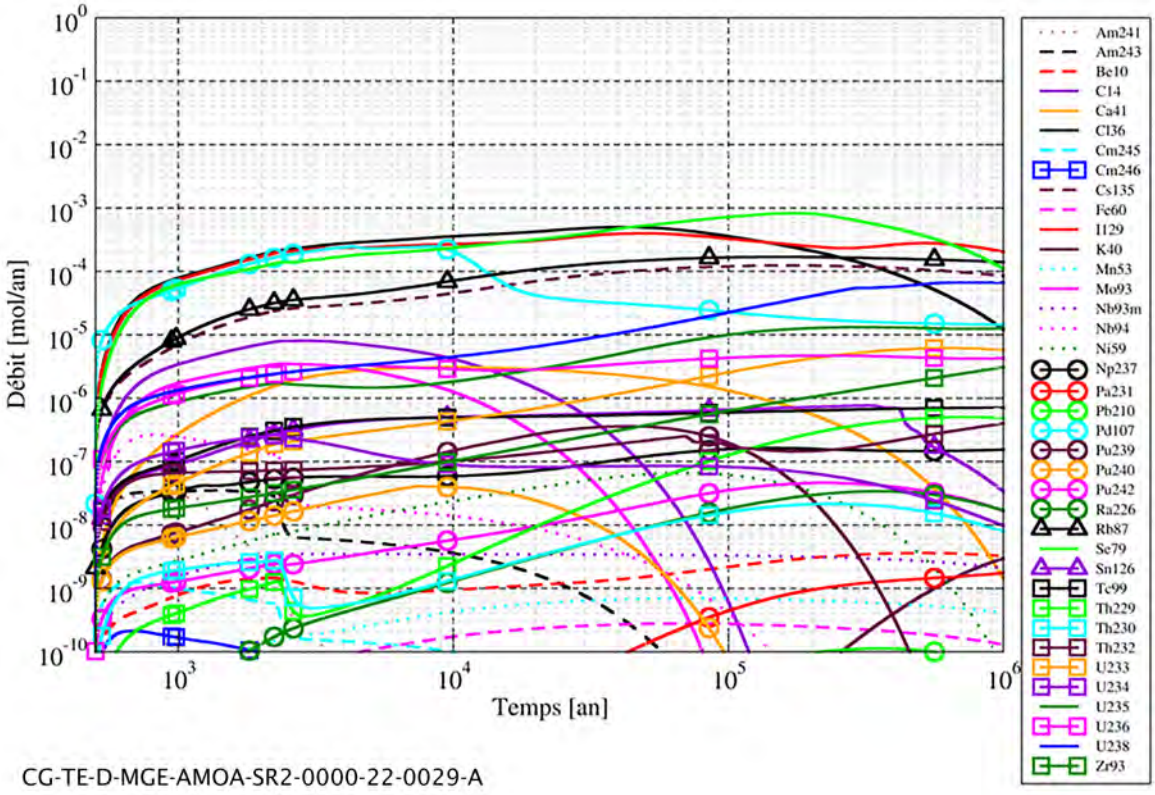


Figure 10-9 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage HA : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du toit du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal excède 10^{-10} mol.an^{-1}*

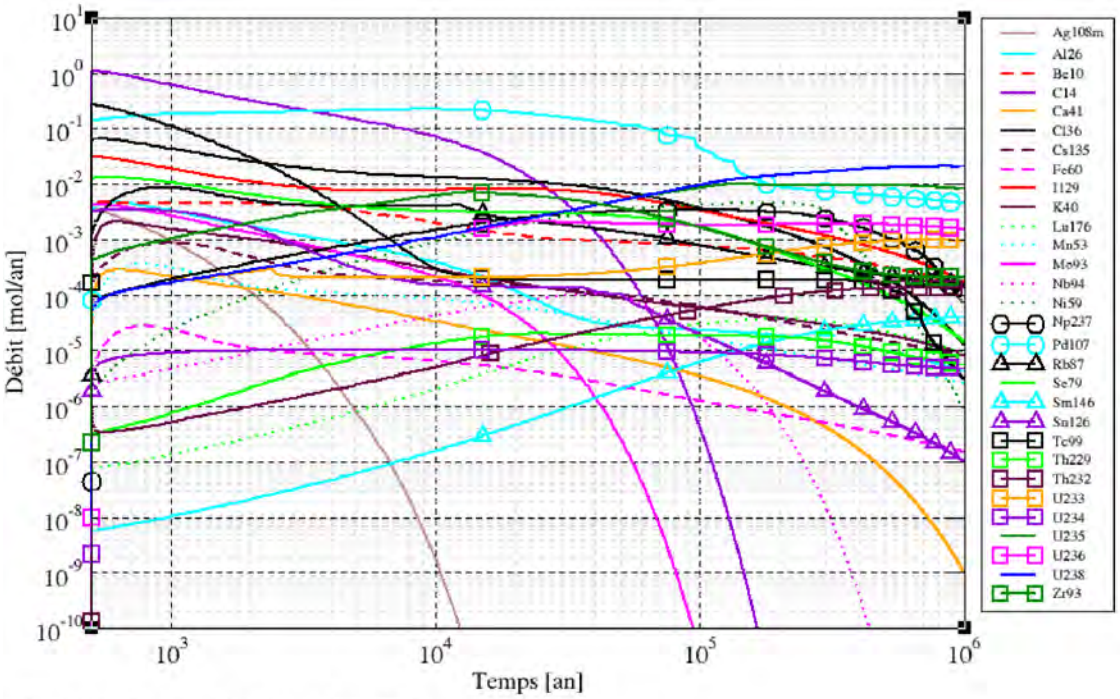
10.2.3.2.2 Le forage intrusif dans le quartier de stockage MA-VL

La figure 10-10 et la figure 10-11 présentent les historiques des débits molaires en sortie de forage au niveau du toit du Callovo-Oxfordien, respectivement pour les radionucléides dont le niveau du maximum de débit molaire est supérieur à 10^{-5} mol.an^{-1} sur le million d'années (32 radionucléides), et pour ceux dont le niveau du maximum de débit molaire est compris entre 10^{-10} mol.an^{-1} et 10^{-5} mol.an^{-1} sur le million d'années (24 radionucléides).

On rappelle que, sur la base des principes de conceptualisation de la distribution de l'activité radiologique exposés au chapitre 10.2.2.1.1 du présent volume, et pour chaque radionucléide considéré, le forage est positionné dans l'alvéole MA-VL caractérisé par le plus fort inventaire radiologique.

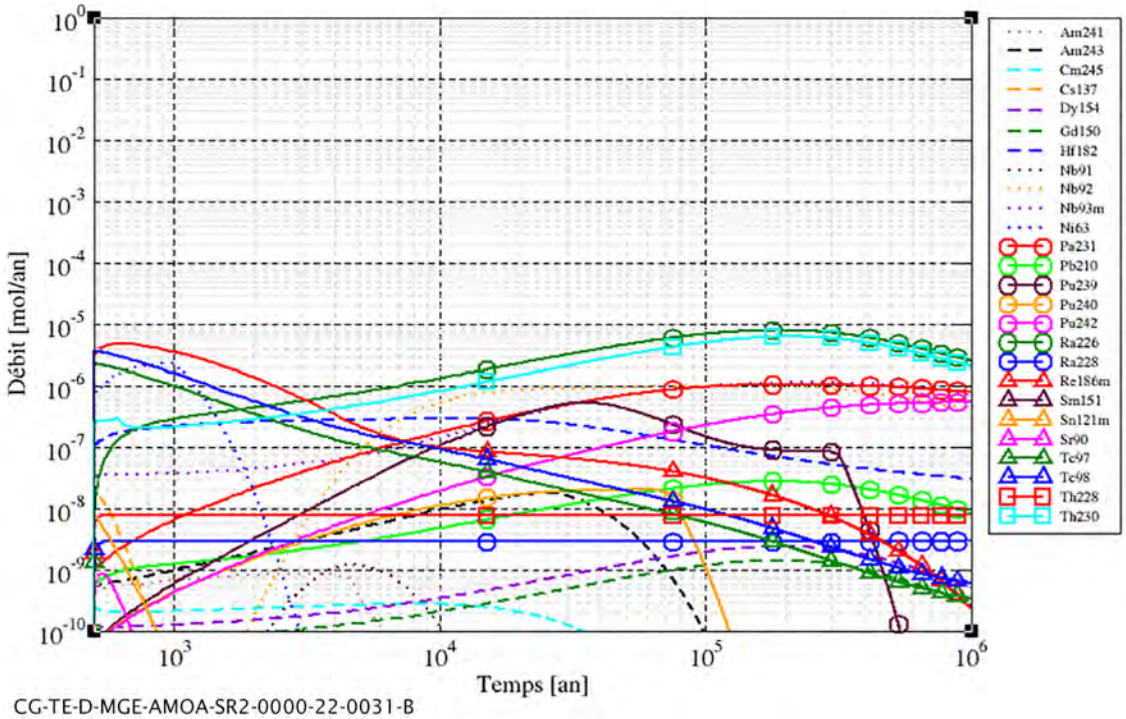
Les résultats montrent que :

- les débits molaires instantanés maximaux, supérieurs à 10^{-2} mol.an^{-1}, sont obtenus pour les radionucléides mobiles à vie moyenne ou longue (carbone 14 (organique), iode 129, chlore 36, sélénium 79) et pour des radionucléides à vie longue caractérisés par (i) une rétention par sorption faible ou nulle dans le béton des alvéoles (technétium 99, palladium 107) ou (ii) un inventaire radiologique initial MA-VL très important (uranium 238 et uranium 235). Pour ces radionucléides, les valeurs maximales de débit molaire respectives sont de 1,1 mol.an^{-1} pour le carbone 14 (organique), 0,27 mol.an^{-1} pour le technétium 99, 0,22 mol.an^{-1} pour le palladium 107, $6{,}6 \times 10^{-2}$ mol.an^{-1} pour le chlore 36, $3{,}1 \times 10^{-2}$ mol.an^{-1} pour l'iode 129, $2{,}1 \times 10^{-2}$ mol.an^{-1} pour l'uranium 238, $1{,}3 \times 10^{-2}$ mol.an^{-1} pour le sélénium 79 et $1{,}1 \times 10^{-2}$ mol.an^{-1} pour l'uranium 235 ;
- la quantité molaire sortant du forage au niveau du toit de la couche du Callovo-Oxfordien sur 1 million d'années est de l'ordre ou supérieure à la quantité initiale de l'alvéole impacté par le forage pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79, mettant en évidence un rayon d'influence du forage s'étendant sur plus d'un alvéole pour les radionucléides mobiles, solubles et à vie longue. Cette quantité représente au moins 40 % de l'inventaire radiologique total initial du quartier de stockage MA-VL pour l'iode 129 (60 %), le chlore 36 (40 %) et le sélénium 79 (49 %) ;
- les transferts vers le forage étant relativement rapides, pour les radionucléides mobiles, solubles et à vie moyenne, la décroissance radioactive atténue de façon peu significative la quantité molaire sortant du forage sur 1 million d'années, qui représente environ 8 % de l'inventaire total initial du quartier de stockage MA-VL pour le carbone 14 (organique), 2 % pour le molybdène 93, et 1 % pour l'argent 108 m ;
- pour les autres radionucléides, les phénomènes convectifs au sein de la partie utile de l'alvéole impacté favorisent le transfert (par convection) vers le forage et limitent les échanges avec la couche du Callovo-Oxfordien et les matériaux cimentaires. Ainsi, l'atténuation du transfert des radionucléides vers le forage par rétention (sorption/précipitation) dans la couche du Callovo-Oxfordien et le béton des alvéoles est limitée et la quantité molaire sortant du forage en un million d'années représente :
  - ✓ 25 % de l'inventaire initial total du quartier de stockage MA-VL pour l'aluminium 26, caractérisé par une rétention moyenne dans la couche du Callovo-Oxfordien et nulle dans le béton ;
  - ✓ 4,5 % de l'inventaire initial total du quartier de stockage MA-VL pour le palladium 107 et le rhénium 186 m, caractérisés par une rétention moyenne dans la couche du Callovo-Oxfordien et nulle dans le béton ;
  - ✓ 2 % à 3 % de l'inventaire initial total du quartier de stockage MA-VL pour le calcium 41, le potassium 40 et le manganèse 53, caractérisés par une rétention faible dans la couche du Callovo-Oxfordien et très faible ou nulle dans le béton ;
  - ✓ 0,5 % à 1 % de l'inventaire initial total du quartier de stockage MA-VL pour le rubidium 87, le zirconium 93, le béryllium 10 et le césium 135 ;
  - ✓ moins de 2 % pour les radionucléides présentant une rétention forte à très forte (dans les composants cimentaires et la couche du Callovo-Oxfordien) tels que les actinides et les lanthanides notamment.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0030-B

Figure 10-10 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du toit du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal excède 10^{-5} mol.an^{-1}*



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0031-B

Figure 10-11 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du toit du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal est compris entre 10^{-10} mol.an^{-1} et 10^{-5} mol.an^{-1}*

10.2.3.3 Les incidences radiologiques à l'exutoire « Pompage dans le Barrois »

10.2.3.3.1 Le forage intrusif dans le quartier de stockage HA

a) Biosphère tempérée

Les graphes de doses annuelles présentés ci-après sont associés au groupe de référence hypothétique « multi-activités » (cf. Chapitre 4 du présent volume). Par souci de lisibilité des graphes, seuls les radionucléides dont la dose maximale excède la valeur de 10^{-10} Sv.an^{-1} sont représentés.

Pour un forage intrusif dans le quartier de stockage HA, positionné au milieu d'une galerie d'accès aux alvéoles contenant des colis de déchets COG-800 (HA1), les figure 10-12, figure 10-13 et figure 10-14 montrent les évolutions des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, pour le groupe de référence « multi-activités », respectivement pour la classe d'âge adulte et la classe d'âge enfant (10 ans, 1 an), sur la base d'un débit de dilution à l'exutoire de 150 L.mn^{-1}.

Le tableau 10-1 présente les valeurs maximales de dose et les occurrences de ces doses maximales pour une vingtaine de radionucléides (triés par ordre décroissant de la dose maximale pour chaque classe d'âge), pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an).

Les doses maximales obtenues sont comprises entre 10 µSv an^{-1} et 55 µSv an^{-1} pour 3 radionucléides, le sélénium 79, le chlore 36 et le thorium 229, et sont comprises entre 1 µSv an^{-1} et 5 µSv an^{-1} pour le radium 226, le plomb 210, le molybdène 93 et l'américium 241.

La dose maximale obtenue est de l'ordre de 55 µSv an^{-1} pour le sélénium 79 et la classe d'âge « enfant de 1 an ».

Les dates d'occurrence de ces doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » sont :

- de quelques centaines d'années à quelques milliers d'années pour les radionucléides à vie courte ou moyenne tels que l'américium 241, le niobium 94, le molybdène 93 et le carbone 14 organique ;
- d'environ 50 000 ans pour les radionucléides mobiles, solubles et à vie longue (iode 129, chlore 36) ;
- d'environ 200 000 ans pour le sélénium 79, contrôlé par sa limite de solubilité dans la couche du Callovo-Oxfordien ;
- de quelques centaines de milliers d'années pour le thorium 229, le radium 226 et le plomb 210, contrôlés par la filiation radioactive et la limite de solubilité de leurs antécédents dans la couche du Callovo-Oxfordien.

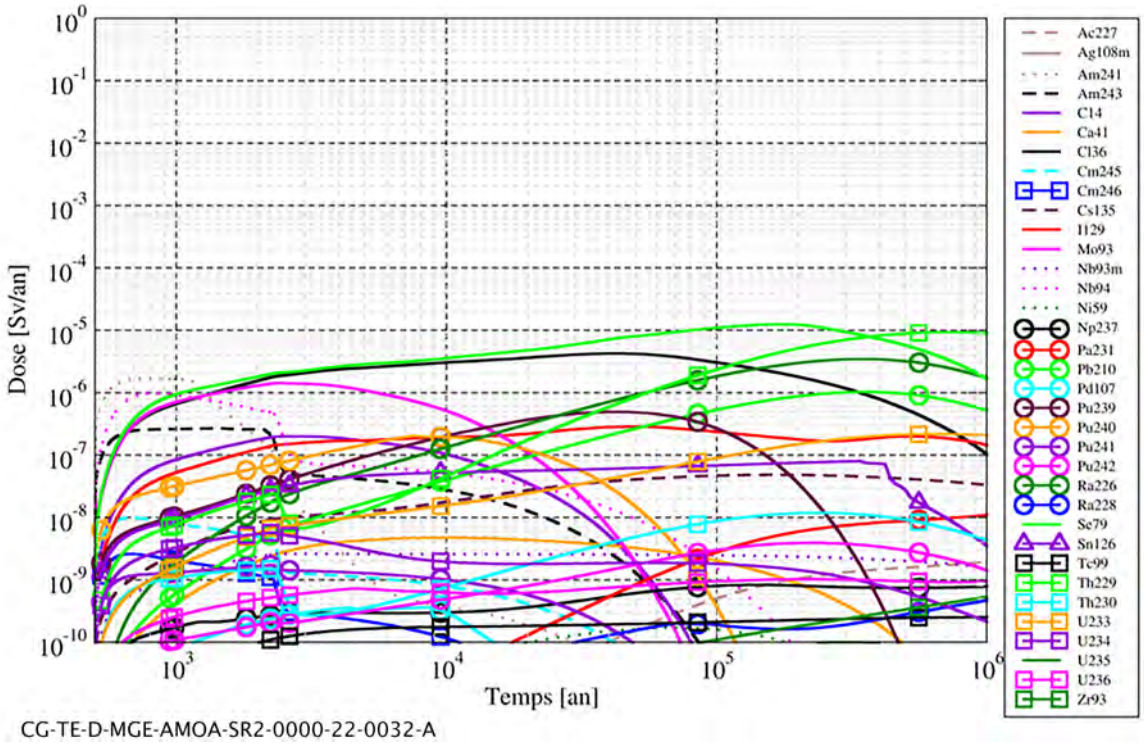


Figure 10-12 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte*

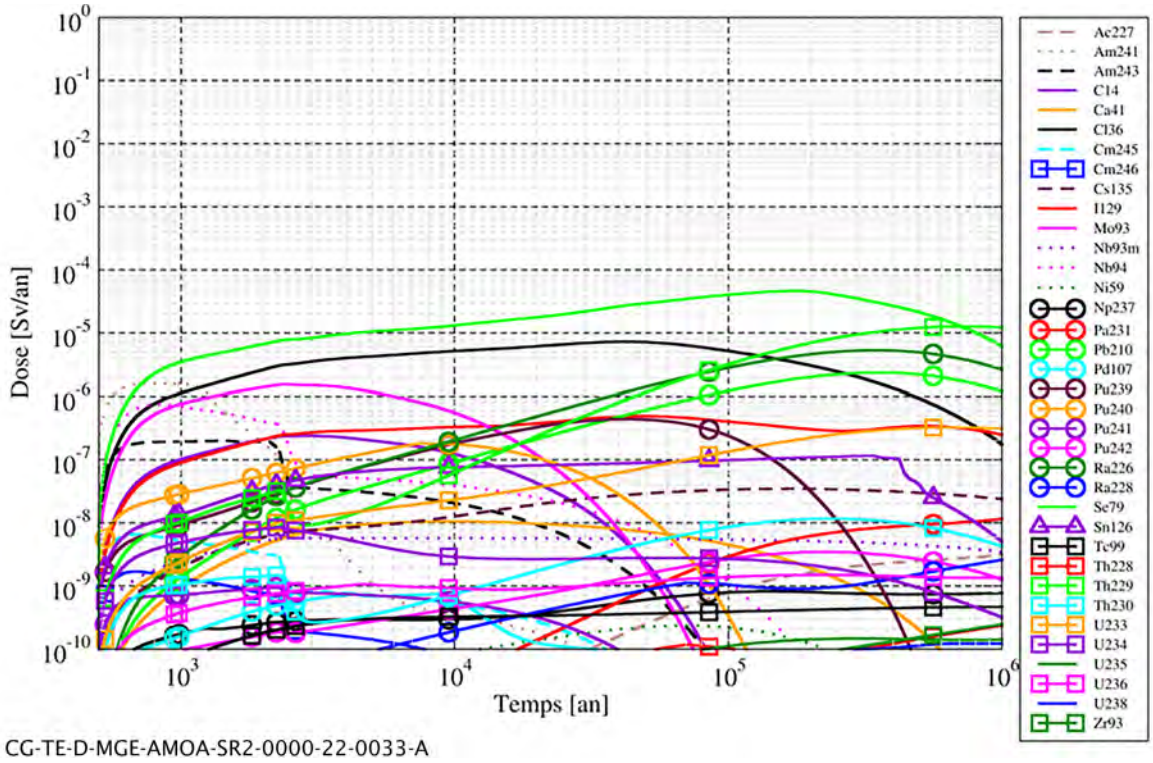


Figure 10-13 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans*

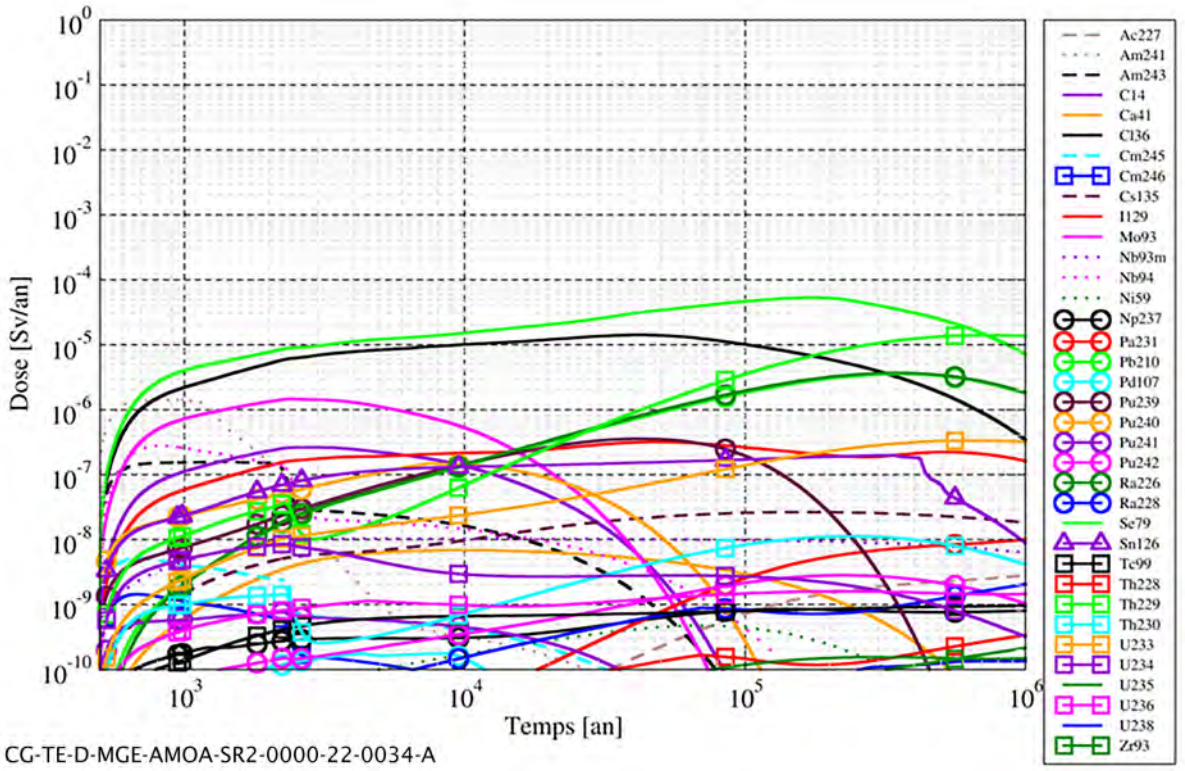


Figure 10-14 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an*

Tableau 10-1 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage HA : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an*

Forage géothermique (quartier de stockage HA) - Exutoire « Pompage au Barrois » (150 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère tempérée								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose maxi. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{79}Se	$1,3 \times 10^{-2}$	180	^{79}Se	$4,7 \times 10^{-2}$	180	^{79}Se	$5,4 \times 10^{-2}$	180
^{229}Th	$9,4 \times 10^{-3}$	720	^{229}Th	$1,3 \times 10^{-2}$	720	^{36}Cl	$1,4 \times 10^{-2}$	40
^{36}Cl	$4,3 \times 10^{-3}$	40	^{36}Cl	$7,3 \times 10^{-3}$	40	^{229}Th	$1,4 \times 10^{-2}$	720
^{226}Ra	$3,5 \times 10^{-3}$	340	^{226}Ra	$5,3 \times 10^{-3}$	340	^{226}Ra	$3,7 \times 10^{-3}$	340
^{241}Am	$1,7 \times 10^{-3}$	0,8	^{210}Pb	$2,4 \times 10^{-3}$	360	^{210}Pb	$3,5 \times 10^{-3}$	360
^{93}Mo	$1,4 \times 10^{-3}$	2,4	^{241}Am	$1,6 \times 10^{-3}$	0,8	^{93}Mo	$1,5 \times 10^{-3}$	2,4
^{210}Pb	$1,0 \times 10^{-3}$	360	^{93}Mo	$1,6 \times 10^{-3}$	2,4	^{241}Am	$1,4 \times 10^{-3}$	0,8
^{94}Nb	$9,9 \times 10^{-4}$	0,8	^{94}Nb	$7,5 \times 10^{-4}$	0,8	^{239}Pu	$3,6 \times 10^{-4}$	43
^{239}Pu	$5,0 \times 10^{-4}$	43	^{129}I	$4,9 \times 10^{-4}$	50	^{233}U	$3,4 \times 10^{-4}$	640
^{129}I	$2,9 \times 10^{-4}$	50	^{239}Pu	$4,4 \times 10^{-4}$	43	^{129}I	$3,2 \times 10^{-4}$	50
^{243}Am	$2,7 \times 10^{-4}$	1,4	^{233}U	$3,3 \times 10^{-4}$	640	^{94}Nb	$2,8 \times 10^{-4}$	0,8

Forage géothermique (quartier de stockage HA) - Exutoire « Pompage au Barrois » (150 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère tempérée								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose maxi. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{233}U	$2,2 \times 10^{-4}$	640	^{14}C	$2,4 \times 10^{-4}$	2,9	^{14}C	$2,6 \times 10^{-4}$	2,9
^{240}Pu	$2,0 \times 10^{-4}$	7,5	^{243}Am	$2,0 \times 10^{-4}$	1,4	^{126}Sn	$2,0 \times 10^{-4}$	340
^{14}C	$2,0 \times 10^{-4}$	2,9	^{240}Pu	$1,8 \times 10^{-4}$	7,5	^{243}Am	$1,6 \times 10^{-4}$	1,4
^{126}Sn	$8,0 \times 10^{-5}$	340	^{126}Sn	$1,2 \times 10^{-4}$	340	^{240}Pu	$1,5 \times 10^{-4}$	7,5
^{135}Cs	$4,9 \times 10^{-5}$	170	^{135}Cs	$3,5 \times 10^{-5}$	170	^{135}Cs	$2,7 \times 10^{-5}$	170
^{230}Th	$1,2 \times 10^{-5}$	230	^{230}Th	$1,2 \times 10^{-5}$	230	^{230}Th	$1,1 \times 10^{-5}$	230
^{231}Pa	$1,1 \times 10^{-5}$	> 1 000	^{231}Pa	$1,2 \times 10^{-5}$	> 1 000	^{93m}Nb	$1,0 \times 10^{-5}$	2,4
^{245}Cm	$1,0 \times 10^{-5}$	0,7	^{41}Ca	$1,1 \times 10^{-5}$	9,5	^{231}Pa	$1,0 \times 10^{-5}$	> 1 000
^{234}U	$5,7 \times 10^{-6}$	2,3	^{234}U	$8,5 \times 10^{-6}$	2,3	^{234}U	$8,6 \times 10^{-6}$	2,3

b) Biosphère chaude

Les graphes de doses annuelles présentés ci-après sont associés au groupe de référence hypothétique « multi-activités ». Par souci de lisibilité des graphes, seuls les radionucléides dont la dose maximale excède la valeur de 10^{-10} Sv.an^{-1} sont représentés.

Pour un forage intrusif dans le quartier de stockage HA, positionné au milieu d'une galerie d'accès aux alvéoles contenant des colis de déchets COG-800 (HA1), les figure 10-15, figure 10-16 et figure 10-17 montrent les évolutions des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, pour le groupe de référence « multi-activités », respectivement pour la classe d'âge adulte et la classe d'âge enfant (10 ans, 1 an), sur la base d'un débit de dilution à l'exutoire de 150 L.mn^{-1}.

Le tableau 10-2 présente les valeurs maximales de dose et les occurrences de ces doses maximales pour une vingtaine de radionucléides (triés par ordre décroissant de la dose maximale pour chaque classe d'âge), pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an).

Les doses maximales obtenues pour la biosphère chaude sont de l'ordre de 10 % à 20 % supérieures à celles de la biosphère tempérée pour la plupart des radionucléides. Elles sont comprises entre 10 µSv.an^{-1} et 60 µSv.an^{-1} pour les 3 mêmes radionucléides, à savoir le sélénium 79, le thorium 229 et le chlore 36, et comprises entre 1 µSv.an^{-1} et 10 µSv.an^{-1} pour le radium 226, le plomb 210, le molybdène 93 et l'américium 241.

La dose maximale obtenue est d'environ 60 µSv.an^{-1} pour le sélénium 79 et la classe d'âge « enfant de 1 an ».

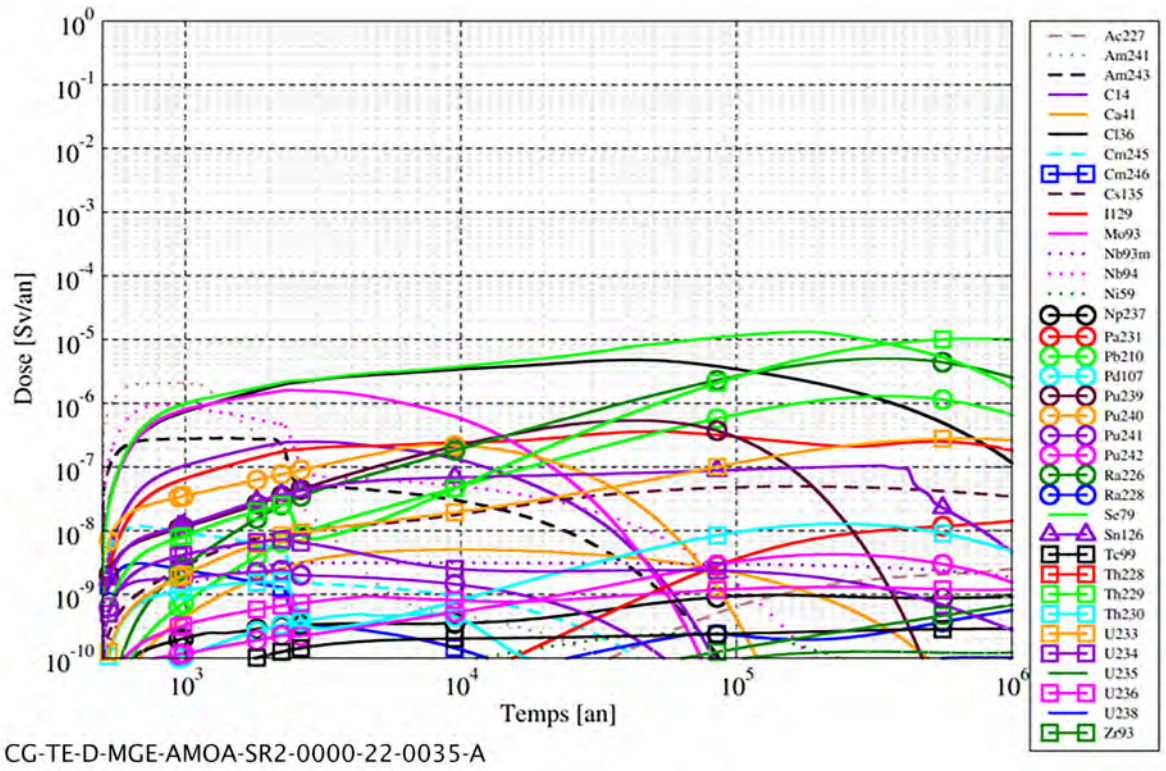


Figure 10-15 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte*

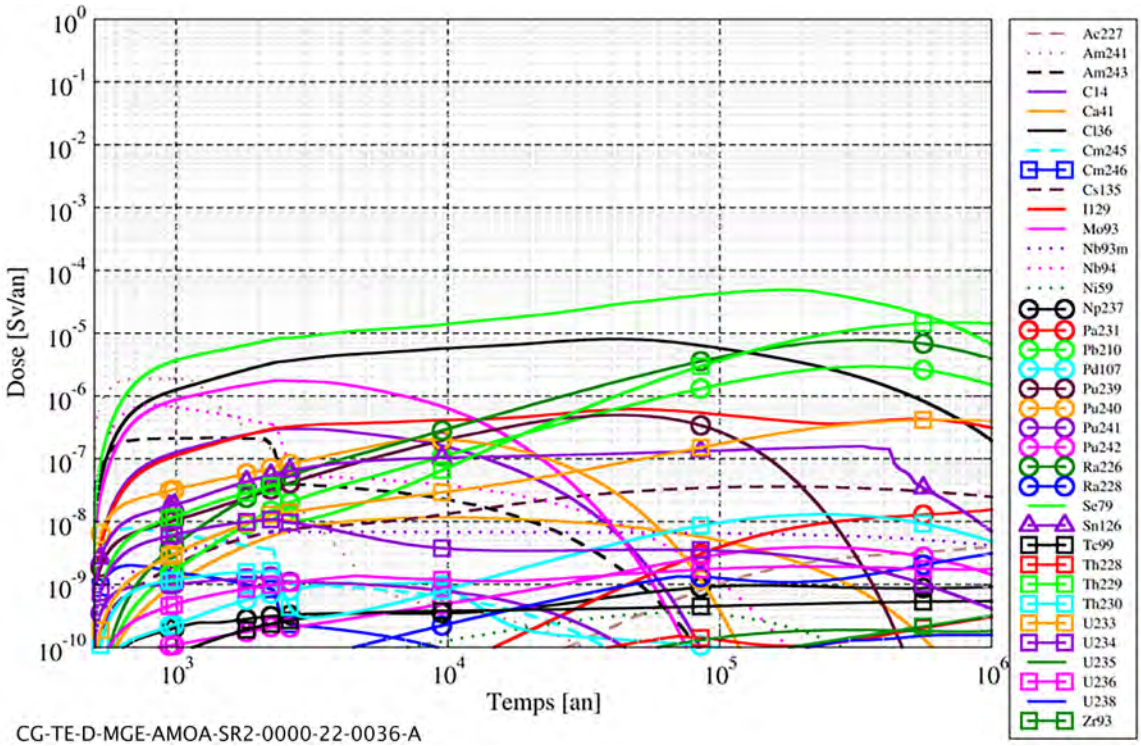


Figure 10-16 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans*

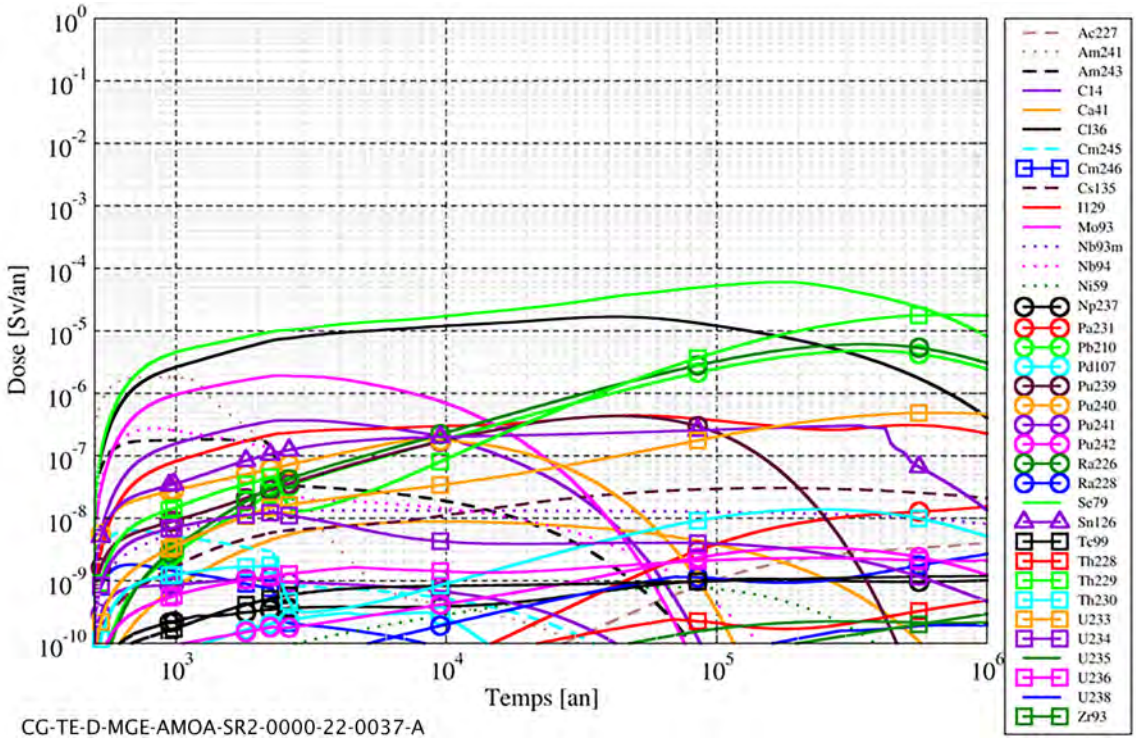


Figure 10-17 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an*

Tableau 10-2 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage HA : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an*

Forage géothermique (quartier de stockage HA) - Exutoire « Pompage au Barrois » (150 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère chaude								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{79}Se	$1,3 \times 10^{-2}$	180	^{79}Se	$4,9 \times 10^{-2}$	180	^{79}Se	$6,1 \times 10^{-2}$	180
^{229}Th	$1,0 \times 10^{-2}$	720	^{229}Th	$1,5 \times 10^{-2}$	720	^{229}Th	$1,8 \times 10^{-2}$	720
^{226}Ra	$5,1 \times 10^{-3}$	340	^{36}Cl	$8,1 \times 10^{-3}$	40	^{36}Cl	$1,7 \times 10^{-2}$	40
^{36}Cl	$4,8 \times 10^{-3}$	40	^{226}Ra	$7,8 \times 10^{-3}$	340	^{226}Ra	$6,1 \times 10^{-3}$	340
^{241}Am	$2,1 \times 10^{-3}$	0,8	^{210}Pb	$3,0 \times 10^{-3}$	360	^{210}Pb	$4,8 \times 10^{-3}$	360
^{93}Mo	$1,6 \times 10^{-3}$	2,4	^{241}Am	$1,9 \times 10^{-3}$	0,8	^{93}Mo	$1,9 \times 10^{-3}$	2,4
^{210}Pb	$1,3 \times 10^{-3}$	360	^{93}Mo	$1,8 \times 10^{-3}$	2,4	^{241}Am	$1,8 \times 10^{-3}$	0,8
^{94}Nb	$9,5 \times 10^{-4}$	0,8	^{94}Nb	$7,3 \times 10^{-4}$	0,8	^{233}U	$4,9 \times 10^{-4}$	640
^{239}Pu	$5,4 \times 10^{-4}$	43	^{129}I	$6,2 \times 10^{-4}$	50	^{129}I	$4,5 \times 10^{-4}$	50
^{129}I	$3,6 \times 10^{-4}$	50	^{239}Pu	$5,0 \times 10^{-4}$	43	^{239}Pu	$4,3 \times 10^{-4}$	43

Forage géothermique (quartier de stockage HA) - Exutoire « Pompage au Barrois » (150 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère chaude								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{243}Am	$2,9 \times 10^{-4}$	1,4	^{233}U	$4,2 \times 10^{-4}$	640	^{14}C	$3,7 \times 10^{-4}$	2,9
^{233}U	$2,8 \times 10^{-4}$	640	^{14}C	$3,0 \times 10^{-4}$	2,9	^{126}Sn	$3,1 \times 10^{-4}$	340
^{14}C	$2,5 \times 10^{-4}$	2,9	^{243}Am	$2,2 \times 10^{-4}$	1,4	^{94}Nb	$2,7 \times 10^{-4}$	0,8
^{240}Pu	$2,3 \times 10^{-4}$	7,5	^{240}Pu	$2,1 \times 10^{-4}$	7,5	^{243}Am	$1,9 \times 10^{-4}$	1,4
^{126}Sn	$1,1 \times 10^{-4}$	340	^{126}Sn	$1,6 \times 10^{-4}$	340	^{240}Pu	$1,8 \times 10^{-4}$	7,5
^{135}Cs	$5,0 \times 10^{-5}$	170	^{135}Cs	$3,6 \times 10^{-5}$	170	^{135}Cs	$3,1 \times 10^{-5}$	170
^{231}Pa	$1,4 \times 10^{-5}$	> 1 000	^{231}Pa	$1,6 \times 10^{-5}$	> 1 000	^{231}Pa	$1,5 \times 10^{-5}$	> 1 000
^{230}Th	$1,3 \times 10^{-5}$	230	^{230}Th	$1,3 \times 10^{-5}$	230	^{230}Th	$1,4 \times 10^{-5}$	230
^{245}Cm	$1,2 \times 10^{-5}$	0,7	^{41}Ca	$1,2 \times 10^{-5}$	9,5	^{93m}Nb	$1,3 \times 10^{-5}$	2,4
^{234}U	$7,3 \times 10^{-6}$	2,3	^{234}U	$1,1 \times 10^{-5}$	2,3	^{234}U	$1,2 \times 10^{-5}$	2,3

10.2.3.3.2 Le forage intrusif dans le quartier de stockage MA-VL

a) Biosphère tempérée

Les graphes de doses annuelles présentés ci-après sont associés au groupe de référence hypothétique « multi-activités » (cf. Chapitre 4 du présent volume). Par souci de lisibilité des graphes, seuls les radionucléides dont la dose maximale excède la valeur de 10^{-5} Sv.an^{-1} sont représentés.

Pour un forage intrusif dans l'alvéole le plus chargé du quartier de stockage MA-VL, les figure 10-18, figure 10-19 et figure 10-20 montrent les évolutions des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, pour le groupe de référence « multi-activités », respectivement pour la classe d'âge adulte et la classe d'âge enfant (10 ans, 1 an), sur la base d'un débit de dilution à l'exutoire de 150 L.mn^{-1}.

Le tableau 10-3 présente les valeurs maximales de dose et les occurrences de ces doses maximales pour une vingtaine de radionucléides (triés par ordre décroissant de la dose maximale pour chaque classe d'âge), pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an).

Les doses maximales obtenues sont comprises :

- entre 10 mSv an^{-1} et 35 mSv an^{-1} pour 2 radionucléides, le carbone 14 (organique) et l'argent 108 m ;
- entre 1 mSv.an^{-1} et 2 mSv.an^{-1} pour le chlore 36, le molybdène 93 et le radium 226 ;
- entre 0,1 mSv.an^{-1} et 1 mSv.an^{-1} pour le plomb 210, le niobium 94, le sélénium 79, l'étain 126, le thorium 229, l'aluminium 26, le technétium 99, le radium 228 et le thorium 228.

La dose maximale obtenue est de l'ordre de 35 mSv an^{-1} pour le carbone 14 et la classe d'âge « enfant de 1 an ». Ce niveau de dose maximale reste inférieur aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

Les dates d'occurrence de ces doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » sont :

- obtenues peu après 500 ans (date d'occurrence du forage intrusif) pour les radionucléides mobiles, à vie moyenne et longue tels que le carbone 14 (organique), l'argent 108 m, le molybdène 93, le chlore 36, le sélénium 79 et l'iode 129 ;
- d'environ 600 ans et 700 ans, respectivement pour l'aluminium 26 et l'étain 126 ;
- d'environ 25 000 ans et 45 000 ans, respectivement pour le thorium 229 et le niobium 94 ;
- de plusieurs centaines de milliers d'années pour le thorium 228, le radium 228, le radium 226 et le plomb 210, contrôlés par la filiation radioactive et la limite de solubilité de leurs antécédents dans la couche du Callovo-Oxfordien et le béton des alvéoles MA-VL.

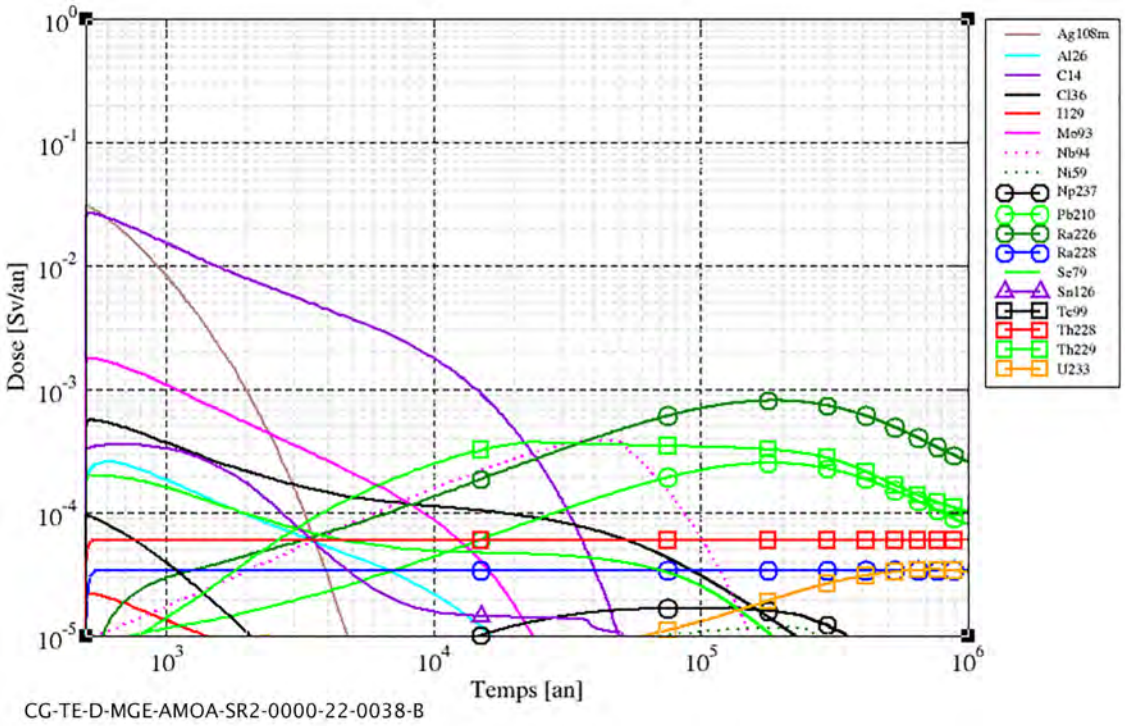


Figure 10-18 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte*

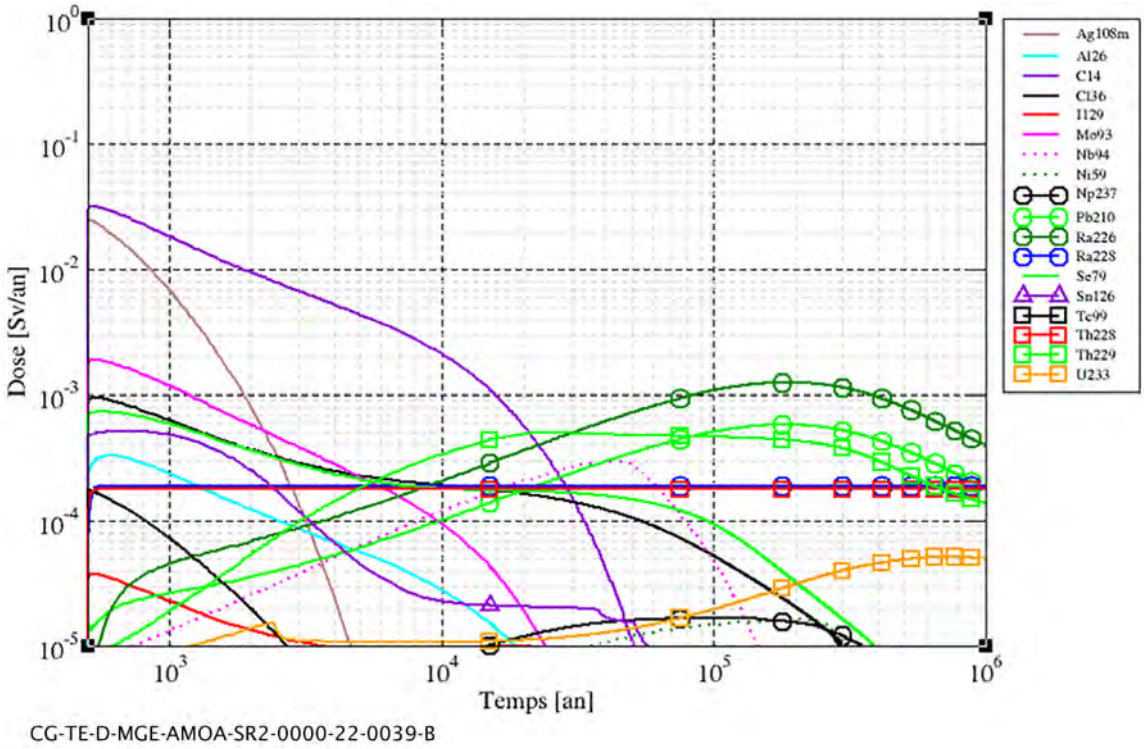


Figure 10-19 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans*

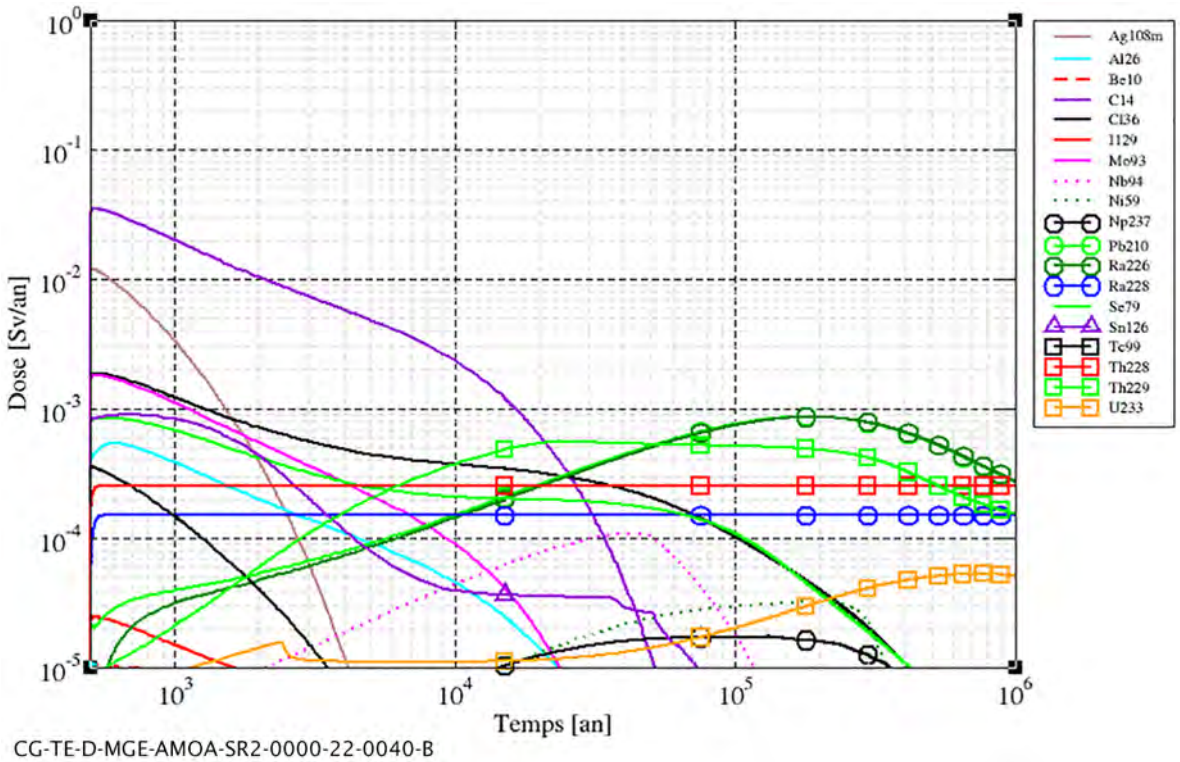


Figure 10-20 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an*

Tableau 10-3 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage MA-VL : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an*

Forage géothermique (quartier de stockage MA-VL) - Exutoire « Pompage au Barrois » (150 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère tempérée								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{108m}Ag	30	0,51	^{14}C	32	0,52	^{14}C	35	0,52
^{14}C	27	0,52	^{108m}Ag	25	0,51	^{108m}Ag	12	0,51
^{93}Mo	1,8	0,52	^{93}Mo	1,9	0,52	^{36}Cl	1,9	0,52
^{226}Ra	0,8	190	^{226}Ra	1,25	190	^{93}Mo	1,8	0,52
^{36}Cl	0,6	0,52	^{36}Cl	0,95	0,52	^{210}Pb	0,9	180
^{94}Nb	0,4	44	^{79}Se	0,75	0,56	^{226}Ra	0,9	190
^{229}Th	0,38	24	^{210}Pb	0,6	180	^{126}Sn	0,9	0,67
^{126}Sn	0,36	0,67	^{126}Sn	0,52	0,67	^{79}Se	0,85	0,56
^{26}Al	0,26	0,61	^{229}Th	0,5	24	^{229}Th	0,56	24
^{210}Pb	0,25	180	^{26}Al	0,33	0,61	^{26}Al	0,54	0,61

Forage géothermique (quartier de stockage MA-VL) - Exutoire « Pompage au Barrois » (150 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère tempérée								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{79}Se	0,2	0,56	^{94}Nb	0,3	44	^{99}Tc	0,36	0,5
^{99}Tc	$9,6 \times 10^{-2}$	0,5	^{228}Ra	0,19	980	^{228}Th	0,26	550
^{228}Th	$6,0 \times 10^{-2}$	600	^{228}Th	0,18	520	^{228}Ra	0,15	990
^{233}U	$3,5 \times 10^{-2}$	740	^{99}Tc	0,18	0,5	^{94}Nb	0,11	44
^{228}Ra	$3,4 \times 10^{-2}$	990	^{233}U	$5,2 \times 10^{-2}$	740	^{233}U	$5,4 \times 10^{-2}$	740
^{129}I	$2,2 \times 10^{-2}$	0,52	^{129}I	$3,8 \times 10^{-2}$	0,52	^{59}Ni	$3,2 \times 10^{-2}$	210
^{237}Np	$1,7 \times 10^{-2}$	130	^{237}Np	$1,7 \times 10^{-2}$	130	^{129}I	$2,5 \times 10^{-2}$	0,52
^{59}Ni	$1,2 \times 10^{-2}$	210	^{59}Ni	$1,6 \times 10^{-2}$	210	^{237}Np	$1,7 \times 10^{-2}$	130
^{231}Pa	$6,6 \times 10^{-3}$	200	^{231}Pa	$6,9 \times 10^{-3}$	200	^{10}Be	$1,1 \times 10^{-2}$	0,5
^{230}Th	$3,5 \times 10^{-3}$	210	^{10}Be	$5,5 \times 10^{-3}$	0,5	^{63}Ni	$9,3 \times 10^{-3}$	0,95

b) Biosphère chaude

Les graphes de doses annuelles présentés ci-après sont associés au groupe de référence hypothétique « multi-activités ». Par souci de lisibilité des graphes, seuls les radionucléides dont la dose maximale excède la valeur de 10^{-5} Sv.an^{-1} sont représentés.

Pour un forage intrusif dans l'alvéole le plus chargé du quartier de stockage MA-VL, les figure 10-21, figure 10-22 et figure 10-23 montrent les évolutions des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, pour le groupe de référence « multi-activités », respectivement pour la classe d'âge adulte et la classe d'âge enfant (10 ans, 1 an), sur la base d'un débit de dilution à l'exutoire de 150 L.mn^{-1}.

Le tableau 10-4 présente les valeurs maximales de dose et les occurrences de ces doses maximales pour une vingtaine de radionucléides (triés par ordre décroissant de la dose maximale pour chaque classe d'âge), pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an).

Les doses maximales obtenues pour la biosphère chaude sont de l'ordre de 10 % à 20 % supérieures à celles de la biosphère tempérée pour la plupart des radionucléides. Elles sont comprises :

- entre 10 mSv.an^{-1} et 50 mSv.an^{-1} pour les 2 mêmes radionucléides, à savoir le carbone 14 (organique) et l'argent 108 m ;
- entre 1 mSv.an^{-1} et 2,5 mSv.an^{-1} pour les 3 mêmes radionucléides, à savoir le molybdène 93, le chlore 36 et le radium 226 ;
- entre 0,1 mSv.an^{-1} et 1 mSv.an^{-1} pour le plomb 210, l'étain 126, le sélénium 79, l'aluminium 26, le niobium 94, le thorium 229, le technétium 99, le radium 228 et le thorium 228.

La dose maximale obtenue est de l'ordre de 50 mSv an^{-1} pour le carbone 14 et la classe d'âge « enfant de 1 an ». Ce niveau de dose maximale reste inférieur aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

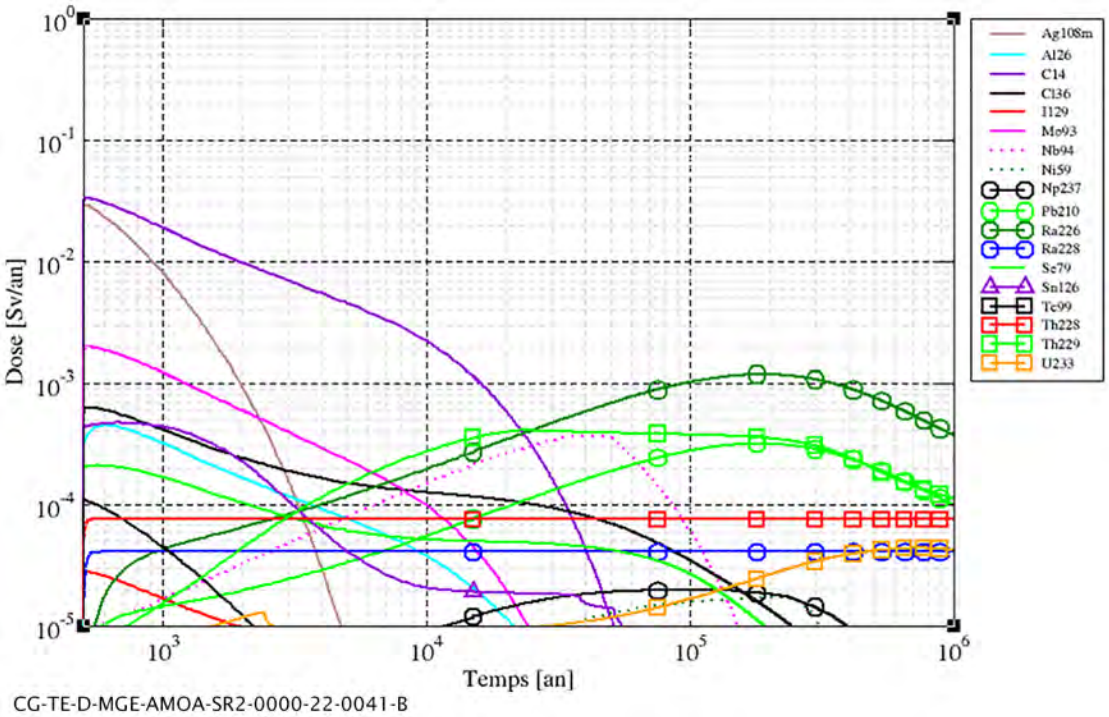


Figure 10-21 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte*

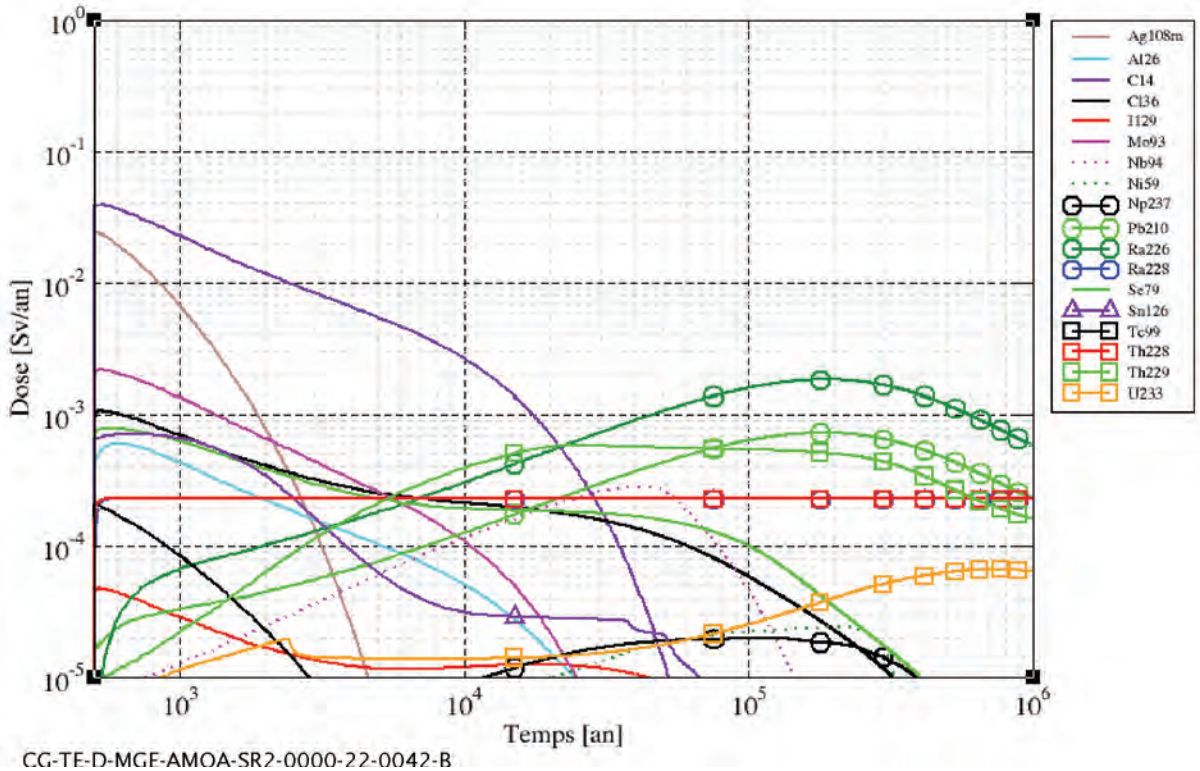


Figure 10-22 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans*

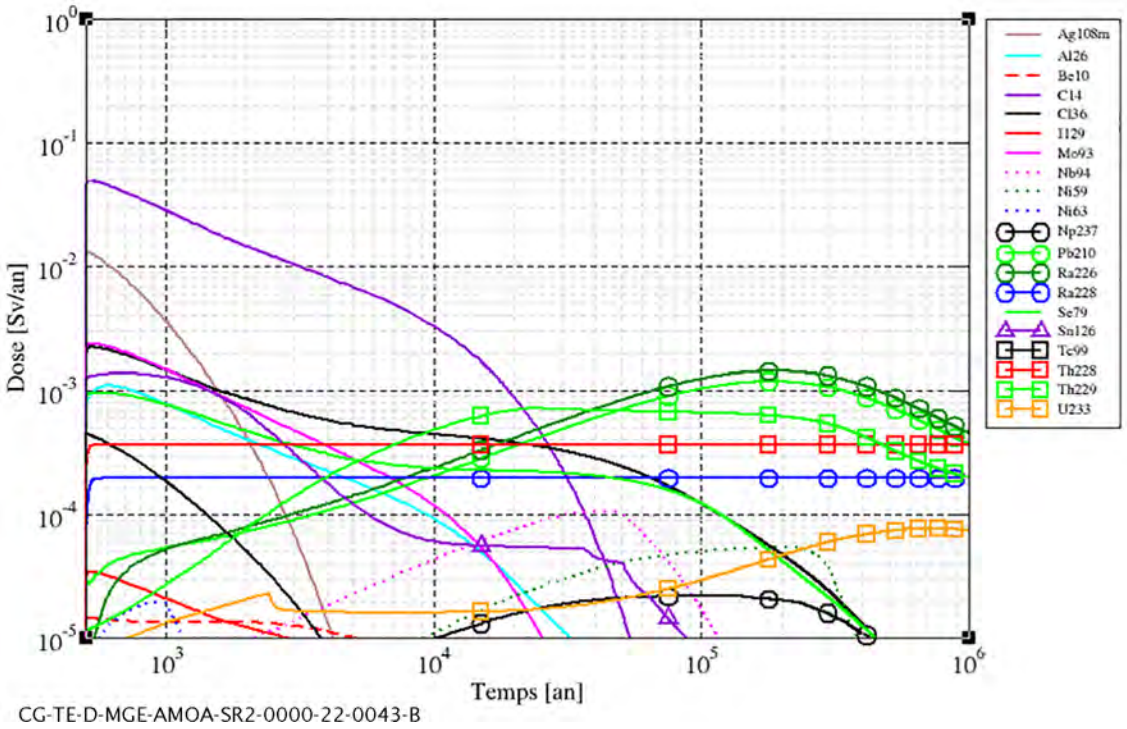


Figure 10-23 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an*

Tableau 10-4 *Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage MA-VL : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an*

Forage géothermique (quartier de stockage MA-VL) - Exutoire « Pompage au Barrois » (150 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère chaude								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{14}C	33	0,52	^{14}C	40	0,52	^{14}C	49	0,52
^{108m}Ag	29	0,51	^{108m}Ag	24	0,51	^{108m}Ag	13	0,51
^{93}Mo	2,0	0,52	^{93}Mo	2,2	0,52	^{93}Mo	2,4	0,52
^{226}Ra	1,2	190	^{226}Ra	1,8	190	^{36}Cl	2,2	0,52
^{36}Cl	0,63	0,52	^{36}Cl	1,1	0,52	^{226}Ra	1,45	190
^{126}Sn	0,48	0,67	^{79}Se	0,79	0,56	^{126}Sn	1,4	0,67
^{26}Al	0,45	0,61	^{210}Pb	0,73	180	^{210}Pb	1,2	180
^{229}Th	0,41	24	^{126}Sn	0,72	0,67	^{26}Al	1,1	0,61
^{94}Nb	0,37	44	^{26}Al	0,61	0,61	^{79}Se	0,96	0,56
^{210}Pb	0,32	180	^{229}Th	0,59	24	^{229}Th	0,73	24

Forage géothermique (quartier de stockage MA-VL) - Exutoire « Pompage au Barrois » (150 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère chaude								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. en sortie de forage (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{79}Se	0,21	0,56	^{94}Nb	0,28	44	^{99}Tc	0,45	0,5
^{99}Tc	0,11	0,5	^{228}Ra	0,23	990	^{228}Th	0,37	550
^{228}Th	$7,6 \times 10^{-2}$	600	^{228}Th	0,23	500	^{228}Ra	0,2	990
^{233}U	$4,4 \times 10^{-2}$	740	^{99}Tc	0,21	0,5	^{94}Nb	0,11	44
^{228}Ra	$4,1 \times 10^{-2}$	990	^{233}U	$6,7 \times 10^{-2}$	740	^{233}U	$7,7 \times 10^{-2}$	740
^{129}I	$2,8 \times 10^{-2}$	0,52	^{129}I	$4,8 \times 10^{-2}$	0,52	^{59}Ni	$5,5 \times 10^{-2}$	210
^{237}Np	$2,0 \times 10^{-2}$	130	^{59}Ni	$2,4 \times 10^{-2}$	210	^{129}I	$3,4 \times 10^{-2}$	0,52
^{59}Ni	$1,7 \times 10^{-2}$	210	^{237}Np	$2,0 \times 10^{-2}$	130	^{237}Np	$2,2 \times 10^{-2}$	130
^{231}Pa	$8,5 \times 10^{-3}$	200	^{231}Pa	$9,2 \times 10^{-3}$	200	^{63}Ni	$1,9 \times 10^{-2}$	0,95
^{63}Ni	$5,9 \times 10^{-3}$	0,95	^{63}Ni	$9,0 \times 10^{-3}$	0,95	^{10}Be	$1,5 \times 10^{-2}$	0,5

10.3 Le scénario de forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle

10.3.1 La présentation générale du scénario

Le scénario « Forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle » considère que le forage de reconnaissance atteint sa cote prévisionnelle et constitue un court-circuit local des gardes supérieures et inférieures de la couche du Callovo-Oxfordien et induit une possibilité de migration des radionucléides vers l'exutoire du Dogger dans la zone de fracturation diffuse.

10.3.2 La description du scénario de forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle

Le scénario considère la réalisation d'un forage de 216 mm de diamètre pour l'exploration des niveaux perméables du Dogger. Ce forage perfore un ouvrage du stockage, mais il est poursuivi jusqu'au Dogger. Il constitue un court-circuit de la garde inférieure du Callovo-Oxfordien avec l'aquifère du Dogger, en continuité hydraulique avec la zone de fracturation diffuse située à l'ouest de la ZIOS (cf. Figure 10-24).

L'évaluation quantitative est réalisée en s'appuyant sur les données et paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale hormis pour le gradient de charge hydraulique vertical et la répartition de l'inventaire dans les alvéoles MA-VL. En effet :

- pour les scénarios d'intrusion humaine par forage, il est fait le choix de retenir la valeur maximale du gradient de charge hydraulique vertical descendant considéré en situation enveloppe du SEN ;
- la distribution de l'inventaire radiologique est pilotée par l'activité de chaque radionucléide selon une approche similaire à celle retenue dans le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2) (cf. Chapitre 10.3.2.2 du présent volume).

L'exutoire retenu est le pompage dans le Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse (cf. Figure 10-24). Les modalités de représentation de cet exutoire sont les mêmes que celles définies à des fins de consommation d'eau et d'exploitation agricole par le groupe de référence hypothétique défini pour l'exutoire Dogger (cf. Chapitre 4 du présent volume). L'évaluation considère :

- un groupe de référence hypothétique « multi-activités » ;
- une biosphère tempérée et une biosphère chaude type Cr ;
- les adultes, les enfants de 10 ans et les enfants de 1 an.

La date de l'intrusion humaine involontaire est définie en cohérence avec les recommandations du Guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1), elle est fixée à 500 ans après la fermeture définitive du stockage.

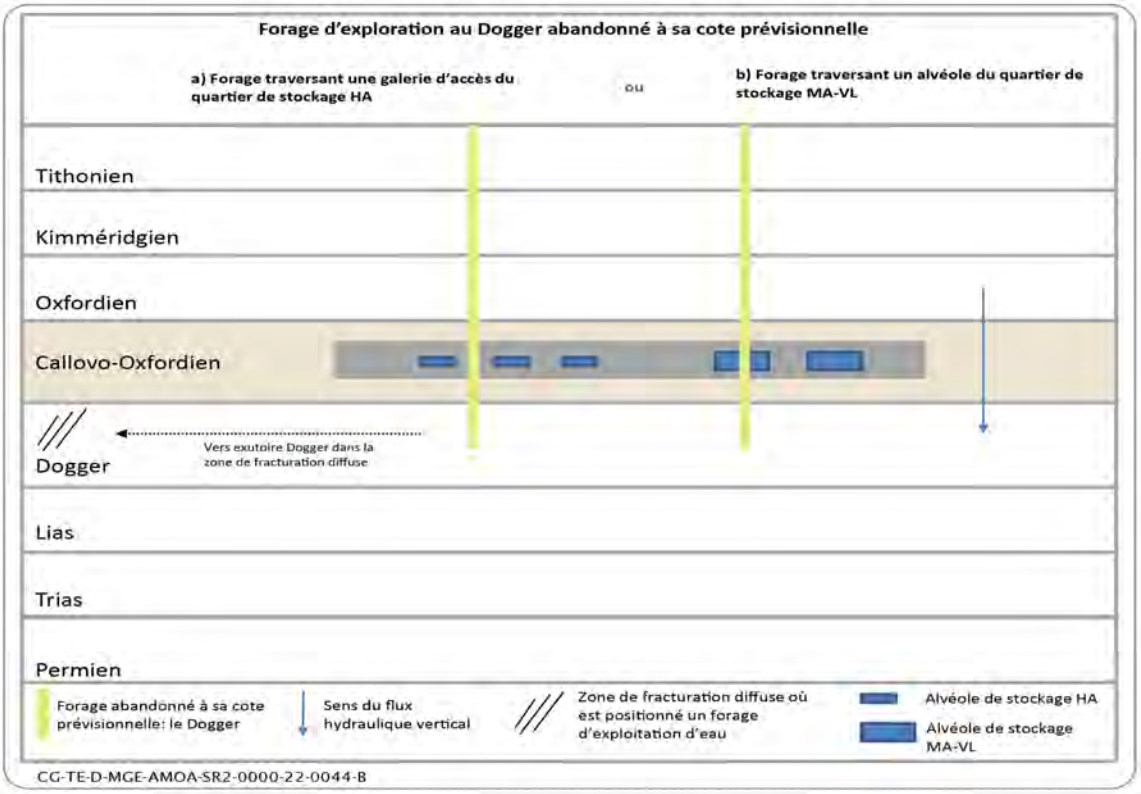


Figure 10-24 Représentation schématique du scénario de forage intrusif en vue d'une exploration du Dogger abandonné à sa profondeur cible

10.3.2.1 La localisation des forages

Deux cas sont traités séparément en considérant les mêmes hypothèses que celles retenues pour le scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage (cf. Chapitre 10.2.2.1.1 du présent volume), à savoir :

- pour le forage interceptant le quartier de stockage HA : celui-ci est positionné dans la galerie d'accès sud à la tranche nord-ouest du quartier de stockage des déchets HA1, au droit des alvéoles de déchets COG-800 dont l'activité en iode 129 par unité de surface est la plus forte (cf. Figure 10-3) ;
- pour le forage interceptant le quartier de stockage MA-VL : celui-ci est positionné à l'emplacement où le gradient de charge hydraulique descendant est favorable au transfert convectif des radionucléides vers l'aquifère du Dogger, au droit du fond de l'alvéole MA-VL situé au fond (nord-est) du quartier de stockage MA-VL, (cf. Figure 10-4).

10.3.2.2 L'inventaire radiologique et sa distribution

L'inventaire radiologique et sa distribution sont les mêmes que ceux décrits pour le forage arrêté au niveau du stockage et décrit au chapitre 10.2.2.1.2 du présent volume.

10.3.2.3 La conceptualisation du scénario

Afin d'assurer une représentation majorante du transport convectif dans le forage intrusif, ce scénario s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- les ouvrages souterrains sont implantés avec une garde inférieure de Callovo-Oxfordien de 50 mètres ;

- le gradient de charge hydraulique descendant au droit du forage dans le quartier de stockage HA est le gradient descendant maximal estimé au droit de la ZIOS en situation enveloppe par le modèle hydrogéologique reposant sur l'évolution géodynamique maximaliste, soit -0,06 $m.m^{-1}$;
- le gradient de charge hydraulique descendant au droit du forage dans le quartier de stockage MA-VL est le gradient descendant maximal estimé au droit de la ZIOS en situation enveloppe par le modèle hydrogéologique reposant sur l'évolution géodynamique maximaliste, soit -0,06 $m.m^{-1}$;
- comme en scénario d'évolution normale, le stockage est supposé initialement saturé ;
- la conductivité hydraulique du matériau utilisé pour remblayer le forage est 10^{-5} $m.s^{-1}$, afin de garantir un débit d'eau maximal par le forage ;
- l'eau de l'alvéole (et les radionucléides qu'elle contient) est directement prélevée par le forage intrusif ;
- dans le cas du forage dans le quartier de stockage HA, l'intrusion humaine involontaire a lieu dans une galerie d'accès. Le transfert entre les alvéoles et le forage intrusif contribue à atténuer le flux de radionucléides ;
- les matériaux utilisés pour remblayer le forage intrusif n'ont pas de propriétés de rétention ($Csat = \infty$, $Kd = 0$) et les coefficients de diffusion sont définis en fonction de la porosité ($De = 6,9 \times 10^{-10}$ $m^2.s^{-1}$).

10.3.2.4 Les indicateurs considérés

Les indicateurs utilisés pour évaluer la robustesse du système de stockage, ainsi que les incidences radiologiques sur l'homme, sont quantifiés au niveau du stockage, en sortie du forage intrusif, et dans le forage d'exploitation à l'exutoire du Dogger :

- les champs de charges hydrauliques et les débits d'eau drainés par le forage permettent d'apprécier l'influence du forage intrusif sur les circulations hydrauliques dans le système de stockage ;
- les débits molaires de radionucléides transitant par le forage jusqu'au mur de la couche du Callovo-Oxfordien permettent d'apprécier l'influence du forage intrusif sur le transfert des radionucléides ;
- l'indicateur final d'évolution de la dose à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », évaluée selon les hypothèses définies pour cet exutoire. Dans le cas particulier des forages (SIHI), il n'y a pas de sommation au sens cumul des doses des différents radionucléides, car cela supposerait qu'un alvéole puisse contenir les familles contenant tous les radionucléides à leur concentration maximale ce qui n'a pas de sens physique pour ces scénarios (cf. Chapitre 4 du présent volume).

10.3.3 Les résultats pour le scénario de forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle

10.3.3.1 Le comportement hydraulique

10.3.3.1.1 Le forage intrusif dans le quartier de stockage HA

La figure 10-25 présente les champs de charges hydrauliques dans un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif.

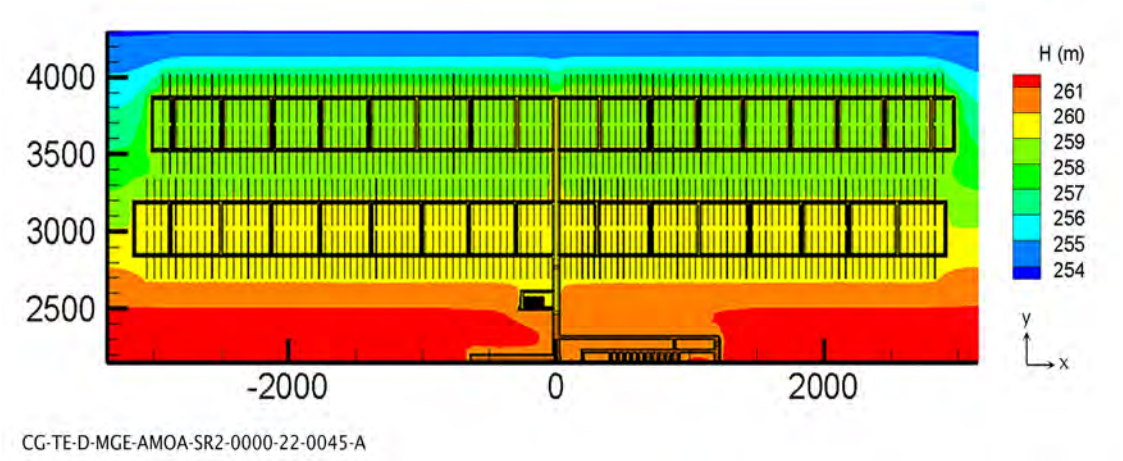
Le forage intrusif d'exploration du Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle traverse l'ensemble de la couche du Callovo-Oxfordien, les charges hydrauliques aux bornes du forage (aux limites de la couche du Callovo-Oxfordien) sont donc identiques à celles du toit et du mur de la couche du Callovo-Oxfordien, soit respectivement les charges de l'Oxfordien et du Dogger. Le gradient de charge hydraulique vertical dans le forage a une intensité de 0,06 $m.m^{-1}$ et il génère dans le forage un flux d'eau descendant.

Dans ces conditions, le forage :

- est à l'équilibre hydraulique avec la couche du Callovo-Oxfordien et il est alimenté depuis l'Oxfordien ;
- n'induit pas de perte de charge significative au sein des ouvrages de stockage qui pourrait être à l'origine de phénomènes convectifs horizontaux depuis l'ensemble des alvéoles en direction du forage, la perte de charge dans l'ensemble du quartier de stockage HA s'établissant à environ 0,6 mètre ;
- « draine » un débit d'eau de l'ordre de 1 mètre cube par an vers le Dogger.

Cartographie de charges hydrauliques dans le plan horizontal traversant les ouvrages de stockage

Sans forage



Avec forage

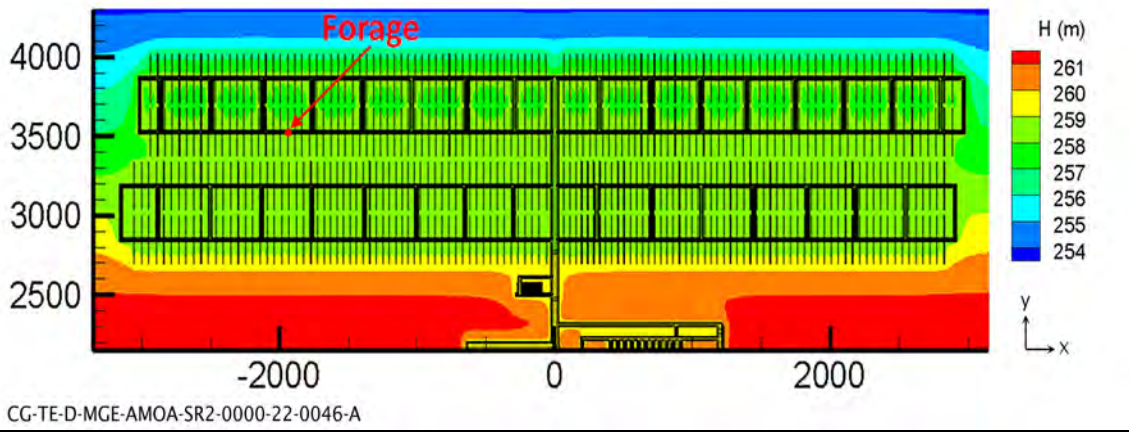


Figure 10-25 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage HA : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif*

10.3.3.1.2 Le forage intrusif dans le quartier de stockage MA-VL

La figure 10-26 présente les champs de charges hydrauliques dans un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif.

De même que pour le quartier de stockage HA, le forage est à l'équilibre hydraulique avec la couche du Callovo-Oxfordien. Il est alimenté en quasi-totalité par l'Oxfordien et draine un débit d'eau de l'ordre de 0,6 mètre cube par an vers le Dogger. Dans ces conditions, le forage n'induit pas de perte de charge significative dans les ouvrages de stockage. La perte de charge est inférieure à un mètre dans le quartier de stockage MA-VL.

Cartographie de charges hydrauliques dans le plan horizontal traversant les ouvrages de stockage	
Sans forage	Avec forage

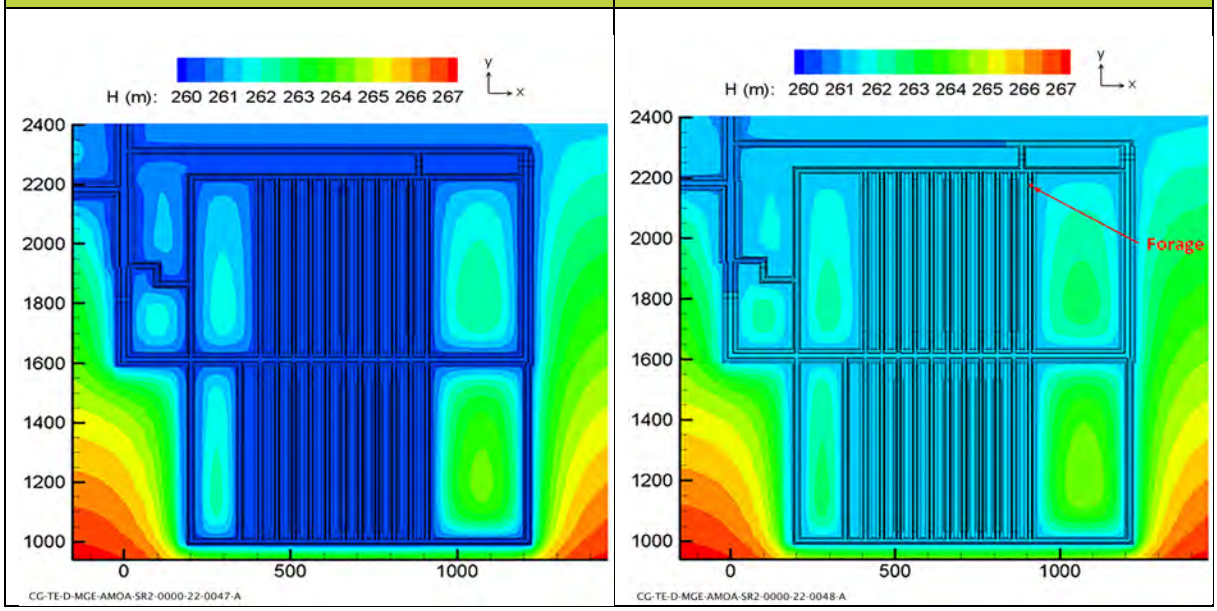


Figure 10-26 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage MA-VL : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif*

10.3.3.2 Le transfert des radionucléides dans le stockage et dans le forage

10.3.3.2.1 Le forage intrusif dans le quartier de stockage HA

La figure 10-27 présente les historiques des débits molaires en sortie du forage au niveau du mur du Callovo-Oxfordien, pour les radionucléides dont le débit molaire maximal excède 10^{-10} mol.an^{-1} sur le million d'années. L'analyse des résultats montre que :

- les débits molaires instantanés les plus élevés sont obtenus pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue (sélénium 79, chlore 36 et iode 129) caractérisés également par un inventaire radiologique significatif. Les débits molaires maximaux sont respectivement de $6{,}2 \times 10^{-5}$ mol.an^{-1} pour le sélénium 79, $3{,}8 \times 10^{-5}$ mol.an^{-1} pour le chlore 36 et $2{,}9 \times 10^{-5}$ mol.an^{-1} pour l'iode 129. Du fait d'une perturbation hydraulique induite plus faible que celle obtenue pour le scénario de forage abandonné à la cote du stockage (cf. Chapitre 10.2.3 du présent volume), les débits molaires maximaux sortant du forage au niveau du mur du Callovo-Oxfordien pour ces trois radionucléides sont inférieurs d'environ un ordre de grandeur à ceux sortant du forage au niveau du toit du Callovo-Oxfordien pour le scénario de forage abandonné à la cote du stockage (cf. Chapitre 10.2.3)

Cet effet résulte (i) d'un diamètre 2 fois plus faible du forage (section de forage divisée par quatre), et (ii) d'un gradient de charge hydraulique vertical (descendant) 2,3 fois plus faible pour le scénario de forage exploratoire du Dogger comparé à celui (ascendant) du scénario de forage arrêté au niveau du stockage. Ceci met en évidence une réduction du « rayon d'influence radiologique » associée directement à celle du « rayon d'influence hydraulique » ; par rapport au scénario forage arrêté au niveau du stockage (cf. Chapitre 10.2.3 du présent volume), il en résulte une réduction du transfert par convection en direction du forage et une augmentation des échanges par diffusion avec la couche du Callovo-Oxfordien ;

- pour l'ensemble des radionucléides traités, les cinétiques des historiques de débit molaire en sortie du forage au niveau du mur du Callovo-Oxfordien sont similaires à celles observées au niveau du toit du Callovo-Oxfordien pour le scénario de forage d'exploitation géothermique arrêté au niveau du stockage (cf. Chapitre 10.2.3 du présent volume) ;
- pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue, la fraction de l'inventaire du quartier de stockage HA sortant du forage sur 1 million d'années est d'environ 0,3 % pour le sélénium 79 et le chlore 36 et d'environ 0,8 % pour l'iode 129. Le nombre de moles correspondant sortant du forage sur un million d'années équivaut, considérant qu'environ 6 % de l'inventaire total initial du quartier de stockage HA entre dans la galerie d'accès sur un million d'années en SEN (cf. Tableau 6-11 du chapitre 6.3.1.3.1 du présent volume), à la « sollicitation radiologique » d'environ 100 alvéoles pour l'iode 129, 40 alvéoles pour le chlore 36 et 7 alvéoles pour le sélénium 79 (atténués sur le long terme par la décroissance radioactive, notamment pour les deux derniers radionucléides) ;
- pour les autres radionucléides traités, en particulier les radionucléides peu à très peu mobiles et/ou peu à très peu solubles, la rétention par sorption et/ou par précipitation chimique en champ proche des alvéoles est suffisante pour atténuer significativement les transferts vers le forage en favorisant les transferts par diffusion vers la couche du Callovo-Oxfordien *via* les surfaces d'échanges offertes par les alvéoles et les galeries d'accès (effet de « pompe à radionucléide » de la couche du Callovo-Oxfordien par maintien de gradients de concentration élevés entre les alvéoles et la couche du Callovo-Oxfordien).

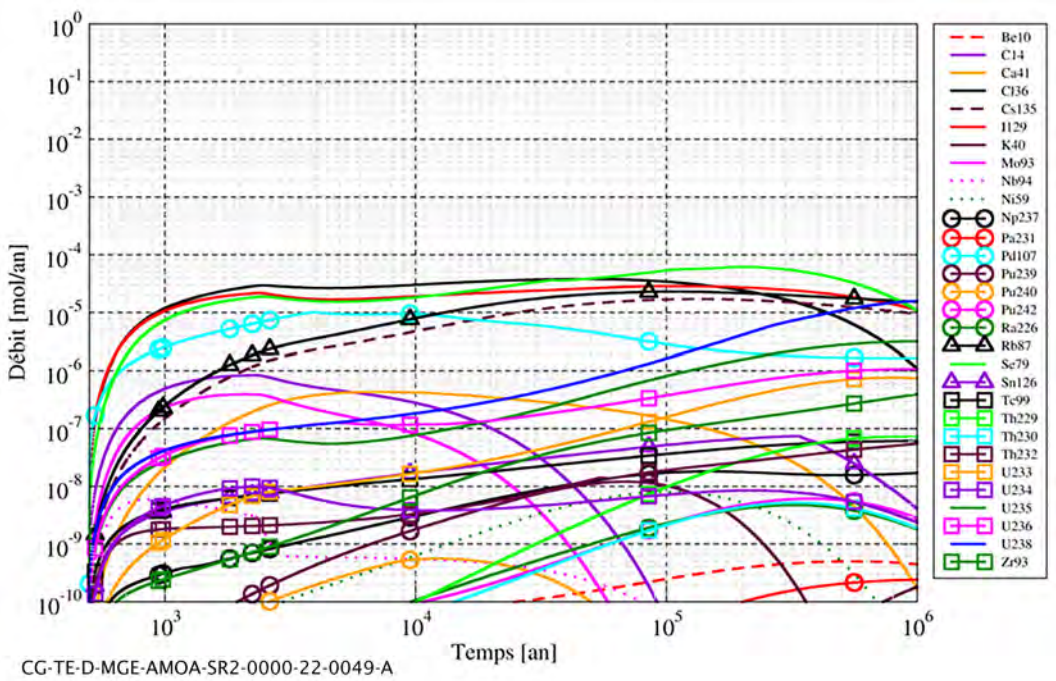


Figure 10-27 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage HA : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du mur du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal excède 10^{-10} mol.an^{-1}*

10.3.3.2.2 Le forage intrusif dans le quartier de stockage MA-VL

La figure 10-28 et la figure 10-29 présentent les historiques des débits molaires en sortie de forage au niveau du mur du Callovo-Oxfordien, respectivement pour les radionucléides dont le niveau du maximum de débit molaire est supérieur à 10^{-5} mol.an^{-1} sur le million d'années (23 radionucléides), et pour ceux dont le niveau du maximum de débit molaire est compris entre 10^{-10} mol.an^{-1} et 10^{-5} mol.an^{-1} sur le million d'années (23 radionucléides).

Les résultats montrent que :

- les débits molaires instantanés maximaux, supérieurs à 10^{-3} mol.an^{-1}, sont obtenus pour les radionucléides mobiles à vie moyenne ou longue (carbone 14 (organique), iode 129, chlore 36, sélénium 79) et pour des radionucléides à vie longue caractérisés par (i) une rétention par sorption faible ou nulle dans le béton des alvéoles (technétium 99, palladium 107) ou (ii) un inventaire radiologique initial MA-VL très important (uranium 238 et uranium 235). Pour ces radionucléides, les valeurs maximales de débit molaire respectives sont de 0,12 mol.an^{-1} pour le carbone 14 (organique), $2{,}0 \times 10^{-2}$ mol.an^{-1} pour le palladium 107, $7{,}7 \times 10^{-3}$ mol.an^{-1} pour le chlore 36, $3{,}5 \times 10^{-3}$ mol.an^{-1} pour l'iode 129, $3{,}1 \times 10^{-3}$ mol.an^{-1} pour l'uranium 238, $2{,}4 \times 10^{-3}$ mol.an^{-1} pour le technétium 99, $1{,}8 \times 10^{-3}$ mol.an^{-1} pour l'uranium 235 et $1{,}5 \times 10^{-3}$ mol.an^{-1} pour le sélénium 79 ;
- les quantités molaires sortant du forage au niveau du mur de la couche du Callovo-Oxfordien sur 1 million d'années représentent de l'ordre de 4 % à 5 % de l'inventaire radiologique total initial du quartier de stockage MA-VL en radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36, sélénium 79). Pour le carbone 14, la quantité molaire sortant du forage représente moins de 2 % de l'inventaire radiologique total initial MA-VL en carbone 14.

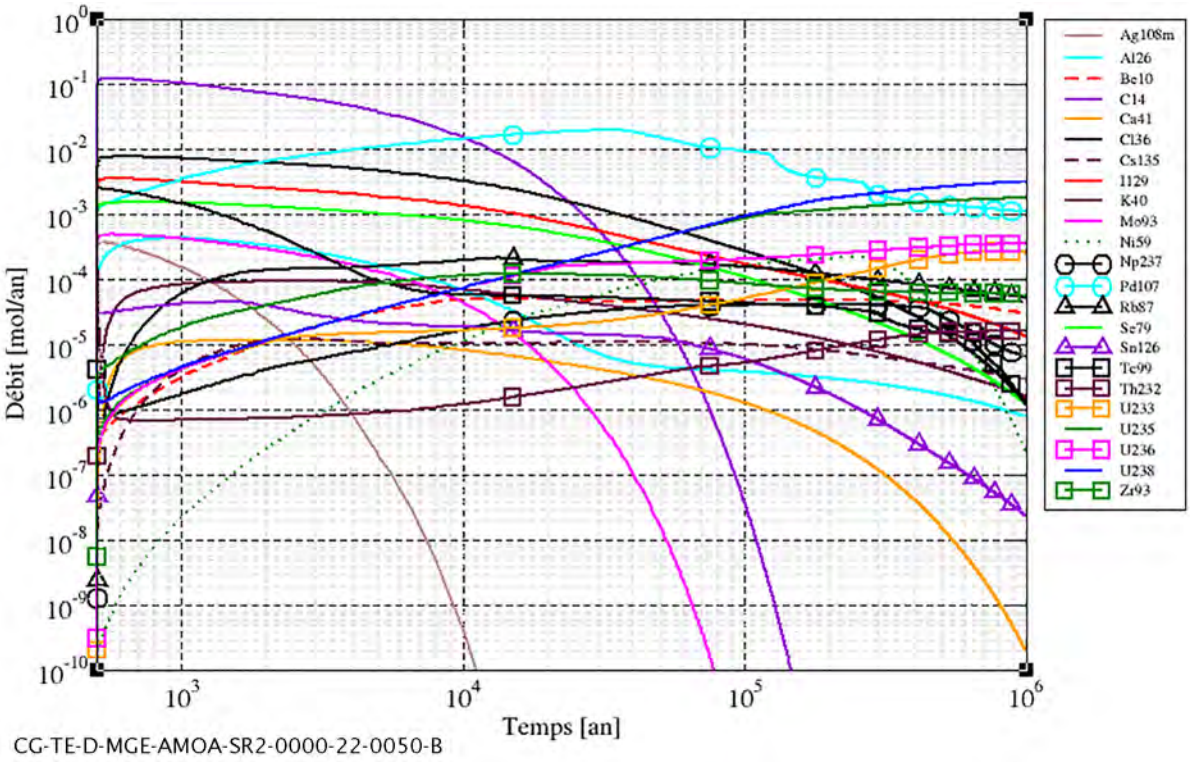


Figure 10-28 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du mur du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal excède 10^{-5} mol.an^{-1}*

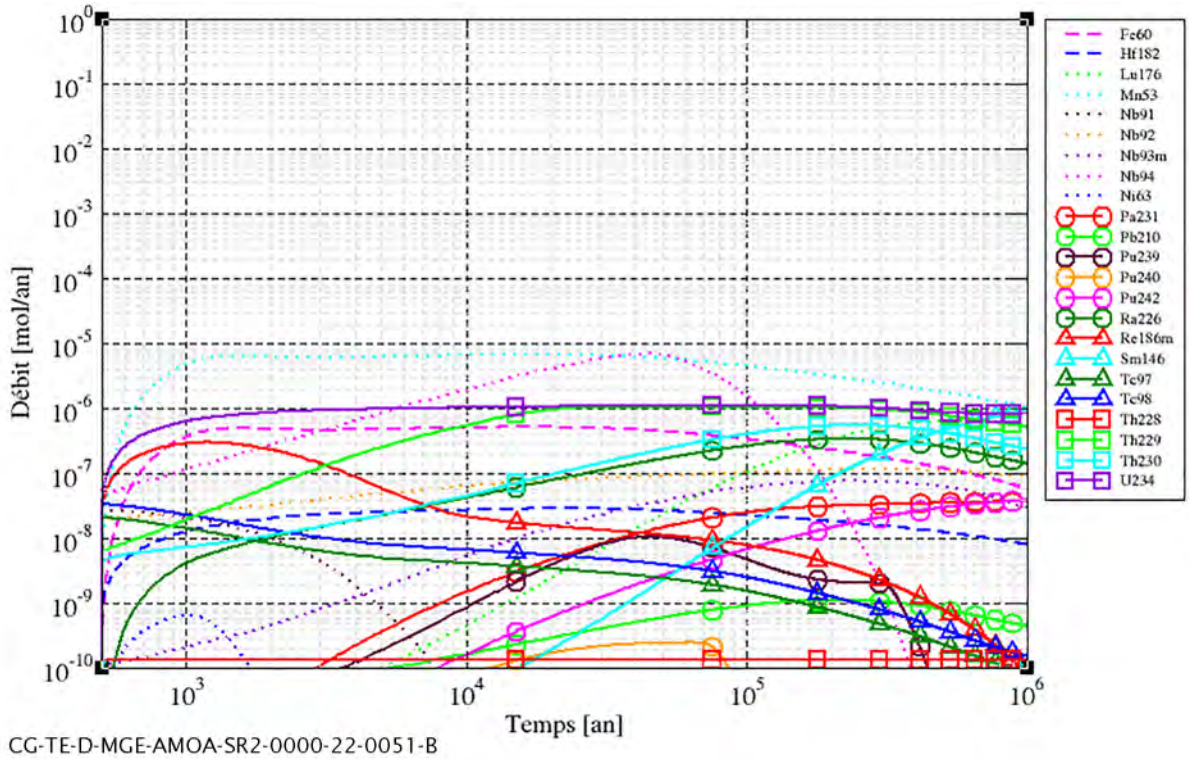


Figure 10-29 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du mur du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal est compris entre 10^{-10} mol.an^{-1} et 10^{-5} mol.an^{-1}*

10.3.3.3 Les incidences radiologiques à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »

10.3.3.3.1 Le forage intrusif dans le quartier de stockage HA

a) La biosphère tempérée

Les graphes de doses annuelles présentés ci-après sont associés au groupe de référence hypothétique « multi-activités » (cf. Chapitre 4 du présent volume). Par souci de lisibilité des graphes, seuls les radionucléides dont la dose maximale excède la valeur de 10^{-10} Sv.an^{-1} sont représentés.

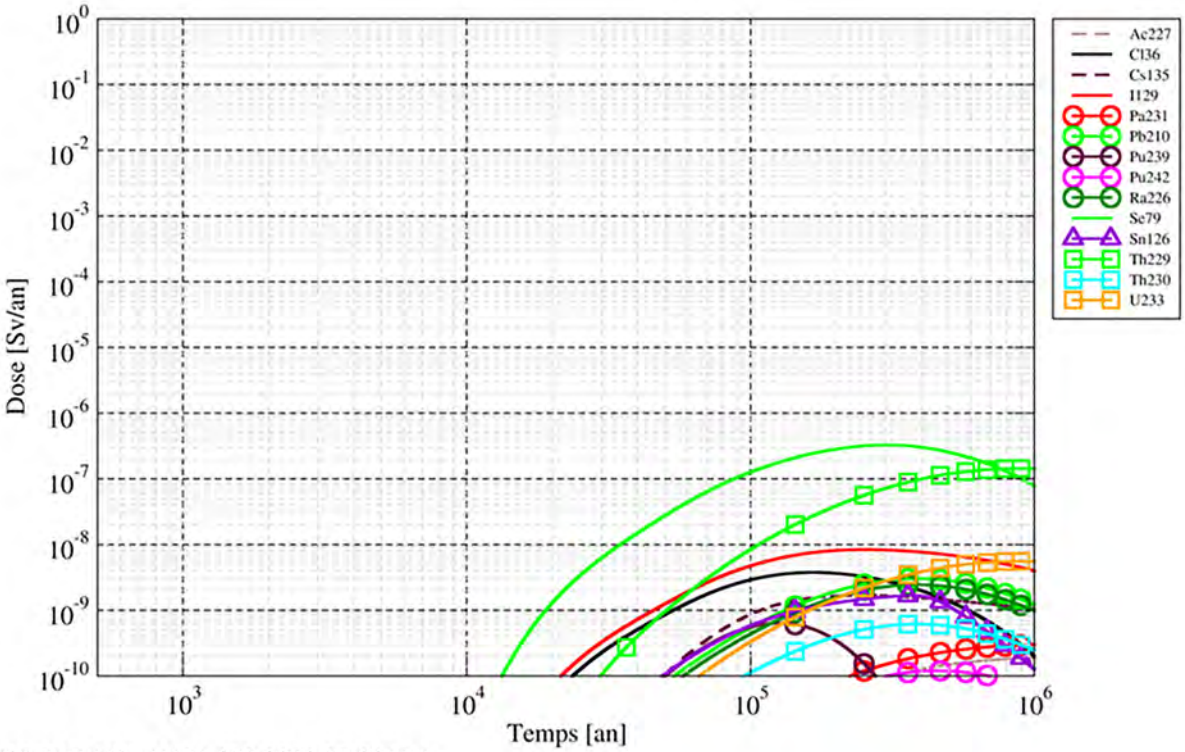
Pour un forage intrusif dans le quartier de stockage HA, positionné au milieu d'une galerie d'accès aux alvéoles contenant des colis de déchets COG-800 (HA1), les figure 10-30, figure 10-31 et figure 10-32 montrent les évolutions des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, pour le groupe de référence « multi-activités », respectivement pour la classe d'âge adulte et la classe d'âge enfant (10 ans, 1 an), sur la base d'un débit de dilution à l'exutoire de 100 L.mn^{-1}.

Le tableau 10-5 présente les valeurs maximales de dose et les occurrences de ces doses maximales pour une quinzaine de radionucléides (triés par ordre décroissant de la dose maximale pour chaque classe d'âge), pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an).

Les doses maximales obtenues sont de l'ordre de 1 µSv.an^{-1} pour le sélénium 79, 0,1 µSv.an^{-1} pour le thorium 229, et 0,01 µSv an^{-1} pour l'iode 129, le chlore 36, l'uranium 233 et le plomb 210.

La dose maximale obtenue est de l'ordre de 1,5 µSv.an^{-1} pour le sélénium 79 et la classe d'âge « enfant de 1 an ».

Les dates d'occurrence associées à ces doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » sont comprises entre 170 000 ans et 300 000 ans pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) et sont de plusieurs centaines de milliers d'années pour les radionucléides des chaînes de filiation (thorium 229, uranium 233, plomb 210).



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0052-A

Figure 10-30 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte*

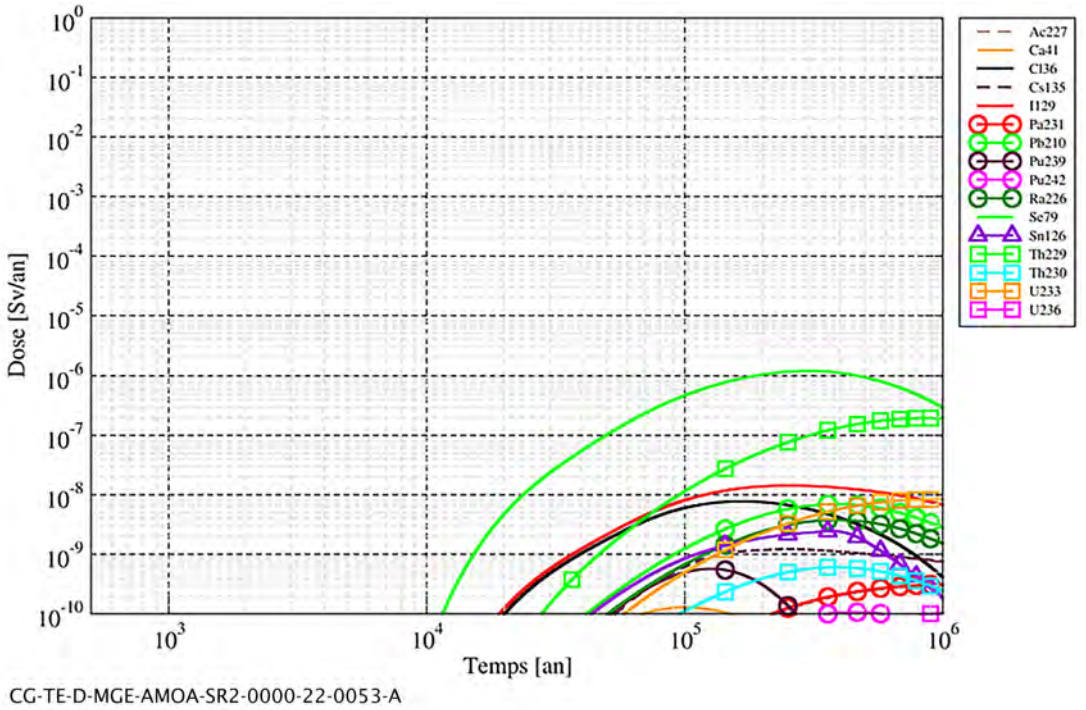


Figure 10-31 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans*

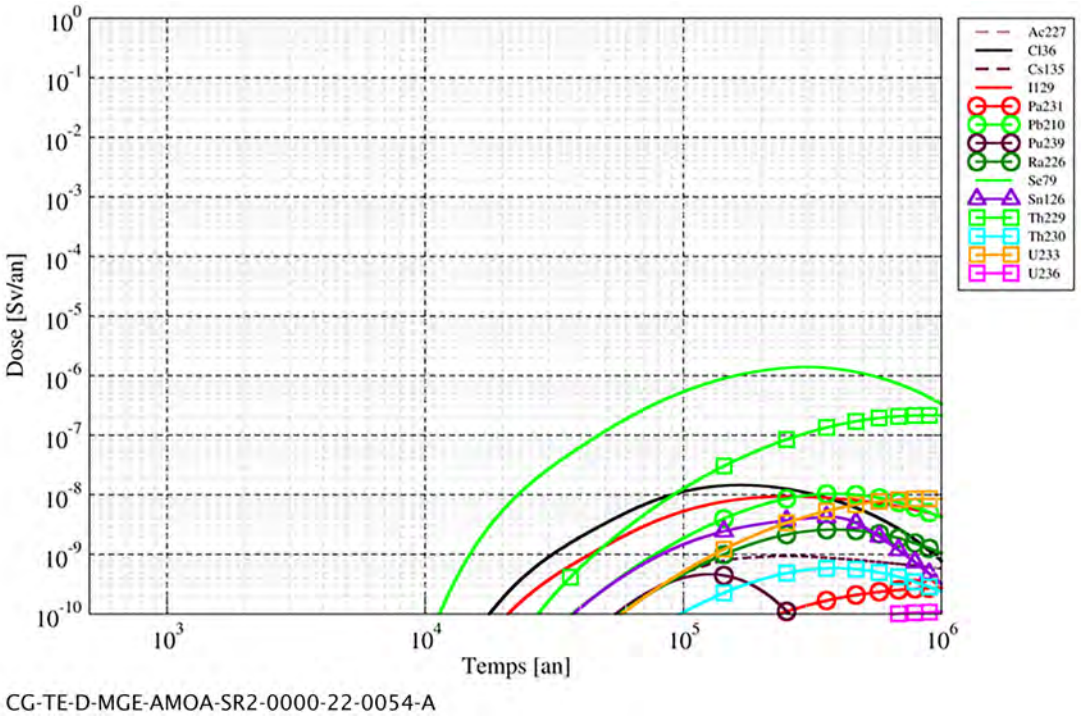


Figure 10-32 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an*

Tableau 10-5 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage HA : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an*

Forage exploratoire (quartier de stockage HA) - Exutoire « Pompage au Dogger » (100 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère tempérée								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{79}Se	$3,3 \times 10^{-4}$	300	^{79}Se	$1,2 \times 10^{-3}$	300	^{79}Se	$1,4 \times 10^{-3}$	300
^{229}Th	$1,4 \times 10^{-4}$	890	^{229}Th	$2,0 \times 10^{-4}$	890	^{229}Th	$2,2 \times 10^{-4}$	890
^{129}I	$8,4 \times 10^{-6}$	250	^{129}I	$1,4 \times 10^{-5}$	250	^{36}Cl	$1,5 \times 10^{-5}$	170
^{233}U	$5,6 \times 10^{-6}$	890	^{233}U	$8,4 \times 10^{-6}$	890	^{210}Pb	$1,0 \times 10^{-5}$	390
^{36}Cl	$3,8 \times 10^{-6}$	170	^{36}Cl	$7,8 \times 10^{-6}$	170	^{129}I	$9,4 \times 10^{-6}$	250
^{210}Pb	$3,0 \times 10^{-6}$	390	^{210}Pb	$7,0 \times 10^{-6}$	390	^{233}U	$8,6 \times 10^{-6}$	890
^{226}Ra	$2,5 \times 10^{-6}$	390	^{226}Ra	$3,8 \times 10^{-6}$	390	^{126}Sn	$4,2 \times 10^{-6}$	370
^{135}Cs	$1,7 \times 10^{-6}$	250	^{126}Sn	$2,5 \times 10^{-6}$	370	^{226}Ra	$2,6 \times 10^{-6}$	390
^{126}Sn	$1,7 \times 10^{-6}$	370	^{135}Cs	$1,2 \times 10^{-6}$	250	^{135}Cs	$9,4 \times 10^{-7}$	250

Forage exploratoire (quartier de stockage HA) - Exutoire « Pompage au Dogger » (100 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère tempérée								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{239}Pu	$6,4 \times 10^{-7}$	130	^{230}Th	$6,1 \times 10^{-7}$	390	^{230}Th	$5,9 \times 10^{-7}$	390
^{230}Th	$6,2 \times 10^{-7}$	390	^{239}Pu	$5,7 \times 10^{-7}$	130	^{239}Pu	$4,6 \times 10^{-7}$	130
^{231}Pa	$3,0 \times 10^{-7}$	> 1 000	^{231}Pa	$3,2 \times 10^{-7}$	> 1 000	^{231}Pa	$2,8 \times 10^{-7}$	> 1 000
^{227}Ac	$1,9 \times 10^{-7}$	> 1 000	^{227}Ac	$3,0 \times 10^{-7}$	> 1 000	^{227}Ac	$2,7 \times 10^{-7}$	> 1 000
^{242}Pu	$1,2 \times 10^{-7}$	460	^{41}Ca	$1,3 \times 10^{-7}$	100	^{236}U	$1,1 \times 10^{-7}$	> 1 000
^{236}U	$7,0 \times 10^{-8}$	> 1 000	^{242}Pu	$1,1 \times 10^{-7}$	460	^{242}Pu	$8,7 \times 10^{-8}$	460

b) La biosphère chaude

Les graphes de doses annuelles présentés ci-après sont associés au groupe de référence hypothétique « multi-activités ». Par souci de lisibilité des graphes, seuls les radionucléides dont la dose maximale excède la valeur de 10^{-10} Sv.an^{-1} sont représentés.

Pour un forage intrusif dans le quartier de stockage HA, positionné au milieu d'une galerie d'accès aux alvéoles contenant des colis de déchets COG-800 (HA1), les figure 10-33, figure 10-34 et figure 10-35 montrent les évolutions des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, pour le groupe de référence « multi-activités », respectivement pour la classe d'âge adulte et la classe d'âge enfant (10 ans, 1 an), sur la base d'un débit de dilution à l'exutoire de 100 L.mn^{-1}.

Le tableau 10-6 présente les valeurs maximales de dose et les occurrences de ces doses maximales pour une quinzaine de radionucléides (triés par ordre décroissant de la dose maximale pour chaque classe d'âge), pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an).

Les doses maximales obtenues pour la biosphère chaude sont de l'ordre de 10 % à 20 % supérieures à celles de la biosphère tempérée pour la plupart des radionucléides. Elles sont comprises entre 0,01 µSv.an^{-1} et 2 µSv an^{-1} pour 6 radionucléides, à savoir le sélénium 79, le thorium 229, l'iode 129, le chlore 36, l'uranium 233 et le plomb 210.

La dose maximale obtenue est de l'ordre de 2 µSv an^{-1} pour le sélénium 79 et la classe d'âge « enfant de 1 an ».

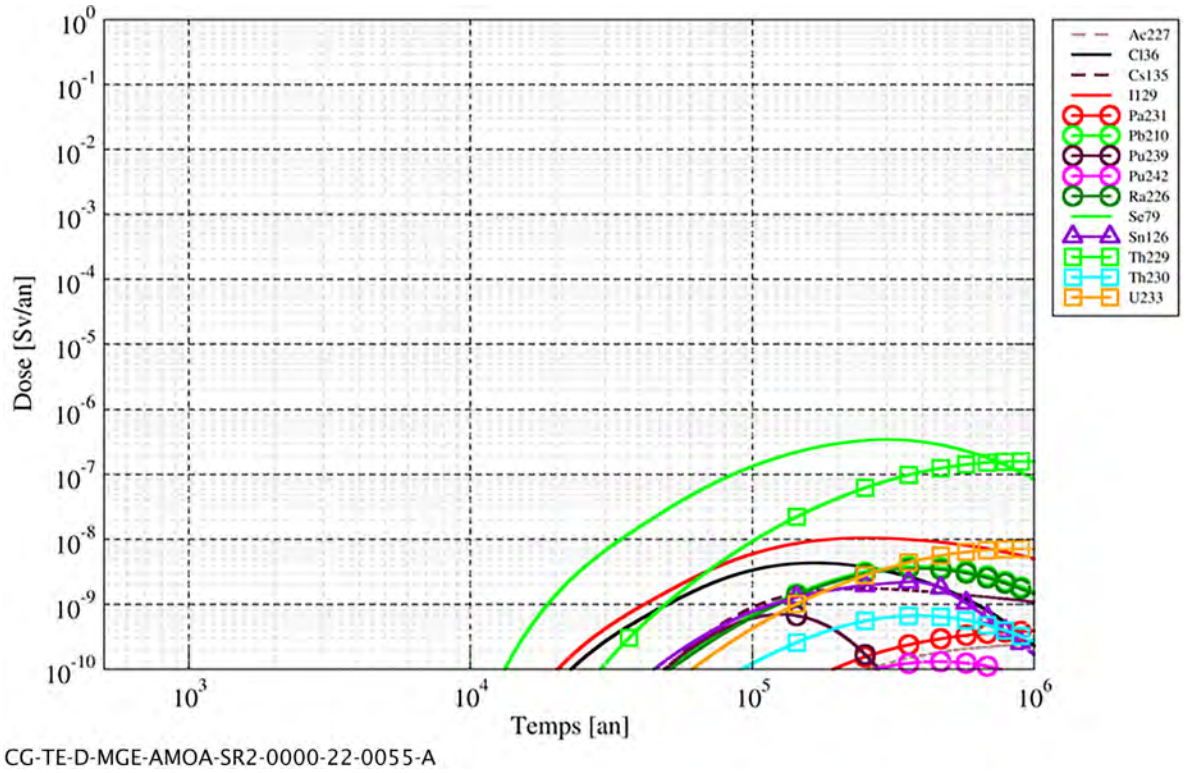


Figure 10-33 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte*

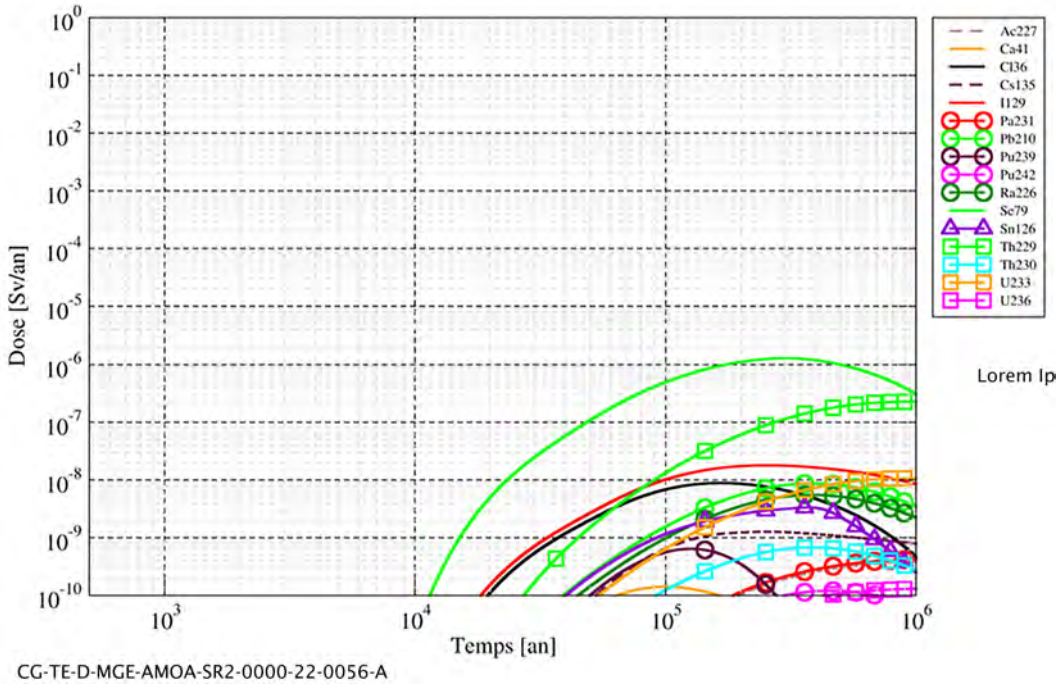


Figure 10-34 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans*

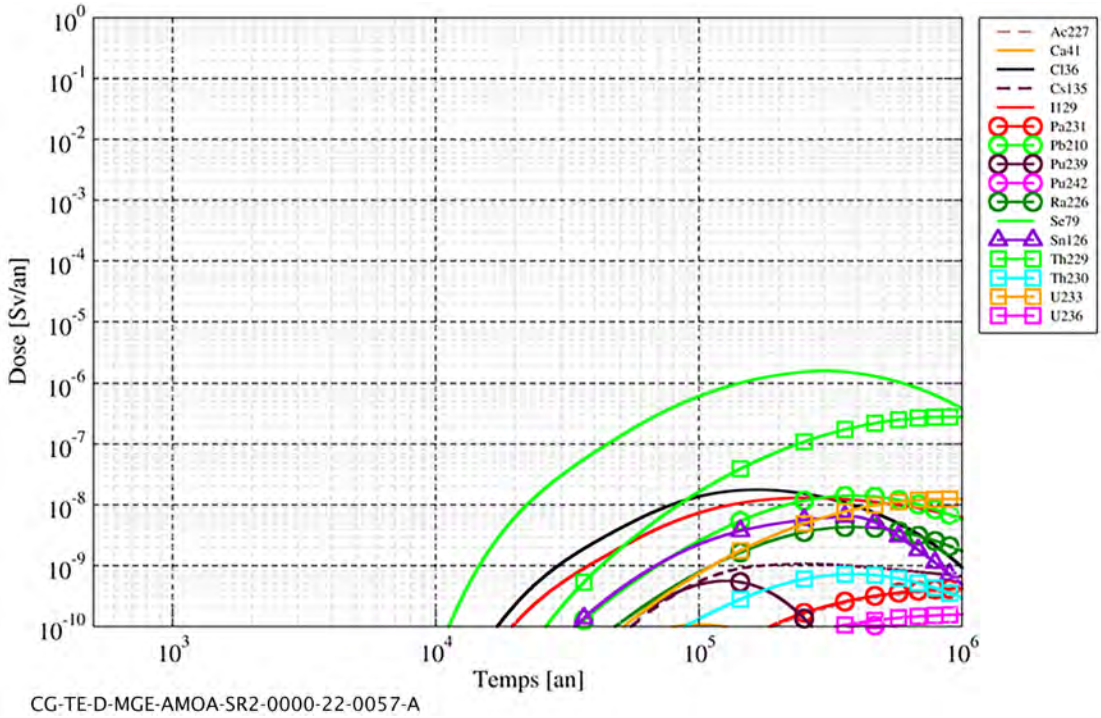


Figure 10-35 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an*

Tableau 10-6 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage HA : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an*

Forage exploratoire (quartier de stockage HA) - Exutoire « Pompage au Dogger » (100 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère chaude								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{79}Se	$3,5 \times 10^{-4}$	300	^{79}Se	$1,3 \times 10^{-3}$	300	^{79}Se	$1,6 \times 10^{-3}$	300
^{229}Th	$1,6 \times 10^{-4}$	890	^{229}Th	$2,3 \times 10^{-4}$	890	^{229}Th	$2,8 \times 10^{-4}$	890
^{129}I	$1,1 \times 10^{-5}$	250	^{129}I	$1,8 \times 10^{-5}$	250	^{36}Cl	$1,8 \times 10^{-5}$	170
^{233}U	$7,1 \times 10^{-6}$	890	^{233}U	$1,1 \times 10^{-5}$	890	^{210}Pb	$1,4 \times 10^{-5}$	390
^{36}Cl	$4,4 \times 10^{-6}$	170	^{36}Cl	$8,9 \times 10^{-6}$	170	^{129}I	$1,3 \times 10^{-5}$	250
^{210}Pb	$3,8 \times 10^{-6}$	390	^{210}Pb	$8,7 \times 10^{-6}$	390	^{233}U	$1,2 \times 10^{-5}$	890
^{226}Ra	$3,6 \times 10^{-6}$	390	^{226}Ra	$5,5 \times 10^{-6}$	390	^{126}Sn	$6,5 \times 10^{-6}$	370
^{126}Sn	$2,2 \times 10^{-6}$	370	^{126}Sn	$3,4 \times 10^{-6}$	370	^{226}Ra	$4,3 \times 10^{-6}$	390
^{135}Cs	$1,8 \times 10^{-6}$	250	^{135}Cs	$1,3 \times 10^{-6}$	250	^{135}Cs	$1,1 \times 10^{-6}$	250

Forage exploratoire (quartier de stockage HA) - Exutoire « Pompage au Dogger » (100 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère chaude								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{239}Pu	$7,0 \times 10^{-7}$	130	^{230}Th	$6,8 \times 10^{-7}$	390	^{230}Th	$7,3 \times 10^{-7}$	390
^{230}Th	$6,7 \times 10^{-7}$	390	^{239}Pu	$6,4 \times 10^{-7}$	130	^{239}Pu	$5,6 \times 10^{-7}$	130
^{231}Pa	$3,9 \times 10^{-7}$	> 1 000	^{231}Pa	$4,3 \times 10^{-7}$	> 1 000	^{231}Pa	$4,2 \times 10^{-7}$	> 1 000
^{227}Ac	$2,4 \times 10^{-7}$	> 1 000	^{227}Ac	$3,9 \times 10^{-7}$	> 1 000	^{227}Ac	$3,9 \times 10^{-7}$	> 1 000
^{242}Pu	$1,3 \times 10^{-7}$	460	^{41}Ca	$1,4 \times 10^{-7}$	100	^{236}U	$1,6 \times 10^{-7}$	> 1 000
^{236}U	$8,9 \times 10^{-8}$	> 1 000	^{236}U	$1,3 \times 10^{-7}$	> 1 000	^{41}Ca	$1,1 \times 10^{-7}$	100

10.3.3.3.2 Le forage intrusif dans le quartier de stockage MA-VL

a) La biosphère tempérée

Les graphes de doses annuelles présentés ci-après sont associés au groupe de référence hypothétique « multi-activités » (cf. Chapitre 4 du présent volume). Par souci de lisibilité des graphes, seuls les radionucléides dont la dose maximale excède la valeur de 10^{-10} Sv.an^{-1} sont représentés.

Pour un forage intrusif dans l'alvéole le plus chargé du quartier de stockage MA-VL, les figure 10-36, figure 10-37 et figure 10-38 montrent les évolutions des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, pour le groupe de référence « multi-activités », respectivement pour la classe d'âge adulte et la classe d'âge enfant (10 ans, 1 an), sur la base d'un débit de dilution à l'exutoire de 100 L.mn^{-1}.

Le tableau 10-7 présente les valeurs maximales de dose et les occurrences de ces doses maximales pour une quinzaine de radionucléides (triés par ordre décroissant de la dose maximale pour chaque classe d'âge), pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an).

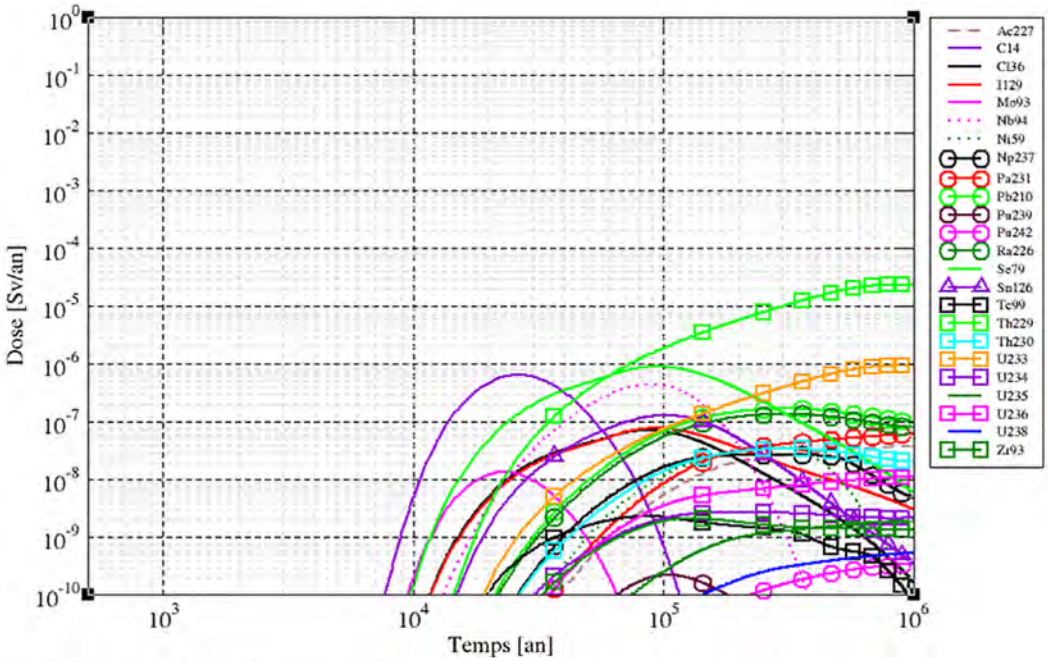
Les doses maximales obtenues sont de l'ordre de ou inférieures à :

- 35 µSv.an^{-1} pour le thorium 229 ;
- 4 µSv.an^{-1} pour le sélénium 79 ;
- 1,5 µSv.an^{-1} pour l'uranium 233 ;
- 1 µSv.an^{-1} pour le carbone 14 (organique) ;
- 0,6 µSv.an^{-1} pour le plomb 210 ;
- 0,4 µSv.an^{-1} pour le niobium 94 ;
- 0,2 µSv.an^{-1} pour le radium 226.

La dose maximale obtenue est d'environ 35 µSv.an^{-1} pour le thorium 229 et la classe d'âge « enfant de 1 an ».

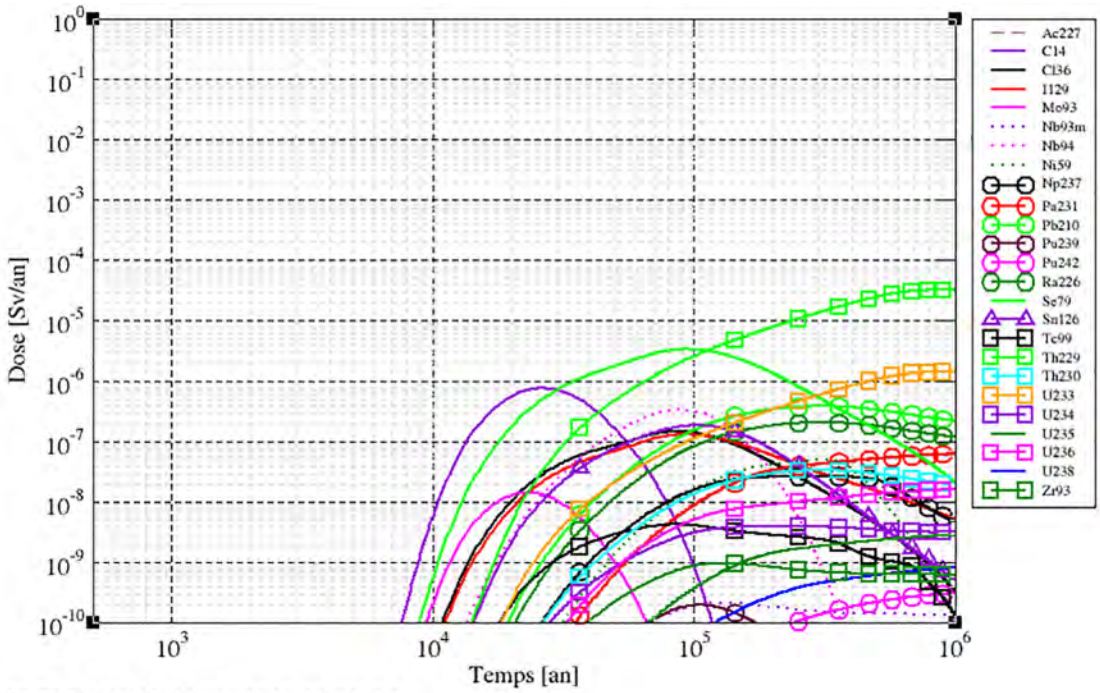
Les dates d'occurrence de ces doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » sont :

- d'environ 25 000 ans pour le carbone 14 (organique) de période moyenne ;
- comprises entre 85 000 ans et 100 000 ans pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue (chlore 36, sélénium 79, iode 129), ainsi que pour le niobium 94 et l'étain 126 ;
- d'environ 300 000 ans pour le nickel 59 et le neptunium 237 ;
- de plusieurs centaines de milliers d'années à un million d'années pour le thorium 230 et les radionucléides situés en fin de chaînes de filiation (uranium 233 et thorium 229, radium 226 et plomb 210, protactinium 231 et actinium 227), contrôlés par la filiation radioactive et la limite de solubilité de leurs antécédents dans la couche du Callovo-Oxfordien et le béton des alvéoles MA-VL.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0058-B

Figure 10-36 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte*



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0059-B

Figure 10-37 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans*

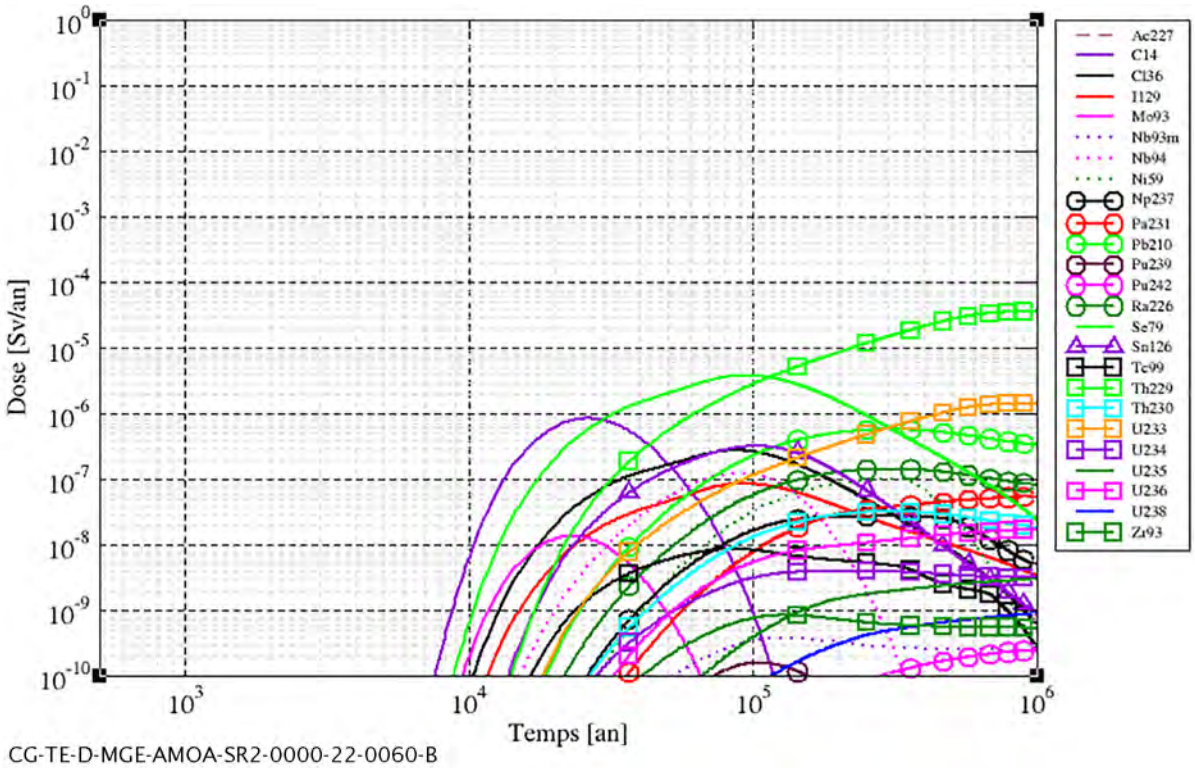


Figure 10-38 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an*

Tableau 10-7 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage MA-VL : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an*

Forage exploratoire (quartier de stockage MA-VL) - Exutoire « Pompage au Dogger » (100 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère tempérée								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{229}Th	$2,4 \times 10^{-2}$	880	^{229}Th	$3,2 \times 10^{-2}$	880	^{229}Th	$3,6 \times 10^{-2}$	880
^{233}U	$9,3 \times 10^{-4}$	880	^{79}Se	$3,3 \times 10^{-3}$	90	^{79}Se	$3,8 \times 10^{-3}$	90
^{79}Se	$9,0 \times 10^{-4}$	90	^{233}U	$1,4 \times 10^{-3}$	880	^{233}U	$1,5 \times 10^{-3}$	880
^{14}C	$6,5 \times 10^{-4}$	26	^{14}C	$7,7 \times 10^{-4}$	26	^{14}C	$8,5 \times 10^{-4}$	26
^{94}Nb	$4,4 \times 10^{-4}$	90	^{210}Pb	$3,9 \times 10^{-4}$	300	^{210}Pb	$5,8 \times 10^{-4}$	300
^{210}Pb	$1,7 \times 10^{-4}$	300	^{94}Nb	$3,4 \times 10^{-4}$	90	^{126}Sn	$3,2 \times 10^{-4}$	100
^{226}Ra	$1,4 \times 10^{-4}$	300	^{226}Ra	$2,1 \times 10^{-4}$	300	^{36}Cl	$2,8 \times 10^{-4}$	85
^{126}Sn	$1,3 \times 10^{-4}$	100	^{126}Sn	$1,9 \times 10^{-4}$	100	^{226}Ra	$1,45 \times 10^{-4}$	300
^{129}I	$7,8 \times 10^{-5}$	90	^{36}Cl	$1,5 \times 10^{-4}$	85	^{94}Nb	$1,3 \times 10^{-4}$	90

Forage exploratoire (quartier de stockage MA-VL) - Exutoire « Pompage au Dogger » (100 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère tempérée								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{36}Cl	$7,2 \times 10^{-5}$	85	^{129}I	$1,3 \times 10^{-4}$	90	^{59}Ni	$1,0 \times 10^{-4}$	310
^{231}Pa	$6,1 \times 10^{-5}$	1 000	^{231}Pa	$6,4 \times 10^{-5}$	1 000	^{129}I	$8,7 \times 10^{-5}$	90
^{227}Ac	$3,8 \times 10^{-5}$	1 000	^{227}Ac	$6,1 \times 10^{-5}$	1 000	^{231}Pa	$5,6 \times 10^{-5}$	1 000
^{59}Ni	$3,7 \times 10^{-5}$	310	^{59}Ni	$5,1 \times 10^{-5}$	310	^{227}Ac	$5,5 \times 10^{-5}$	1 000
^{230}Th	$3,4 \times 10^{-5}$	300	^{230}Th	$3,4 \times 10^{-5}$	300	^{230}Th	$3,3 \times 10^{-5}$	300
^{237}Np	$2,7 \times 10^{-5}$	330	^{237}Np	$2,7 \times 10^{-5}$	330	^{237}Np	$2,8 \times 10^{-5}$	330

b) La biosphère chaude

Les graphes de doses annuelles présentés ci-après sont associés au groupe de référence hypothétique « multi-activités ». Par souci de lisibilité des graphes, seuls les radionucléides dont la dose maximale excède la valeur de 10^{-10} Sv.an^{-1} sont représentés.

Pour un forage intrusif dans l'alvéole le plus chargé du quartier de stockage MA-VL, les figure 10-39, figure 10-40 et figure 10-41 montrent les évolutions des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, pour le groupe de référence « multi-activités », respectivement pour la classe d'âge adulte et la classe d'âge enfant (10 ans, 1 an), sur la base d'un débit de dilution à l'exutoire de 100 L.mn^{-1}.

Le tableau 10-8 présente les valeurs maximales de dose et les occurrences de ces doses maximales pour une quinzaine de radionucléides (triés par ordre décroissant de la dose maximale pour chaque classe d'âge), pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les trois classes d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an).

Les doses maximales obtenues sont de l'ordre de ou inférieures à :

- 45 µSv.an^{-1} pour le thorium 229 ;
- 4 µSv.an^{-1} pour le sélénium 79 ;
- 2 µSv.an^{-1} pour l'uranium 233 ;
- 1,2 µSv.an^{-1} pour le carbone 14 (organique) ;
- 0,8 µSv.an^{-1} pour le plomb 210 ;
- 0,4 µSv.an^{-1} pour le niobium 94 ;
- 0,3 µSv.an^{-1} pour le radium 226.

La dose maximale obtenue est d'environ 45 µSv.an^{-1} pour le thorium 229 et la classe d'âge « enfant de 1 an ».

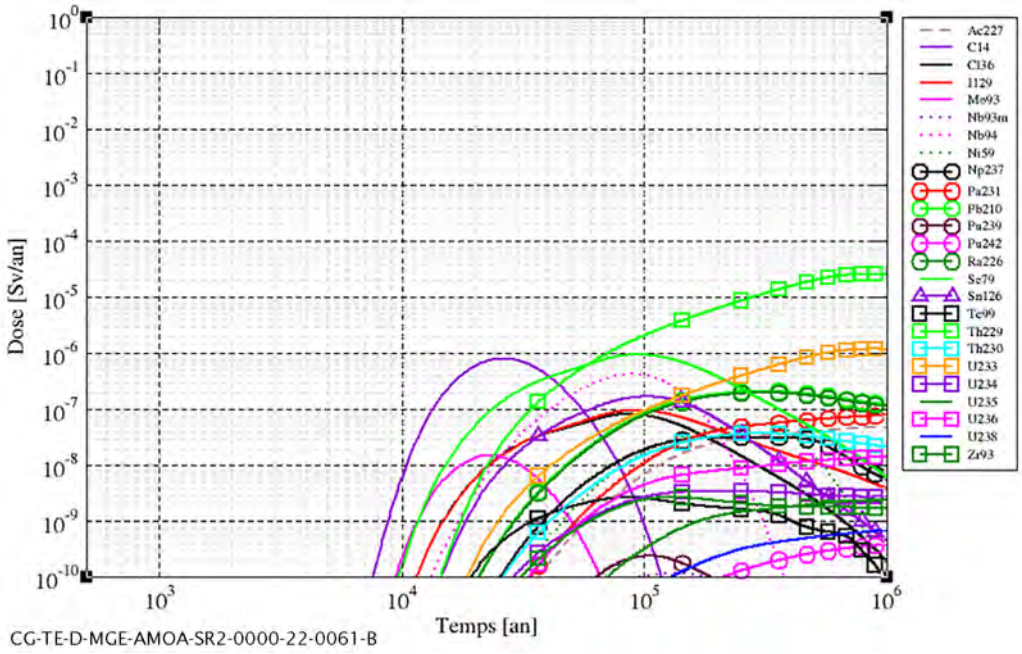
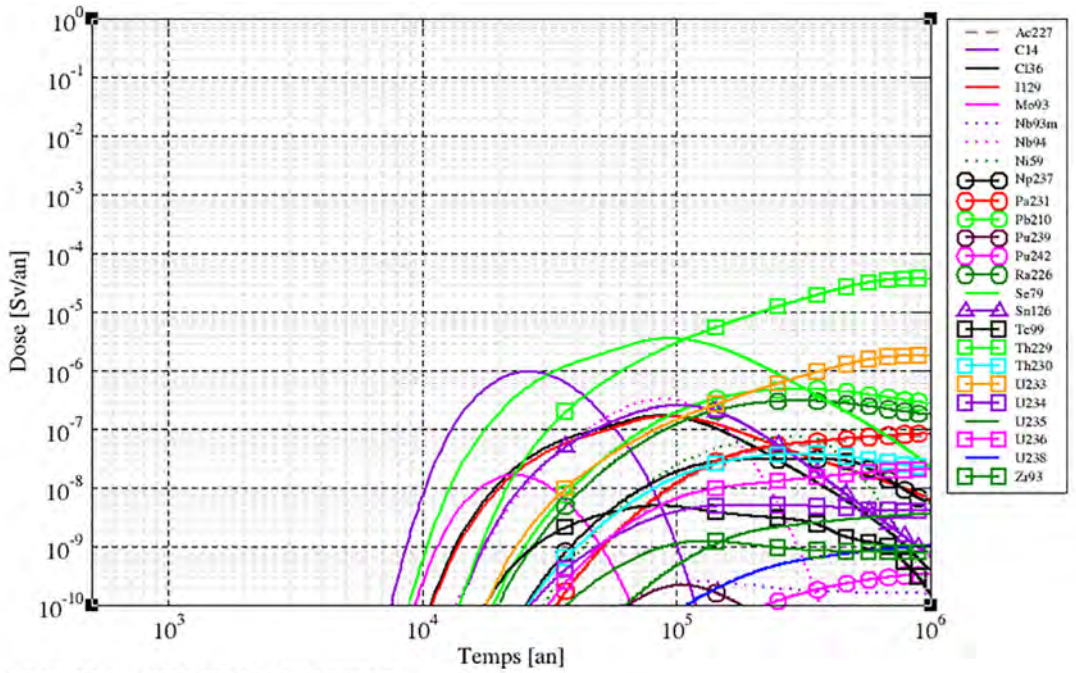
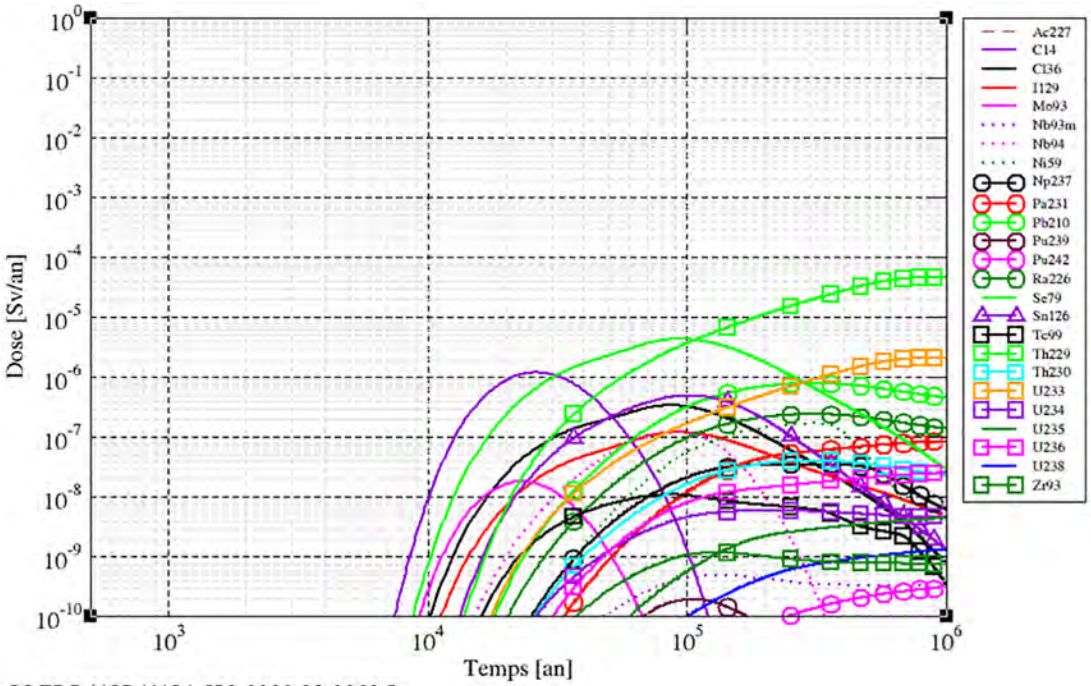


Figure 10-39 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte*



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0062-B

Figure 10-40 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans*



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0063-B

Figure 10-41 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an*

Tableau 10-8 *Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage MA-VL : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an*

Forage exploratoire (quartier de stockage MA-VL) - Exutoire « Pompage au Dogger » (100 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère chaude								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{229}Th	$2,6 \times 10^{-2}$	880	^{229}Th	$3,7 \times 10^{-2}$	880	^{229}Th	$4,6 \times 10^{-2}$	880
^{233}U	$1,2 \times 10^{-3}$	880	^{79}Se	$3,5 \times 10^{-3}$	90	^{79}Se	$4,3 \times 10^{-3}$	90
^{79}Se	$9,5 \times 10^{-4}$	90	^{233}U	$1,8 \times 10^{-3}$	880	^{233}U	$2,1 \times 10^{-3}$	880
^{14}C	$8,0 \times 10^{-4}$	26	^{14}C	$9,6 \times 10^{-4}$	26	^{14}C	$1,2 \times 10^{-3}$	26
^{94}Nb	$4,3 \times 10^{-4}$	90	^{210}Pb	$4,8 \times 10^{-4}$	300	^{210}Pb	$7,9 \times 10^{-4}$	300
^{210}Pb	$2,1 \times 10^{-4}$	300	^{94}Nb	$3,2 \times 10^{-4}$	90	^{126}Sn	$4,9 \times 10^{-4}$	100
^{226}Ra	$2,0 \times 10^{-4}$	300	^{226}Ra	$3,1 \times 10^{-4}$	300	^{36}Cl	$3,4 \times 10^{-4}$	85
^{126}Sn	$1,7 \times 10^{-4}$	100	^{126}Sn	$2,6 \times 10^{-4}$	100	^{226}Ra	$2,4 \times 10^{-4}$	300
^{129}I	$9,8 \times 10^{-5}$	90	^{36}Cl	$1,7 \times 10^{-4}$	85	^{59}Ni	$1,7 \times 10^{-4}$	310

Forage exploratoire (quartier de stockage MA-VL) - Exutoire « Pompage au Dogger » (100 L.min^{-1})								
Groupe de référence hypothétique « multi-activités »								
Biosphère chaude								
Adulte			Enfant de 10 ans			Enfant de 1 an		
Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)	Radionucléide	Dose max. à l'exutoire pompage Dogger (mSv.an^{-1})	Date de dose max. (milliers d'années)
^{36}Cl	$8,3 \times 10^{-5}$	85	^{129}I	$1,7 \times 10^{-4}$	90	^{94}Nb	$1,2 \times 10^{-4}$	90
^{231}Pa	$7,9 \times 10^{-5}$	1 000	^{231}Pa	$8,6 \times 10^{-5}$	1 000	^{129}I	$1,2 \times 10^{-4}$	90
^{59}Ni	$5,4 \times 10^{-5}$	310	^{227}Ac	$7,8 \times 10^{-5}$	1 000	^{231}Pa	$8,5 \times 10^{-5}$	1 000
^{227}Ac	$4,9 \times 10^{-5}$	1 000	^{59}Ni	$7,6 \times 10^{-5}$	310	^{227}Ac	$7,9 \times 10^{-5}$	1 000
^{230}Th	$3,7 \times 10^{-5}$	300	^{230}Th	$3,8 \times 10^{-5}$	300	^{230}Th	$4,0 \times 10^{-5}$	300
^{237}Np	$3,2 \times 10^{-5}$	330	^{237}Np	$3,2 \times 10^{-5}$	330	^{237}Np	$3,5 \times 10^{-5}$	330

10.4 Le scénario de forage exploratoire pendant le transitoire hydraulique-gaz

10.4.1 La présentation générale du scénario

Ce scénario considère un forage d'exploration, destiné à la caractérisation scientifique de la couche du Callovo-Oxfordien, qui viendrait traverser un ouvrage de stockage. Il est considéré que ce forage interviendrait pendant le transitoire hydraulique-gaz.

La réalisation de ce forage intercepte ainsi des quartiers de stockage et induit un court-circuit de la couche du Callovo-Oxfordien avec une remontée sous forme de panache de gaz pouvant contenir à la fois des radionucléides gazeux et des gouttelettes d'eau potentiellement contaminées au niveau du forage. L'objectif de ce scénario est d'évaluer l'incidence potentiellement générée par ce panache de gaz et de gouttelettes d'eau sur le foreur.

10.4.2 La description du scénario

La description du scénario comprend d'une part la description du comportement du stockage et de la voie de transfert associée, suite à un forage en phase transitoire hydraulique-gaz, et d'autre part la description du panache de gaz et des gouttelettes d'eau à la sortie du forage en surface.

10.4.2.1 Le comportement du stockage et voies de transfert associées

Deux cas sont envisagés :

- le forage est réalisé dans un alvéole de stockage MA-VL présentant par conception un vide résiduel ;
- le forage est réalisé dans une galerie d'accès aux alvéoles HA en postulant la présence d'un vide apical du fait d'un tassement du remblai.

En amont de la présentation des conséquences radiologiques, des éléments de contexte sur la propagation des gaz et le comportement hydraulique sont présentés ci-après. Du point de vue radiologique, l'essentiel de l'inventaire en carbone 14 étant localisé dans le quartier de stockage MA-VL, l'évaluation de l'impact n'est effectuée que pour un forage interceptant un alvéole MA-VL.

10.4.2.1.1 Le transfert des gaz

Pour les deux cas étudiés, on observe les mêmes évolutions temporelles de la vitesse du gaz, de la température ou de la pression au sein du forage ; la vitesse du gaz dans le forage augmente instantanément au fur et à mesure que l'onde de pression se propage, et, une fois l'onde de pression passée, la vitesse du gaz diminue de nouveau. À l'intersection entre le stockage et le forage, la vitesse atteint quelques centaines de mètres par seconde (compte tenu du faible diamètre du forage), avant de décroître rapidement.

Au sein des ouvrages souterrains, la vitesse de transfert des gaz décroit au fur et à mesure de leur évacuation et en fonction de l'éloignement au forage. Le paroxysme de cette vitesse est de l'ordre de quelques dizaines de mètres par seconde.

10.4.2.1.2 Le flux de carbone 14 gazeux en sortie de forage

Une estimation enveloppe du flux de carbone 14 gazeux est réalisée à partir de l'évolution de la vitesse de l'hydrogène en sortie de forage au niveau de l'alvéole de stockage MA-VL. En utilisant la concentration maximale de carbone 14 (dissous ou gazeux) dans l'ouvrage au moment du forage, on obtient une majoration du flux de carbone gazeux en sortie de forage. L'intégration de ce flux pendant la phase d'expulsion rapide du gaz, d'environ dix minutes, permet d'estimer à quelques moles la quantité maximale de carbone 14 gazeux expulsée par le forage.

10.4.2.1.3 Le comportement hydraulique

a) Les flux d'eau extraits des milieux poreux

La quantité d'eau porale extraite, en 10 minutes, des milieux poreux affectés par la baisse de pression de gaz, est, dans le cas d'un forage à l'air interceptant :

- une galerie d'accès d'un quartier de stockage HA (de longueur 3 000 mètres), de l'ordre de 0,3 m^3 d'eau issu des bétons et de 0,06 m^3 d'eau issu du remblai ;
- un alvéole de stockage MA-VL (de longueur 500 mètres), de l'ordre de 0,4 m^3 d'eau.

Dans les deux cas, l'eau extraite forme alors un film liquide au niveau des parois de la galerie d'accès HA ou de l'alvéole de stockage MA-VL.

b) La mobilisation de l'eau libre et porale

Les flux d'eau arrivant en surface sont très inférieurs aux flux d'eau extraits des milieux poreux dans les installations fond ; en effet, seules des gouttelettes de petite taille (< 0,05 mm) et dans un voisinage de 5 mètres autour du forage sont considérées comme susceptibles d'être aspirées par le forage et arriver en surface.

Dans le cas du forage dans l'alvéole MA-VL, les gouttelettes d'eau provenant de l'eau libre au sein des vides entre les colis sont peu susceptibles de remonter au toit de l'alvéole, et par conséquent d'être aspirées, car elles sont situées loin du forage dans une zone où les vitesses du gaz sont faibles. Pour celles à proximité du forage (partie haute des vides), seules les plus petites gouttelettes peuvent être entrainées vers l'atmosphère *via* le forage par le flux de gaz. Ce constat est identique dans le cas du forage dans la galerie d'accès HA.

L'approche retenue ici est enveloppe vis-à-vis des quantités d'eau extraites des milieux poreux, car les effets de baisse de température ne sont pas pris en compte. En effet, du fait de la détente des gaz, la température au sein des ouvrages chute à des températures négatives en moins d'une minute. En raison de leur petit diamètre, les gouttelettes atteignent presque immédiatement l'équilibre thermique avec le gaz environnant et on peut raisonnablement considérer qu'à ces niveaux de température, le film d'eau et les gouttelettes seraient gelés. Il est toutefois postulé que les gouttelettes transférées en surface restent sous forme liquide.

10.4.2.1.4 Le transport de l'eau du stockage vers l'atmosphère

Les gouttelettes arrachées au film d'eau sont de faible diamètre et se décomposent en gouttelettes de plus petite taille due à la force de trainée du gaz environnant sur la particule fluide. Comme les gouttelettes sont très petites et que la force de traînée du gaz est beaucoup plus forte que la force de gravité, toutes les gouttelettes qui sont extraites du film d'eau en paroi sont entrainées vers la surface par le gaz à des vitesses proches de celles du gaz. Cependant le phénomène d'extraction se localise au voisinage de l'intersection entre le forage et le stockage et la quantité d'eau qui est rejetée dans l'atmosphère est faible, au plus quelques grammes d'eau après dix minutes.

10.4.2.2 Les voies d'exposition du foreur et les hypothèses de calculs

En surface, un jet à grande vitesse se formerait au niveau du forage. La hauteur atteinte par ce jet serait de l'ordre de 25 m. Le foreur serait alors exposé aux radionucléides contenus dans ces poches de gaz ou au sein de ces gouttelettes d'eau.

Les activités des radionucléides contenus dans le panache de gaz et de gouttelettes d'eau sortant au niveau du forage sont de l'ordre de quelques 10^{12} Bq de carbone 14 gazeux principalement. Certains aérosols peuvent également se trouver en quantité moindre (majoritairement nickel 63 et césium 137) sans contribuer significativement à la dose, en comparaison du terme source carbone 14 gazeux.

Différentes voies d'exposition du foreur sont analysées du fait de l'immersion du foreur dans un panache de gaz et de gouttelettes d'eau.

Il s'agit :

- de l'inhalation de substances radioactives présentes dans le panache ;
- de l'exposition externe dans le panache.

Afin de déterminer la dose efficace engagée par inhalation et exposition externe dans le panache, il est considéré que le foreur se trouve dans une demi-sphère d'air contaminé de rayon 25 mètres correspondant à la hauteur de rejet estimée (cf. Figure 10-42). L'activité volumique en radionucléides est déterminée sur la base du terme source présenté ci-dessus et du volume de la demi-sphère. La durée d'exposition du foreur est prise égale à 5 minutes.

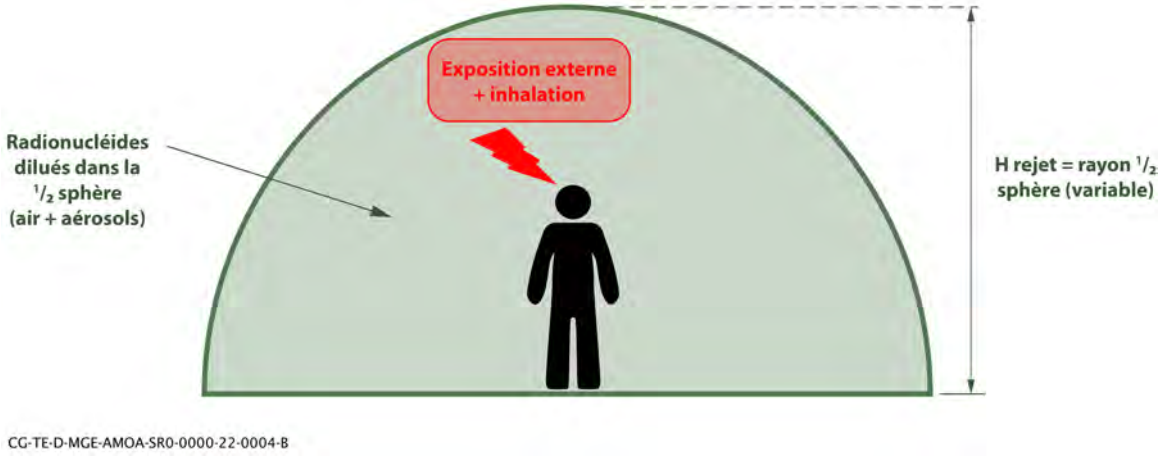


Figure 10-42 *Représentation schématique du foreur dans une atmosphère issue du dégazage de l'installation souterraine suite à un forage et contenant de la radioactivité*

Les valeurs de dose par unité d'incorporation dose retenues pour les évaluations de la dose par inhalation sont issues de la réglementation en vigueur (cf. Arrêté du 1er septembre 2003 (12)). Pour le carbone 14, il est retenu la valeur pénalisante de dose par unité d'incorporation associée à de la vapeur de carbone 14.

Les valeurs tabulées de dose efficace engagée par unité d'incorporation par exposition externe issues du Federal Guidance Report n° 12 (cf. Eckerman & Ryman, 1993 (64)) sont retenues.

10.4.3 Les résultats du scénario de forage dans un alvéole MA-VL

Ce chapitre est axé sur l'évaluation des conséquences radiologiques dans le cas d'un forage interceptant un alvéole de stockage MA-VL, dans la mesure où le quartier de stockage MA-VL contient significativement plus de carbone 14 que n'en contient le quartier de stockage HA.

Les évaluations effectuées montrent que la voie d'exposition par inhalation du carbone 14 gazeux (retenu sous forme de vapeur de carbone 14) est prépondérante par rapport à la dose par exposition externe par immersion dans le panache.

La dose efficace engagée par inhalation par le foreur est évaluée de l'ordre de quelques mSv dans l'hypothèse d'une demi-sphère de 25 mètres.

Ces niveaux de dose sont inférieurs aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

10.5 Les enseignements tirés de l'évaluation des scénarios d'intrusion humaine involontaire

10.5.1 Les enseignements tirés des évaluations du scénario forage avec prélèvement de carottes

Conformément aux recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (1), ce scénario postule la réalisation d'un forage avec prélèvement de carottes dans les colis de déchets HA et MA-VL afin d'évaluer l'exposition externe reçue par un foreur manipulant ces carottes.

Les calculs d'exposition externe ont été conduits sur la base d'une hiérarchisation des familles de colis de déchets HA et MA-VL afin de retenir celles susceptibles d'induire les expositions les plus importantes à 500 ans, date retenue pour les scénarios d'intrusion humaine involontaire.

Les résultats présentés pour les cinq premières familles de colis de déchets MA-VL conduisent à des doses comprises entre environ 2 mSv et 7 mSv pour une exposition externe de dix minutes.

Les résultats présentés pour les cinq premières familles de colis de déchets HA conduisent à des doses comprises entre environ 0,5 mSv et 11 mSv pour une exposition de dix minutes.

Les doses calculées pour le foreur manipulant les carottes sont inférieures aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes, objectif de protection retenu pour ce type de scénario.

Le radionucléide contribuant à la dose pour les carottes conduisant à l'impact le plus important pour la première famille de colis de déchets HA et pour les trois premières familles de colis de déchets MA-VL est exclusivement le niobium 94. Pour les carottes issues des autres familles de colis de déchets, les principaux contributeurs sont le thorium 229, l'américium 241, le neptunium 237 et l'américium 243.

10.5.2 Les enseignements tirés du scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage et du scénario de forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle

Pour mémoire et en cohérence avec la démarche, les scénarios de forage intrusif visent à conforter la robustesse du système de stockage.

Deux scénarios de forage intrusif sont évalués : l'un est un forage d'exploitation géothermique du Trias arrêté au niveau du stockage (abandonné à la cote du stockage), et l'autre est un forage exploratoire du Dogger abandonné à sa profondeur cible (dans le Dogger). Leurs diamètres respectifs sont de 445 mm et 216 mm.

Pour chacun de ces deux scénarios de forage intrusif, deux localisations du forage sont étudiées (cf. Chapitres 10.2.2 et 10.3.2 du présent volume) :

- le forage dans le quartier de stockage HA : celui-ci est localisé dans la galerie d'accès sud à la tranche nord-ouest du quartier de stockage HA, entre deux alvéoles de stockage de colis de la famille COG-800, où l'activité en iode 129 par unité de surface est la plus forte. La répartition de l'inventaire mobilisable par le forage est celle correspondant à l'agencement des alvéoles dans l'architecture à terminaison illustrative ;
- le forage dans le quartier de stockage MA-VL : il a été fait le choix de reconduire les hypothèses considérées pour le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2), c'est-à-dire, pour chaque radionucléide étudié, l'alvéole cible est celui qui contient l'inventaire radiologique maximal.

L'analyse évalue distinctement l'incidence associée à chaque radionucléide, en supposant que l'alvéole cible contient les familles de déchets qui ont la plus forte concentration du radionucléide étudié. En cohérence avec le « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » également (2), la répartition de l'inventaire du radionucléide étudié est supposée uniforme dans l'alvéole cible et dans chacun des alvéoles.

Les indicateurs retenus pour l'évaluation des scénarios de forage intrusif sont :

- les champs de charges hydrauliques et les débits d'eau drainés par le forage. Ces indicateurs permettent d'apprécier l'influence du forage intrusif sur les circulations hydrauliques dans le système de stockage ;
- les débits molaires instantanés de radionucléides transitant par le forage jusqu'au toit (ou au mur) de la couche du Callovo-Oxfordien. Cet indicateur permet d'apprécier l'influence du forage intrusif sur le transfert des radionucléides jusqu'au toit (ou au mur) de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- la dose annuelle aux exutoires respectifs définis pour les deux scénarios de forage intrusif :
  - ✓ exutoire « Pompage dans le Barrois » pour le forage d'exploitation géothermique du Trias arrêté au niveau du stockage ;
  - ✓ exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le forage exploratoire du Dogger abandonné à sa profondeur cible.

L'analyse des résultats des scénarios de forage intrusif (cf. Chapitres 10.2.3 et 10.3.3 du présent volume) conduit à identifier les enseignements présentés ci-après, en termes d'influence du forage intrusif sur (i) le fonctionnement hydraulique du système de stockage et le transfert des radionucléides depuis le(les) alvéole(s) concerné(s) par le forage jusqu'au toit (ou mur) de la couche du Callovo-Oxfordien, et (ii) l'incidence radiologique aux exutoires rappelés ci-avant.

10.5.2.1 Les enseignements relatifs à l'influence du forage sur le fonctionnement hydraulique et le transfert des radionucléides

10.5.2.1.1 L'analyse préalable des principaux éléments pilotant le transfert de radionucléides dans le forage

Les influences « hydraulique » et « radiologique » (au sens d'où viennent les radionucléides) du forage sont contrôlées par :

- les paramètres d'écoulement et de transfert de radionucléides de la couche du Callovo-Oxfordien :
  - ✓ la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien et le faible gradient de charge hydraulique vertical (ascendant pour le scénario de forage intrusif d'exploitation du Trias abandonné à la cote du stockage et descendant pour le scénario de forage intrusif d'exploration du Dogger abandonné à sa profondeur cible) permettent de limiter le « moteur hydraulique » du forage dans les composants ouvragés, et donc la cinétique convective au sein des alvéoles et des galeries ;
  - ✓ les conditions de diffusion dominante dans la couche du Callovo-Oxfordien, en lien avec les conditions d'écoulement limitées (cf. Point précédent), notamment pour le scénario de forage intrusif d'exploration du Dogger abandonné à sa profondeur cible, permettent de bénéficier d'un échange de masse par diffusion le long des ouvrages, et donc d'une atténuation du flux de radionucléides capté par le forage, en particulier lorsque les radionucléides sont fortement sorbés dans la couche du Callovo-Oxfordien ;
- la taille et le type de forage :
  - ✓ un forage de diamètre élevé contribue à augmenter la capacité de transmission de la charge hydraulique des formations encaissantes au sein des ouvrages, donc à augmenter la perturbation hydraulique au sein de ces derniers et l'effet de drain hydraulique par le forage ;

- ✓ un forage abandonné à la cote de l'installation souterraine est plus pénalisant qu'un forage traversant la couche du Callovo-Oxfordien, abandonné à la cote du Dogger. En effet dans ce dernier cas, la mise en équilibre hydraulique du forage entre l'Oxfordien et le Dogger limite les effets de drain hydraulique par le forage ;

- les éléments d'architecture et de conception :
  - ✓ le positionnement du maximum d'inventaire radiologique des radionucléides mobiles et à vie longue, au sein des quartiers et des alvéoles ;

    L'influence radiologique « court terme » du forage est directement proportionnelle à l'inventaire radiologique capté par le forage, et donc aux inventaires radiologiques situés à proximité de ce dernier ;
  - ✓ la compacité du stockage.

    Celle-ci renvoie aux éléments d'architecture et de conception (paramètres de conception) qui minimisent le temps de transfert depuis les ouvrages souterrains vers le forage et *in fine* l'inventaire radiologique « mobilisable » par le forage sur le long terme :
    - pour un forage situé dans le quartier de stockage HA : la longueur des alvéoles de stockage HA et leur entraxe, le diamètre et la longueur des galeries d'accès ;
    - pour un forage situé dans le quartier de stockage MA-VL : la longueur et la section des alvéoles de stockage MA-VL, l'entraxe entre alvéoles MA-VL, le diamètre et la longueur des galeries de liaison et de retour d'air.

10.5.2.1.2 Les forages intrusifs dans le quartier de stockage HA

Les évaluations des deux scénarios de forage intrusif, respectivement abandonnés à la cote du stockage (forage d'exploitation géothermique du Trias), ou à la profondeur cible (forage exploratoire du Dogger), permettent de dégager les enseignements suivants :

- dans le cas du scénario de *forage exploratoire du Dogger* mettant en connexion l'Oxfordien et le Dogger, l'influence hydraulique du forage est très faible, de l'ordre de quelques dixièmes de mètres de perte de charge et limitée à une fraction de la zone autour du forage, du fait de la mise en équilibre du forage par les charges de l'Oxfordien et du Dogger limitant ainsi les effets de drain hydraulique du forage ;
- dans le cas du *scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage*, et en lien avec un gradient de charge hydraulique vertical ascendant plus important que le gradient vertical descendant du scénario de forage précédent, la perturbation hydraulique (pertes de charges hydrauliques) est plus significative et s'étend sur l'intégralité des quartiers de stockage HA ;
- pour tous les radionucléides, l'incidence radiologique maximale est pilotée par le groupe d'alvéoles situés à proximité du forage :
  - ✓ l'occurrence du maximum est liée (i) au transfert des radionucléides depuis les colis jusqu'à la galerie d'accès (sur environ 7 mètres), à travers la couche du Callovo-Oxfordien sain et endommagé (voie de transfert principale), et, dans une moindre mesure, à travers la tête d'alvéole HA, (ii) à la durée du terme source de déchets, et (iii) aux temps de transfert depuis les alvéoles voisins ;
  - ✓ pour un radionucléide faiblement sorbé à très sorbé dans la couche du Callovo-Oxfordien, ou un radionucléide à vie courte, la diffusion dans la couche du Callovo-Oxfordien (voie de transfert principale) sur les quelques mètres séparant les colis de la galerie d'accès, est suffisante pour bénéficier d'une forte atténuation du débit molaire arrivant au forage. Les principaux radionucléides atteignant le forage sont donc les radionucléides à vie longue, mobiles ou faiblement sorbés ;
- en scénario de forage de la garde supérieure du Callovo-Oxfordien et abandonné à la cote du stockage :
  - ✓ l'influence hydraulique du forage conduit à un transfert des radionucléides dans l'alvéole HA en codominance convection/diffusion, et environ 11 % de l'inventaire radiologique initial en iode 129 du quartier de stockage HA empruntent la voie de transfert par les galeries sur un million d'années, le reste migrant dans la couche du Callovo-Oxfordien ;

- en scénario de forage traversant la couche du Callovo-Oxfordien et abandonné à la profondeur cible (dans le Dogger) :
  - ✓ la présence d'un forage dans les galeries d'accès ne conduit pas à modifier de manière significative les conditions de transfert des radionucléides dans les alvéoles HA. Le transfert des radionucléides dans l'alvéole reste en diffusion dominante, et environ 6 % de l'inventaire radiologique initial en iode 129 du quartier de stockage HA empruntent la voie de transfert par les galeries sur un million d'années, le reste migrant dans la couche du Callovo-Oxfordien, comme en l'absence de forage ;
  - ✓ la faible convection dans les ouvrages permet de limiter l'influence radiologique du forage au demi-quartier de stockage correspondant.

10.5.2.1.3 Les forages intrusifs dans le quartier de stockage MA-VL

Les évaluations des deux scénarios de forage intrusif, abandonné respectivement à la cote du stockage (forage d'exploitation géothermique du Trias), ou à la profondeur cible (forage exploratoire du Dogger), permettent de dégager les enseignements suivants :

- dans le cas du *scénario de forage géothermique abandonné à la cote du stockage*, en lien avec un diamètre plus important du forage et un gradient de charge hydraulique ascendant vertical plus élevé, la perturbation hydraulique atteint de l'ordre de 4,5 mètres dans le quartier de stockage MA-VL ;
- dans le cas du *scénario de forage exploratoire abandonné à la profondeur cible (dans le Dogger)*, la mise en connexion hydraulique entre l'Oxfordien et le Dogger entraîne une faible influence hydraulique du forage, avec une variation de charge hydraulique induite inférieure à 1 mètre dans le quartier de stockage MA-VL. Comme dans le cas d'un forage dans le quartier de stockage HA, la mise en équilibre hydraulique du forage par les charges de l'Oxfordien et du Dogger limite les effets de drain hydraulique du forage ;
- pour tous les radionucléides, le débit molaire maximal sortant du forage est principalement piloté par l'inventaire radiologique maximal présent dans l'alvéole de stockage impacté par le forage. Ce débit molaire maximal intervient en quelques centaines d'années pour les radionucléides les plus mobiles. Pour les radionucléides sorbés à très sorbés dans la couche du Callovo-Oxfordien et les matériaux cimentaires, le débit molaire maximal est obtenu après plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années :
  - ✓ dans le cas du *scénario de forage intrusif abandonné à la cote du stockage*, la quantité molaire sortant du forage au niveau du toit de la couche du Callovo-Oxfordien sur 1 million d'années est de l'ordre ou supérieure à la quantité initiale de l'alvéole impacté par le forage pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79, mettant en évidence un rayon d'influence du forage s'étendant sur plus d'un alvéole pour les radionucléides mobiles, solubles et à vie longue. Cette quantité représente au moins 40 % de l'inventaire radiologique initial total du quartier de stockage MA-VL pour l'iode 129 (60 %), le chlore 36 (40 %) et le sélénium 79 (49 %) ;
  - ✓ dans le cas du *scénario de forage intrusif abandonné à la profondeur cible (dans le Dogger)*, les quantités molaires sortant du forage au niveau du mur de la couche du Callovo-Oxfordien sur 1 million d'années représentent de l'ordre de 4 % à 5 % de l'inventaire radiologique total initial du quartier de stockage MA-VL en radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36, sélénium 79) ;
- en lien direct avec le ratio des débits d'eau drainés par les deux forages, les débits molaires instantanés maximaux des éléments mobiles, tels l'iode 129, en sortie du forage abandonné à la cote du stockage (forage d'exploitation géothermique du Trias), sont supérieurs d'environ un facteur 10 à ceux sortant du forage abandonné à la profondeur cible (forage exploratoire du Dogger). Ce résultat provient notamment du diamètre plus important du premier forage et du gradient de charge hydraulique vertical (ascendant) plus élevé que celui (descendant) retenu pour le deuxième forage.

10.5.2.2 Les enseignements relatifs à l'incidence radiologique aux exutoires retenus

10.5.2.2.1 Les forages intrusifs dans le quartier de stockage HA

Les résultats mettent en évidence des doses maximales :

- pour le *scénario de forage abandonné à la cote du stockage* (à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte) :
  - ✓ de l'ordre de 10 $\mu Sv.an^{-1}$ (0,01 $mSv.an^{-1}$) pour le sélénium 79, le chlore 36 et le thorium 229 ;
  - ✓ de l'ordre de 1 $\mu Sv.an^{-1}$ pour le radium 226, l'américium 241, le molybdène 93, le plomb 210 et le niobium 94 ;
- pour le *scénario de forage abandonné à la profondeur cible dans le Dogger* (à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte) :
  - ✓ de l'ordre de 0,1 $\mu Sv.an^{-1}$ à 1 $\mu Sv.an^{-1}$ pour le sélénium 79 et le thorium 229 ;
  - ✓ de l'ordre de 0,01 $\mu Sv.an^{-1}$ pour l'iode 129, le chlore 36, l'uranium 233 et le plomb 210.

Les doses maximales sont généralement atteintes pour la classe d'âge « enfant de 1 an » (cas du sélénium 79, du chlore 36 et du plomb 210, avec une augmentation d'un facteur maximal de 3 à 4 par rapport à celles de la classe d'âge « adulte »). En biosphère chaude, les doses maximales sont supérieures d'environ 10 % à 20 % par rapport à celles de la biosphère tempérée pour la plupart des radionucléides.

Ainsi, les doses maximales, obtenues pour le sélénium 79 et la classe d'âge « enfant de 1 an », sont de l'ordre de 55 $\mu Sv.an^{-1}$ à 60 $\mu Sv.an^{-1}$ pour l'exutoire « Pompage dans le Barrois » du *scénario de forage abandonné à la cote du stockage*, et de l'ordre de 1,5 $\mu Sv.an^{-1}$ à 2 $\mu Sv.an^{-1}$ pour l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » du *scénario de forage abandonné à la profondeur cible (dans le Dogger).*

Les dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » sont (i) de quelques centaines d'années à quelques milliers d'années pour les radionucléides à vie courte ou moyenne tels que l'américium 241, le niobium 94, le molybdène 93 et le carbone 14 organique, (ii) d'environ 50 000 ans pour les radionucléides mobiles, solubles et à vie longue (iode 129, chlore 36), (iii) d'environ 200 000 ans le sélénium 79, contrôlé par sa limite de solubilité dans la couche du Callovo-Oxfordien, et (iv) de quelques centaines de milliers d'années pour le thorium 229, le radium 226 et le plomb 210, contrôlés par la filiation radioactive et la limite de solubilité de leurs antécédents dans la couche du Callovo-Oxfordien.

10.5.2.2.2 Les forages intrusifs dans le quartier de stockage MA-VL

Les résultats mettent en évidence des doses maximales :

- pour le *scénario de forage abandonné à la cote du stockage* (à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte) :
  - ✓ de l'ordre de 30 $mSv.an^{-1}$ pour le carbone 14 (organique) et l'argent 108 m ;
  - ✓ de l'ordre de 2 $mSv.an^{-1}$ pour le molybdène 93 ;
  - ✓ entre 0,5 $mSv.an^{-1}$ et 1 $mSv.an^{-1}$ pour le chlore 36 et le radium 226 ;
- pour le *scénario de forage abandonné à sa profondeur cible dans le Dogger* (à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte) :
  - ✓ de l'ordre de 25 $\mu Sv.an^{-1}$ pour le thorium 229 ;
  - ✓ de l'ordre de 1 $\mu Sv.an^{-1}$ pour l'uranium 233, le sélénium 79 et le carbone 14 (organique) ;
  - ✓ entre 0,2 $\mu Sv.an^{-1}$ et 0,5 $\mu Sv.an^{-1}$ pour le niobium 94, le plomb 210 et le radium 226.

Les doses maximales sont généralement atteintes pour la classe d'âge « enfant de 1 an » (cas du carbone 14 avec une augmentation de 30 % à 50 % par rapport à celle de la classe d'âge « adulte »). En biosphère chaude, les doses maximales sont supérieures d'environ 10 % à 20 % par rapport à celles de la biosphère tempérée pour la plupart des radionucléides.

Ainsi, les doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » du *scénario de forage abandonné à la cote du stockage*, obtenues pour le carbone 14 (organique) et la classe d'âge « enfant de 1 an », sont de l'ordre de 35 $mSv.an^{-1}$ à 50 $mSv.an^{-1}$, respectivement pour les biosphères tempérée et chaude. Les doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » du *scénario de forage abandonné à sa profondeur cible (dans le Dogger),* obtenues pour le thorium 229 et la classe d'âge « enfant de 1 an », sont de l'ordre de 35 $\mu Sv.an^{-1}$ à 45 $\mu Sv.an^{-1}$, respectivement pour les biosphères tempérée et chaude. Ces niveaux de doses maximales restent inférieurs aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

Les dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » sont :

- obtenues peu après 500 ans (date d'occurrence du forage intrusif) pour les radionucléides mobiles, à vie moyenne et longue tels que le carbone 14 (organique), l'argent 108m, le molybdène 93, le chlore 36, le sélénium 79 et l'iode 129 ;
- d'environ 600 ans et 700 ans, respectivement pour l'aluminium 26 et l'étain 126 ;
- d'environ 25 000 ans et 45 000 ans, respectivement pour le thorium 229 et le niobium 94 ;
- de plusieurs centaines de milliers d'années pour le thorium 228, le radium 228, le radium 226 et le plomb 210, contrôlés par la filiation radioactive et la limite de solubilité de leurs antécédents dans la couche du Callovo-Oxfordien et le béton des alvéoles MA-VL.

Les dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » sont (i) :

- d'environ 25 000 ans pour le carbone 14 (organique) de période moyenne ;
- comprises entre 85 000 ans et 100 000 ans pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue (chlore 36, sélénium 79, iode 129), ainsi que pour le niobium 94 et l'étain 126 ;
- d'environ 300 000 ans pour le nickel 59 et le neptunium 237 ;
- de plusieurs centaines de milliers d'années à un million d'années pour le thorium 230 et les radionucléides situés en fin de chaînes de filiation (uranium 233 et thorium 229, radium 226 et plomb 210, protactinium 231 et actinium 227), contrôlés par la filiation radioactive et la limite de solubilité de leurs antécédents dans la couche du Callovo-Oxfordien et le béton des alvéoles MA-VL.

Conclusions

Les résultats des évaluations montrent que le système de stockage est robuste vis-à-vis des deux scénarios de forage intrusifs évalués en reprenant les hypothèses et paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale (*forage d'exploitation géothermique du Trias arrêté au niveau du stockage* (diamètre 445 mm), *forage exploratoire du Dogger abandonné à sa profondeur cible dans le Dogger* (diamètre 216 mm)). En effet :

- la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien et le faible gradient de charge hydraulique vertical permettent de limiter le « moteur hydraulique » du forage dans les composants ouvragés, et donc la cinétique convective au sein des alvéoles et des galeries ;
- pour le scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage :
  - ✓ dans le cas d'un forage localisé dans le quartier de stockage HA, la perturbation hydraulique (perte de charge hydraulique) s'étend à l'intégralité des quartiers de stockage HA ;
  - ✓ dans le cas d'un forage localisé dans le quartier de stockage MA-VL, la perturbation hydraulique (perte de charge hydraulique) s'étend dans l'ensemble du quartier de stockage MA-VL ;
- pour le *scénario de forage exploratoire abandonné à sa profondeur cible dans le Dogger*, la mise en connexion hydraulique entre l'Oxfordien et le Dogger entraîne une faible influence hydraulique du forage et limite les effets de « drain hydraulique » du forage :
  - ✓ dans le cas d'un forage localisé dans le quartier de stockage HA, l'influence hydraulique du forage est très faible ;
  - ✓ dans le cas d'un forage localisé dans le quartier de stockage MA-VL, la variation de charge hydraulique induite par le forage est faible ;
- les débits d'eau drainés par le forage sont de l'ordre de 4 à 6 mètres cube par an pour le forage géothermique arrêté au niveau du stockage et de 0,5 à 1 mètre cube par an pour le forage exploratoire abandonné à sa profondeur cible dans le Dogger ;
- les conditions de diffusion dominante dans la couche du Callovo-Oxfordien, en lien avec les conditions d'écoulement limitées précisées ci-avant, notamment pour le forage intrusif d'exploration du Dogger, permettent de bénéficier d'un échange de masse par diffusion le long des ouvrages, et donc d'une atténuation du débit molaire de radionucléides capté par le forage, en particulier pour les radionucléides fortement sorbés dans la couche du Callovo-Oxfordien ;
- en lien direct avec le ratio des débits d'eau drainés par les deux forages, les débits molaires instantanés maximaux des éléments mobiles, tels l'iode 129, en sortie du forage abandonné à la cote du stockage (forage d'exploitation géothermique du Trias), sont supérieurs d'environ un facteur 10 à ceux sortant du forage abandonné à la profondeur cible (forage exploratoire du Dogger). Ce résultat provient notamment du diamètre plus important du premier forage et du gradient de charge hydraulique vertical (ascendant) plus élevé que celui (descendant) retenu pour le deuxième forage ;
- pour un forage localisé dans le quartier de stockage HA :
  - ✓ dans le cas du *scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage*, l'influence hydraulique du forage conduit à un transfert des radionucléides dans l'alvéole HA en codominance convection/diffusion, et environ 11 % de l'inventaire radiologique initial en iode 129 du quartier de stockage HA empruntent la voie de transfert par les galeries sur un million d'années, le reste migrant dans la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ dans le cas du *scénario de forage exploratoire abandonné à sa profondeur cible dans le Dogger*, la faible convection dans les ouvrages permet de limiter l'influence radiologique du forage au demi-quartier de stockage correspondant; et environ 6 % de l'inventaire radiologique initial en iode 129 du quartier de stockage HA empruntent la voie de transfert par les galeries sur un million d'années, le reste migrant dans la couche du Callovo-Oxfordien, comme en l'absence de forage ;

- pour un forage localisé dans le quartier de stockage MA-VL :
  - ✓ dans le cas du *scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage*, la quantité molaire sortant du forage au niveau du toit de la couche du Callovo-Oxfordien sur 1 million d'années, représente au moins 40 % de l'inventaire radiologique total initial du quartier de stockage MA-VL pour l'iode 129 (60 %), le chlore 36 (40 %) et le sélénium 79 (49 %) ;
  - ✓ dans le cas du *scénario de forage exploratoire abandonné à sa profondeur cible dans le Dogger*, les quantités molaires sortant du forage au niveau du mur de la couche du Callovo-Oxfordien sur 1 million d'années représentent de l'ordre de 4 % à 5 % de l'inventaire radiologique total initial du quartier de stockage MA-VL en radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36, sélénium 79) ;
- pour le *scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage*, les incidences radiologiques maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », relatives au groupe de référence « multi-activités », une biosphère tempérée et la classe d'âge adulte sont :
  - ✓ pour un forage localisé dans le quartier de stockage HA :
    - de l'ordre de 10 μSv.an^{-1} (0,01 mSv.an^{-1}) pour le sélénium 79, le chlore 36 et le thorium 229 ;
    - de l'ordre de 1 μSv.an^{-1} pour le radium 226, l'américium 241, le molybdène 93, le plomb 210 et le niobium 94 ;
  - ✓ pour un forage localisé dans le quartier de stockage MA-VL :
    - de l'ordre de 30 mSv.an^{-1} pour le carbone 14 (organique) et l'argent 108 m ;
    - de l'ordre de 2 mSv.an^{-1} pour le molybdène 93 ;
    - entre 0,5 mSv.an^{-1} et 1 mSv.an^{-1} pour le chlore 36 et le radium 226 ;
- pour le *scénario de forage exploratoire abandonné à sa profondeur cible dans le Dogger*, les incidences radiologiques maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », relatives au groupe de référence « multi-activités » une biosphère tempérée et la classe d'âge adulte sont :
  - ✓ pour un forage localisé dans le quartier de stockage HA :
    - de l'ordre de 0,1 μSv.an^{-1} à 1 μSv.an^{-1} pour le sélénium 79 et le thorium 229 ;
    - de l'ordre de 0,01 μSv.an^{-1} pour l'iode 129, le chlore 36, l'uranium 233 et le plomb 210 ;
  - ✓ pour un forage localisé dans le quartier de stockage MA-VL :
    - de l'ordre de 25 μSv.an^{-1} pour le thorium 229 ;
    - de l'ordre de 1 μSv.an^{-1} pour l'uranium 233, le sélénium 79 et le carbone 14.

Pour un forage dans le quartier de stockage HA :

- les doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » du *scénario de forage abandonné à la cote du stockage*, obtenues pour le sélénium 79 et la classe d'âge « enfant de 1 an », sont de l'ordre de 55 μSv.an^{-1} à 60 μSv.an^{-1}, respectivement pour les biosphères tempérée et chaude ;
- les doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » du *scénario de forage abandonné à sa profondeur cible (dans le Dogger)*, obtenues pour le sélénium 79 et la classe d'âge « enfant de 1 an », sont de l'ordre de 1,5 μSv.an^{-1} à 2 μSv.an^{-1}, respectivement pour les biosphères tempérée et chaude.

Pour un forage dans le quartier de stockage MA-VL :

- les doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » du *scénario de forage abandonné à la cote du stockage*, obtenues pour le carbone 14 (organique) et la classe d'âge « enfant de 1 an », sont de l'ordre de 35 mSv.an^{-1} à 50 mSv.an^{-1}, respectivement pour les biosphères tempérée et chaude ;

- les doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » du *scénario de forage abandonné à sa profondeur cible (dans le Dogger)*, obtenues pour le thorium 229 et la classe d'âge « enfant de 1 an », sont de l'ordre de 35 $\mu Sv.an^{-1}$ à 45 $\mu Sv.an^{-1}$, respectivement pour les biosphères tempérée et chaude.

Dans tous les cas étudiés, les niveaux de doses restent inférieurs aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes, critère retenu pour ces scénarios d'intrusion (cf. Guide de sûreté n°1 de l'ASN de 2008 et chapitre 1.3 du présent volume).

10.5.3 Les enseignements tirés du forage exploratoire pendant le transitoire hydraulique-gaz

La dose efficace engagée pour un travailleur réalisant un forage exploratoire pendant le transitoire hydraulique-gaz est majoritairement due à l'inhalation de carbone 14 sous forme gazeuse présent dans le jet émis à grande vitesse, à une hauteur de l'ordre de 25 mètres.

Celle-ci est supérieure de sept ordres de grandeur à la dose efficace engagée par inhalation induite par la présence d'autres radionucléides au sein des gouttelettes d'eau remise en suspension et supérieure d'environ six ordres de grandeur à la dose associée à l'exposition externe au carbone 14.

La dose efficace engagée pour le travailleur réalisant ce forage exploratoire est de l'ordre de quelques millisieverts ce qui reste très inférieur aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

11

Les études de sensibilité menées dans le cadre des évaluations de sûreté à long terme

11.1 La présentation des études de sensibilité et de leurs objectifs 676

11.2 Les études de sensibilité aux paramètres de transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien 677

11.3 Les études de sensibilité relatives à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL et aux éléments d'architecture et de conception 683

11.4 Les enseignements tirés des études de sensibilité 699

11.1 La présentation des études de sensibilité et de leurs objectifs

Ce chapitre présente les résultats des études de sensibilité, relatives d'une part, à certaines propriétés du milieu géologique vis-à-vis de la migration des radionucléides selon les voies de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien et par les ouvrages, et d'autre part, au remplissage des alvéoles MA-VL et aux caractéristiques de certains composants de l'architecture souterraine, menées dans le cadre du scénario d'évolution normale (SEN) et des scénarios d'évolution altérée (SEA) et *What-if* de dysfonctionnement des scellements.

Ces études de sensibilité sont menées dans le but d'apprécier la sensibilité du fonctionnement du stockage en regard de domaine de variation de certains paramètres. Cette sensibilité est analysée sur la base d'indicateurs intermédiaires de la performance des composants du système de stockage : débits molaires aux limites de la couche du Callovo-Oxfordien et en sortie des liaisons surface-fond.

Les études de sensibilité relatives aux paramètres de transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien sont les suivantes :

- des études de sensibilité spécifiques à des paramètres influant le transfert des radionucléides à travers la couche du Callovo-Oxfordien. L'objectif est d'apprécier le poids individuel de chaque paramètre sur les débits molaires des radionucléides en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien tel que demandé dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) (cf. Chapitre 1.5.2.3 du présent volume). En lien avec les résultats déjà acquis dans le cadre du dossier 2005 et du « Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (2) pour les SEN et SEA, ces études sont axées sur les paramètres importants du transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien que sont les paramètres diffusifs et de rétention ;
- une étude de sensibilité prospective consistant à retenir une valeur extrême de moteur hydraulique combinant, notamment pour la situation enveloppe, perméabilité et gradient de charge maxima sur des indicateurs de débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien ainsi qu'en sortie des ouvrages en cas de dysfonctionnement des scellements. Cette étude vise à tester la robustesse du système de stockage.

Les études de sensibilité relatives à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL et aux éléments d'architecture et de conception sont les suivantes :

- une étude de sensibilité à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein des alvéoles de stockage MA-VL et du quartier de stockage MA-VL, afin de tenir compte des aléas associés aux chroniques de livraison des colis. Cette étude a pour objectifs, en SEN de montrer qu'on peut s'affranchir des chroniques de livraison, et en SEA et *What-if* de dysfonctionnement des scellements de justifier le caractère « enveloppe » du choix de répartition de l'inventaire radiologique MA-VL eu égard aux éventuels aléas associés au respect de ces chroniques. Il est à noter que cette étude permet également d'apprécier qualitativement, à inventaire constant, l'influence de l'ajout d'alvéoles MA-VL supplémentaires en fond de quartier de stockage MA-VL en lien avec la flexibilité (cf. Volume 11 du présent rapport) ;
- des études de sensibilité mono-paramétriques aux éléments d'architecture et de conception, afin de quantifier leurs poids relatifs sur les indicateurs de performance en après-fermeture. Les études de sensibilité aux éléments d'architecture et de conception ont plusieurs objectifs qui sont les suivants :
  - ✓ alimenter le « Dossier de justification des choix de l'architecture » (35) ;
  - ✓ mettre en avant la robustesse des conclusions issues des résultats des différentes évaluations quantitatives des scénarios de sûreté en après fermeture, au regard des possibles évolutions ultérieures de l'architecture du stockage. En effet, compte tenu du déploiement progressif de l'INB et des évolutions possibles de différentes natures (avancées scientifiques et technologiques par exemple), l'architecture retenue aujourd'hui pour les évaluations quantitatives, ne peut être considérée qu'illustrative de ce que pourrait être la réalité de l'installation à terminaison.

Il s'agit d'études de sensibilité ayant vocation à :

- définir un domaine d'architecture pour lequel les conclusions des études restent applicables ;
- montrer la flexibilité offerte par l'architecture souterraine notamment vis-à-vis de l'ajout ou de la suppression d'alvéoles au sein du quartier de stockage MA-VL tel qu'envisagé au volume 11 du présent rapport.

Le principal radionucléide retenu pour les études de sensibilité relatives à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL et aux éléments d'architecture et de conception, est l'iode 129. En effet, ce radionucléide est représentatif du comportement en solution des radionucléides à vie longue et mobiles et pouvant s'exprimer sur le très long terme selon les deux voies de transfert étudiées, par la couche du Callovo-Oxfordien et par les ouvrages. D'autres radionucléides, comme le chlore 36 et le sélénium 79, sont aussi représentatifs de ce comportement, aux effets d'atténuation par la décroissance radioactive près. Les radionucléides caractérisés par une sorption importante ne sont pas des radionucléides d'intérêt pour ces études dans la mesure où ils n'atteignent pas les limites de la couche du Callovo-Oxfordien sur le million d'années et ils sont l'objet d'échanges de masse importants entre les galeries et la couche du Callovo-Oxfordien.

On notera que les sensibilités considérées ne conduisent pas à sortir du cadre de la description de l'évolution phénoménologique du stockage établie sur la base des connaissances scientifiques et technologiques et qui sert de base à la définition des scénarios et situations.

11.2 Les études de sensibilité aux paramètres de transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien

11.2.1 La sensibilité au coefficient de diffusion effectif et au coefficient de sorption dans la couche du Callovo-Oxfordien

Afin d'évaluer le poids respectif des incertitudes associées à deux paramètres clés (coefficient de diffusion effectif, coefficient de sorption) contrôlant le transfert diffusif des radionucléides selon la voie de transfert dominante par la couche du Callovo-Oxfordien, deux études de sensibilité distinctes ont été menées pour chacun de ces deux paramètres. Partant des valeurs retenues pour la situation de référence du scénario d'évolution normale pour ces deux paramètres, toutes choses égales par ailleurs :

- la première étude de sensibilité considère les coefficients de diffusion effectif de la situation enveloppe ;
- la deuxième étude de sensibilité considère les coefficients de sorption de la situation enveloppe.

Les influences sur le débit molaire au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, d'une augmentation du coefficient de diffusion effectif d'une part, et d'une diminution du coefficient de sorption d'autre part, sont illustrées à la figure 11-1 ci-après (rappelant au préalable le résultat obtenu pour la situation de référence du scénario d'évolution normale).

11.2.1.1 La sensibilité à l'augmentation du coefficient de diffusion effectif

L'augmentation du coefficient de diffusion effectif (notamment un facteur 2 pour les anions), conduit à augmenter le débit molaire d'un facteur 2 à 3 pour l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79 (dominé par la fraction soluble en Se(VI)) en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 11-1, graphe en haut à droite).

Le débit molaire maximum du potassium 40 et du rubidium 87, radionucléides de période très longue, augmente respectivement d'un facteur 5 et d'un facteur 3, à un million d'années. Le débit molaire maximum du carbone 14 organique et du calcium 41 augmente d'environ 2,5 ordres de grandeur, du fait de leur très forte sensibilité à la modification du temps de transfert imputable à leurs périodes radioactives.

L'augmentation du coefficient de diffusion effectif entraîne une augmentation des débits molaires des principaux radionucléides avec une hiérarchie qui reste identique à celle du cas de référence : l'iode 129 et le chlore 36, le sélénium 79, puis dans une moindre mesure, le potassium 40 et le rubidium 87.

11.2.1.2 La sensibilité à la diminution du coefficient de sorption

La diminution du coefficient de sorption (prise en compte de la valeur minimale du Kd) au sein de la couche du Callovo-Oxfordien ne concerne pas les radionucléides mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79 et carbone 14 organique) auxquels aucun coefficient de sorption n'est associé.

Le débit molaire maximum du potassium 40 augmente d'un facteur 15 pour une réduction du Kd d'un facteur 5 et celui du calcium 41 augmente d'un facteur 500 pour une réduction du Kd d'un facteur 4 entre le cas de référence et le cas de sensibilité (cf. Figure 11-2, graphe en bas à droite). La période de ce dernier radionucléide conduit à ce qu'il soit sensible à une diminution du temps de transfert et les débits molaires en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien sont dominés par l'iode 129, le chlore 36, le potassium 40 et le sélénium 79.

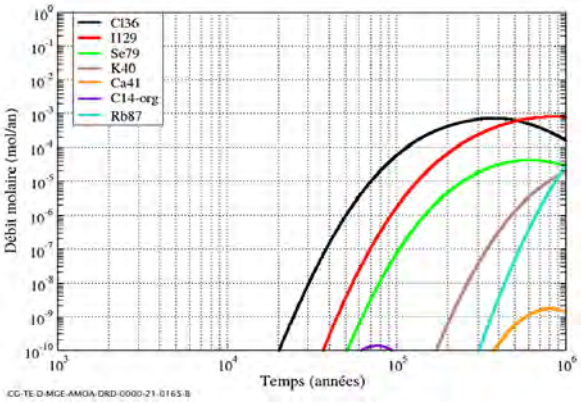
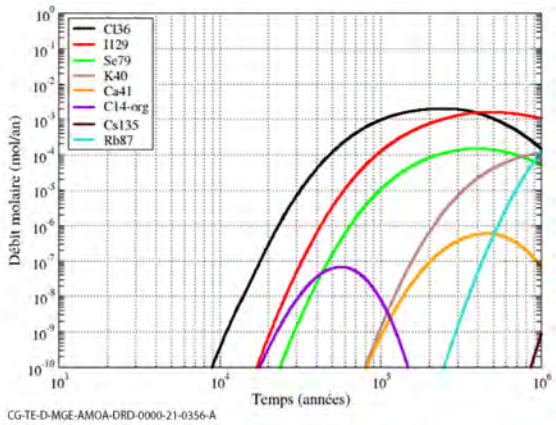
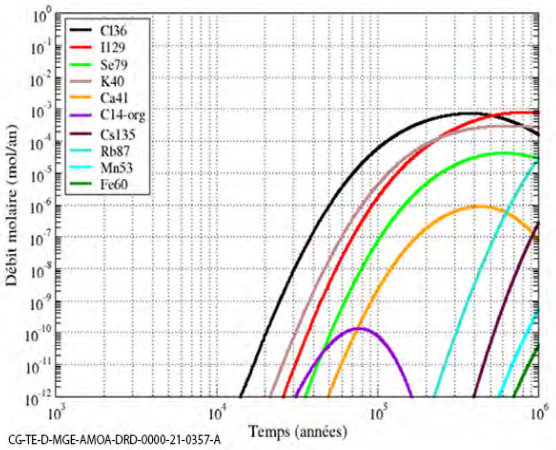
SEN - Cas de référence (rappel)	Sensibilité à l'augmentation du coefficient de diffusion effectif
	
	Sensibilité à la diminution du coefficient de sorption (coefficient de retard)
	

Figure 11-1 *Scénario d'évolution normale - situation de référence - études de sensibilité à l'augmentation du coefficient de diffusion effectif et à la diminution du coefficient de sorption dans le Callovo-Oxfordien : historiques de débit molaire sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

En synthèse

L'étude de sensibilité mono-paramétrique réalisée à partir de la situation de référence du SEN, d'une part aux coefficients de diffusion effectifs, et d'autre part aux coefficients de sorption dans la couche de Callovo-Oxfordien, pris respectivement à leurs valeurs maximale et minimale (valeurs de la situation enveloppe du SEN), montre :

- s'agissant des coefficients de diffusion effectifs, une augmentation du débit molaire aux limites de la couche du Callovo-Oxfordien de l'ordre d'un facteur 2 à 3 pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36, sélénium 79). Cette augmentation peut être plus importante pour des radionucléides dont la période radioactive est plus faible comme le carbone 14 ou le calcium 41, puisque le débit molaire de ces radionucléides est sensible au temps de transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien ;
- s'agissant des coefficients de sorption, une augmentation significative du débit molaire aux bornes de la couche du Callovo-Oxfordien pour certains radionucléides moyennement sorbés tels que le potassium 40 et le calcium 41. L'augmentation du débit molaire du potassium 40 modifie légèrement la hiérarchie des trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36, sélénium 79) dont les débits molaires demeurent inchangés, car ces radionucléides ne sont pas sorbés.

Ces résultats illustrent le poids particulièrement important des coefficients de diffusion effectifs pour tous les radionucléides, et des coefficients de sorption spécifiquement pour les radionucléides susceptibles d'être sorbés, sur le transfert des radionucléides par la couche du Callovo-Oxfordien qui constitue la voie de transfert dominante. Les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien restent néanmoins encore dominés par l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79, et aussi spécifiquement par le potassium 40 dans le cadre de l'étude de sensibilité aux coefficients de sorption.

11.2.2 La sensibilité à la surpression interstitielle d'origine hydraulique du Callovo-Oxfordien

L'étude de sensibilité à la prise en compte d'une surpression interstitielle d'origine hydraulique a été menée afin d'évaluer le poids des paramètres influents/sensibles sur les indicateurs de performance et de tester la robustesse du système de stockage (cf. Chapitre 2.2.1 du présent volume). Cette étude de sensibilité est prospective, et consiste notamment pour la situation enveloppe, à retenir une valeur extrême de moteur hydraulique (combinant à la fois la perméabilité et le gradient de charge à leur valeur maximale respective).

Le principal radionucléide retenu pour cette étude de sensibilité est l'iode 129, représentatif du comportement en solution des radionucléides à vie longue et mobiles et pouvant s'exprimer sur le très long terme selon les deux voies de transfert étudiées, par la couche du Callovo-Oxfordien et par les ouvrages.

11.2.2.1 Le cas du scénario d'évolution normale

L'influence d'une surpression interstitielle d'origine hydraulique est illustrée pour les situations de référence et enveloppe du scénario d'évolution normale en figure 11-2 ci-après.

La prise en compte de la surpression dans le Callovo-Oxfordien sur les débits molaires d'iode 129 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien en situation de référence et en situation enveloppe ne montre aucun effet sur les conditions de transfert diffusives dans la couche du Callovo-Oxfordien : le débit molaire d'iode 129 sortant de la couche du Callovo-Oxfordien est identique avec ou sans prise en compte de la surpression interstitielle.

Les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond restent inférieurs, respectivement de 6 et 2 ordres de grandeur, à ceux de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien pour les situations de référence et enveloppe. Par conséquent, du fait de l'efficacité hydraulique des scellements et malgré une sollicitation hydraulique plus importante de ces derniers, la surpression hydraulique a une influence négligeable sur les indicateurs de débit molaire au toit de la couche du Callovo-Oxfordien.

SEN - Sensibilité au gradient de charge hydraulique vertical (surpression hydraulique)	
Situation de référence	**Situation enveloppe**

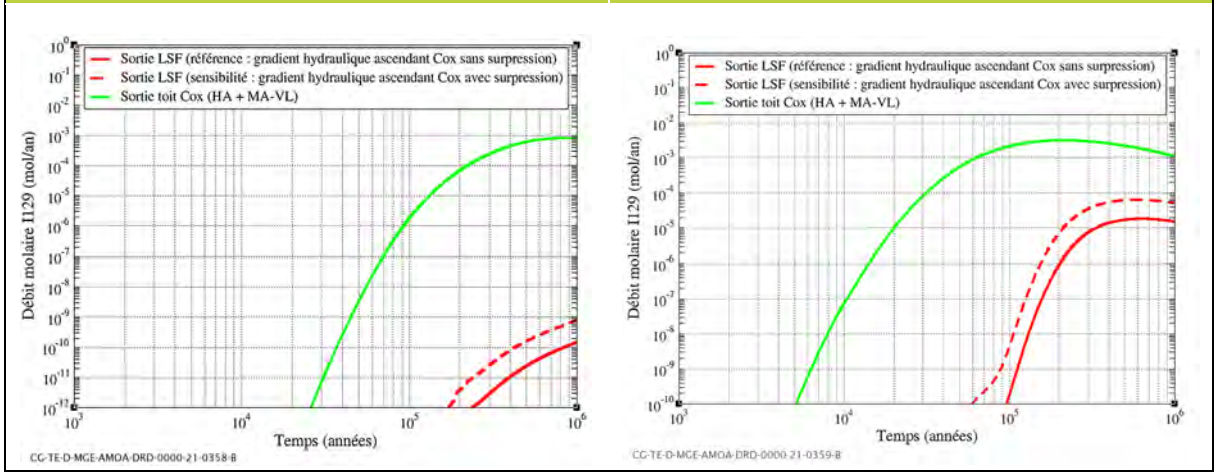


Figure 11-2 *Scénario d'évolution normale - situation de référence (à gauche) et enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien) (à droite), iode 129, étude de sensibilité au gradient de charge hydraulique ascendant vertical dans le Callovo-Oxfordien : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

11.2.2.2 Cas des scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements

La figure 11-3 synthétise à l'échelle globale du stockage, les historiques de débit molaire d'iode 129 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien et sortant des liaisons surface-fond, dans le cas des scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements, pour l'étude de sensibilité au gradient de charge hydraulique ascendant vertical dans le Callovo-Oxfordien. Les paramètres retenus sont ceux de la situation enveloppe du SEN. L'analyse comparée des résultats par rapport à la situation enveloppe du SEN (cas sans surpression) montre que la prise en compte de la surpression interstitielle conduit :

- pour le scénario SEA de dysfonctionnement de tous les scellements :
  - ✓ à une augmentation d'un facteur 4 du débit molaire d'iode 129 sortant par les liaisons surface-fond et d'une avancée de l'occurrence du maximum de débit molaire d'environ 120 000 ans ;
- pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements :
  - ✓ à une augmentation d'un facteur 2 du débit molaire d'iode 129 sortant par les liaisons surface-fond et d'une avancée de l'occurrence du maximum de débit molaire d'environ 15 000 ans.

En situation enveloppe, et du fait du dysfonctionnement de tous les scellements, la prise en compte des effets de la surpression hydraulique a un effet relativement modéré sur les débits molaires sortant des liaisons surface-fond : ces débits deviennent du même ordre ou légèrement supérieurs à ceux sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, typiquement jusqu'à 30 % en scénario SEA et environ un facteur 3 en scénario *What-if*, s'agissant de scénarios de dysfonctionnement de tous les scellements.

Scénarios de dysfonctionnement des scellements - Sensibilité au gradient de charge hydraulique vertical (surpression hydraulique)	
SEA (dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface)	***What-if* (dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface)**
Situation enveloppe	
Iode 129	

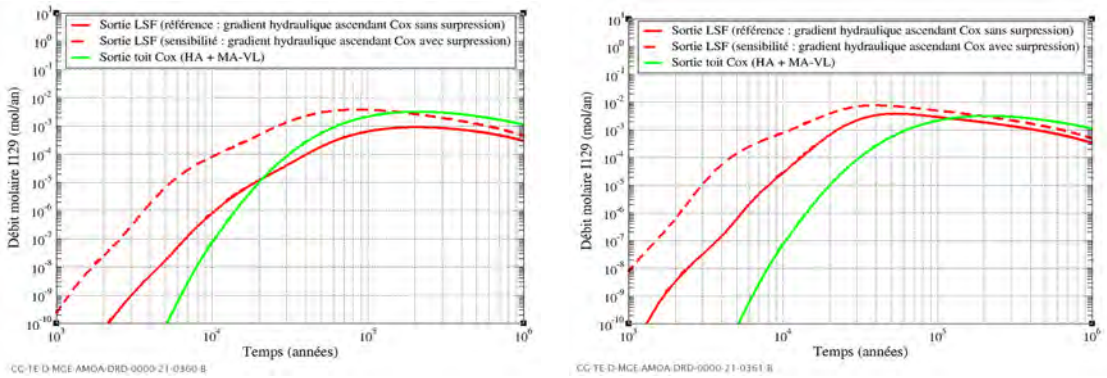


Figure 11-3 *Scénarios SEA (à gauche) et What-if (à droite) de dysfonctionnement de tous les scellements - situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), iode 129, étude de sensibilité au gradient de charge hydraulique ascendant vertical dans le Callovo-Oxfordien : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

En synthèse

Le débit molaire en iode 129 arrivant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien est quasiment insensible à une surpression interstitielle d'origine hydraulique qui conduirait à une augmentation du gradient hydraulique vertical pour les situations de référence et enveloppe du scénario d'évolution normale ainsi que pour les scénarios d'évolution altérée et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements s'appuyant sur les hypothèses relevant de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, et en particulier la prise en compte de l'exigence minimale de 50 mètres de garde saine de Callovo-Oxfordien.

Pour les situations de référence et enveloppe du SEN, la dominance du transfert des radionucléides par la voie du Callovo-Oxfordien est conservée et les débits molaires des radionucléides aux exutoires demeurent inchangés.

Pour les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements basés sur les hypothèses de la situation enveloppe du SEN, les débits molaires transitant par la voie ouvrage sont augmentés mais ils restent néanmoins du même ordre de grandeur que les débits molaires sortant par la couche du Callovo-Oxfordien.

11.3 Les études de sensibilité relatives à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL et aux éléments d'architecture et de conception

11.3.1 La sensibilité à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein du quartier de stockage et des alvéoles MA-VL

Cette étude de sensibilité vise à évaluer l'influence de plusieurs modes de distribution de l'inventaire radiologique MA-VL dans les alvéoles et au sein du quartier de stockage MA-VL. Pour mémoire (cf. Chapitre 11.1 du présent volume), le radionucléide d'intérêt pour cette étude est l'iode 129.

Quatre modes de distribution de l'inventaire radiologique MA-VL sont étudiés :

- une distribution des colis MA-VL par activité décroissante en iode 129 depuis le fond du demi-quartier de stockage MA-VL nord et par activité décroissante en iode 129 depuis le fond de chacun des alvéoles. Pour rappel, il s'agit du mode de distribution retenu pour l'ensemble des évaluations des scénarios SEN, SEA, *What-if* présentés dans les chapitres précédents. Ce mode de distribution est celui conduisant à maximiser le débit molaire par la voie ouvrage car il consiste à localiser les inventaires radiologiques MA-VL les plus importants à proximité de la galerie de recoupe (nord-est du quartier de stockage MA-VL) en connexion avec la base des liaisons surface-fond ;
- une distribution des colis MA-VL par activité décroissante en iode 129 depuis le fond du demi-quartier de stockage MA-VL nord. Au sein de chaque alvéole, l'activité est ensuite considérée répartie de façon uniforme ;
- une distribution des colis MA-VL suivant la chronique prévisionnelle de livraison telle qu'envisagée à ce stade ;
- une distribution de l'intégralité de l'inventaire radiologique MA-VL en iode 129 suivant une distribution uniforme au sein du quartier de stockage MA-VL (alvéoles tous identiques).

Sur la base de ces modes de distribution, l'inventaire radiologique en iode 129 contenu dans les cinq alvéoles situés au nord-est du quartier de stockage MA-VL représente :

- pour une localisation des inventaires radiologiques les plus importants en fond de quartier de stockage MA-VL (au nord-est), ce qui est le cas des deux premiers modes de distribution : environ 88 % de l'inventaire total en iode 129 du quartier de stockage MA-VL ;
- pour une distribution de l'inventaire radiologique MA-VL en iode 129 selon la chronique prévisionnelle de livraison des colis MA-VL : environ 43 % de l'inventaire total en iode 129 du quartier de stockage MA-VL ;
- pour une distribution de l'inventaire radiologique MA-VL en iode 129 uniforme au sein du quartier : environ 23 % de l'inventaire total en iode 129 du quartier de stockage MA-VL.

11.3.1.1 Le cas du scénario d'évolution normale

Pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, la voie de transfert par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond) est totalement dominée par les inventaires provenant du quartier de stockage MA-VL, puisque ce quartier est situé en amont hydraulique des liaisons surface-fond par rapport aux écoulements dans l'Oxfordien.

La figure 11-4 illustre l'influence des quatre modes précités de distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein des alvéoles MA-VL, et des alvéoles au sein du quartier de stockage MA-VL, sur le débit molaire d'iode 129 sortant selon les deux voies de transfert (par la couche du Callovo-Oxfordien et par les ouvrages), pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale avec un stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien.

Les résultats associés montrent :

- une variabilité d'environ un ordre de grandeur des débits molaires maximaux d'iode 129 transitant par les ouvrages pour les différentes sensibilités étudiées. Le débit molaire le plus important est obtenu pour une localisation des inventaires radiologiques MA-VL les plus importants à proximité de la galerie de recoupe (nord-est du quartier), c'est-à-dire en liaison directe avec la base des liaisons surface-fond ;
- des débits molaires sortant des liaisons surface-fond qui restent toujours inférieurs de plus de deux ordres de grandeur à ceux sortant par la couche du Callovo-Oxfordien ;
- un débit molaire associé à la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien qui demeure inchangé.

SEN – Sensibilité à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein du quartier de stockage et des alvéoles MA-VL

Situation enveloppe

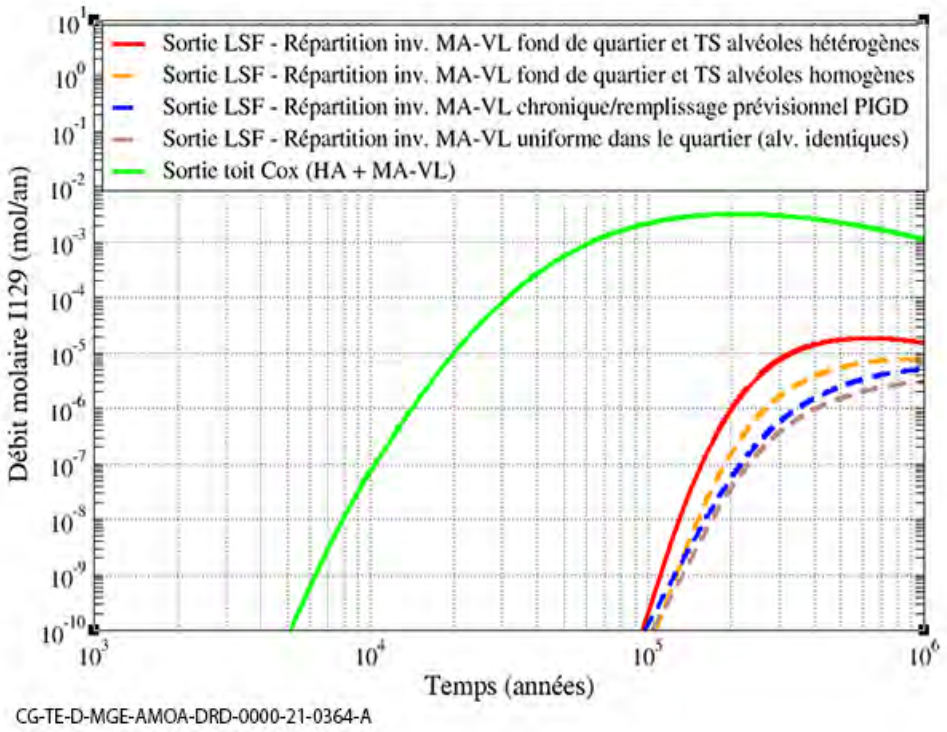


Figure 11-4 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), iode 129, étude de sensibilité à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein du quartier et des alvéoles MA-VL : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

11.3.1.2 Le cas des scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements

Pour les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements, la voie de transfert par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond) est, comme pour le scénario d'évolution normale, majoritairement contrôlée par les inventaires provenant du quartier de stockage MA-VL, puisque ce quartier est situé en amont hydraulique des liaisons surface-fond vis-à-vis des écoulements dans l'Oxfordien. Ainsi, comme pour le scénario d'évolution normale, l'étude de sensibilité consiste à évaluer l'influence de la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein du quartier et des alvéoles MA-VL sur la voie de transfert par les ouvrages.

La figure 11-5 synthétise pour les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements et à l'échelle globale du stockage, les historiques de débit molaire en iode 129 sortant des liaisons surface-fond et sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien pour les paramètres de la situation de référence du SEN.

Les quatre modes de distribution de l'inventaire radiologique MA-VL successivement étudiés sont strictement identiques à ceux considérés pour l'étude de sensibilité précédente relative au scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 11.3.1.1 du présent volume).

L'analyse comparée des résultats de l'étude de sensibilité à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein du quartier et des alvéoles MA-VL montre que :

- pour le scénario SEA :
  - ✓ la distribution pénalisante s'appuyant sur une localisation des inventaires radiologiques MA-VL les plus importants en fond de quartier de stockage MA-VL, combinée avec des termes sources considérés hétérogènes par alvéole, conduit comme attendu à maximiser la voie de transfert par les ouvrages ;
  - ✓ la localisation des inventaires MA-VL les plus importants en fond de quartier de stockage MA-VL, combinée avec des termes sources considérés homogènes par alvéole, conduit :
    - à un débit molaire maximum en iode 129 sortant des liaisons surface-fond inférieur d'environ un facteur 3 à celui associé à une distribution pénalisante ;
    - à une quantité cumulée d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années inférieure d'environ 75 % à celle associée à une distribution pénalisante ;
  - ✓ la distribution des inventaires MA-VL selon la chronique conduit :
    - à un débit molaire maximum en iode 129 sortant des liaisons surface-fond inférieur d'environ un facteur 6 à celui associé à une distribution pénalisante ;
    - à une quantité cumulée d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années inférieure d'environ 90 % à celle associée à une distribution pénalisante ;
  - ✓ la distribution des inventaires MA-VL uniforme au sein du quartier conduit :
    - à un débit molaire maximum en iode 129 sortant des liaisons surface-fond inférieur d'environ un facteur 10 à celui associé à une distribution pénalisante ;
    - à une quantité cumulée d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années inférieure d'environ 93 % à celle associée à une distribution pénalisante ;
- pour le scénario *What-if* :
  - ✓ la distribution pénalisante conduit comme attendu à maximiser la voie de transfert par les ouvrages (*idem* situation de référence du scénario SEA) ;
  - ✓ la localisation des inventaires MA-VL les plus importants en fond de quartier de stockage MA-VL, combinée avec des termes sources considérés homogènes par alvéole, conduit :
    - à un débit molaire maximum en iode 129 sortant des liaisons surface-fond inférieur d'environ un facteur 2,6 à celui associé à une distribution pénalisante ;
    - à une quantité cumulée d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années inférieure d'environ 66 % à celle associée à une distribution pénalisante ;

- ✓ la distribution des inventaires MA-VL selon la chronique conduit :
  - à un débit molaire maximum en iode 129 sortant des liaisons surface-fond inférieur d'environ un facteur 5,5 à celui associé à une distribution pénalisante ;
  - à une quantité cumulée d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années inférieure d'environ 87 % à celle associée à une distribution pénalisante ;
- ✓ la distribution des inventaires MA-VL uniforme au sein du quartier conduit :
  - à un débit molaire maximum en iode 129 sortant des liaisons surface-fond inférieur d'environ un facteur 9 à celui associé à une distribution pénalisante ;
  - à une quantité cumulée d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années inférieure d'environ 92 % à celle associée à une distribution pénalisante.

Pour des scénarios SEA et *What-if* qui sont basés sur des paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, l'influence relative de la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL est moins importante, car le niveau du débit molaire sortant des liaisons surface-fond de la situation enveloppe est plus élevé, rendant ainsi ce débit moins sensible à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL. Les occurrences de débit molaire maximal sortant des liaisons surface-fond sont toutefois plus précoces que celle en situation de référence, principalement pour le scénario *What-if*, en lien avec la définition « pénalisante » du scénario *What-if* et le caractère « enveloppe » de la situation considérée. Les résultats associés au scénario *What-if* en situation enveloppe sont donc logiquement et directement associés à la définition « conservative » à la fois du scénario et de la situation.

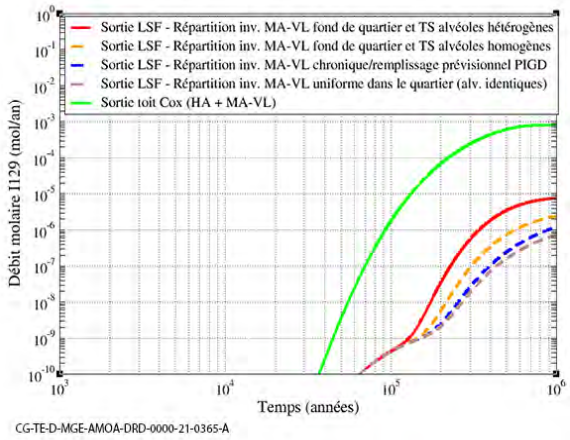
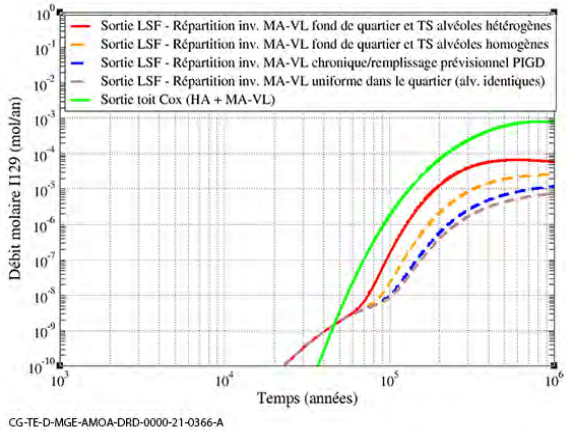
Scénarios de dysfonctionnement des scellements – Sensibilité à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein du quartier de stockage et des alvéoles MA-VL	
SEA (dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface)	***What-if* (dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface)**
Situation de référence	
	

Figure 11-5 *Scénarios SEA (à gauche) et What-if (à droite) de dysfonctionnement de tous les scellements, situation de référence, iode 129, étude de sensibilité à la distribution de l'inventaire MA-VL au sein du quartier et des alvéoles MA-VL : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

En synthèse

Suivant les hypothèses retenues pour la distribution de l'activité radiologique en iode 129 au sein du quartier de stockage MA-VL et des alvéoles MA-VL, et plus particulièrement la distance moyenne séparant les inventaires MA-VL les plus importants de la base des liaisons surface fond, le débit molaire maximal de radionucléides transitant par les liaisons surface-fond peut varier sur une plage d'environ un ordre de grandeur :

- pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale ;
- pour les scénario SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements reposant sur les paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale.

Pour les trois scénarios considérés ci-avant, le débit molaire maximal en iode 129 arrivant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien est insensible aux hypothèses de distribution d'inventaire radiologique MA-VL et demeure toujours supérieur à celui transitant par les ouvrages (liaisons surface-fond) :

- d'environ un ordre de grandeur pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements basé sur les paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale ;
- d'environ deux ordres de grandeur pour la situation enveloppe du SEN et le scénario SEA de dysfonctionnement de tous les scellements basé sur les paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale.

Lorsque les scénarios SEA ou *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements reposent sur les paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, l'influence de la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein des alvéoles et du quartier de stockage MA-VL est plus réduite que celle obtenue pour les mêmes scénarios reposant sur les paramètres de la situation de référence, du fait d'un débit molaire par la voie ouvrage plus élever donc moins sensible.

La distribution de l'inventaire radiologique MA-VL conduisant à maximiser le débit molaire par la voie ouvrages ayant été retenue pour l'évaluation des deux situations du scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 6 du présent volume) ainsi que pour celle des scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement des scellements (cf. Chapitres 8 et 9 du présent volume), les résultats obtenus montrent que la démonstration est robuste vis à vis d'une variabilité de la distribution de l'inventaire radiologique au sein du quartier de stockage MA-VL.

11.3.2 La sensibilité à la distance entre le quartier de stockage MA-VL et la base des liaisons surface-fond

Une étude de sensibilité à la longueur de la galerie séparant les inventaires les plus importants du quartier de stockage MA-VL et les liaisons surface-fond (puits et descenderies), a été menée toutes choses égales par ailleurs (position des inventaires dans le quartier de stockage MA-VL notamment). En pratique, cette étude est réalisée par une modification de la position de la galerie de recoupe MA-VL initialement située au nord-est du quartier de stockage MA-VL (galerie de jonction établissant une liaison directe entre les inventaires MA-VL les plus importants et la base des liaisons surface-fond).

Le radionucléide d'intérêt retenu pour l'étude est l'iode 129, représentatif du comportement en solution des radionucléides et pouvant s'exprimer sur le très long terme dans les deux voies de transfert étudiées.

La distance d'environ 700 mètres entre la base des liaisons surface-fond et la galerie de recoupe située au nord-est associée à l'architecture à terminaison illustrative, a été portée successivement à 500 mètres, puis à 300 mètres, pour l'étude de sensibilité.

11.3.2.1 Le cas du scénario d'évolution normale

Les résultats obtenus pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale avec un positionnement du stockage à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien sont illustrés sur la figure 11-6 ci-après.

Le débit molaire d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond est augmenté d'un facteur 1,5 lorsque la distance entre la base des liaisons surface-fond et la position des principaux inventaires MA-VL est réduite de 200 mètres, et d'un facteur 2,2 lorsque celle-ci est réduite de 400 mètres. Dans tous les cas, ce débit molaire maximum reste inférieur de près de deux ordres de grandeur à celui sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien.

SEN – Sensibilité à la longueur des galeries de liaison principales (position de la galerie de recoupe MA-VL)

Situation enveloppe

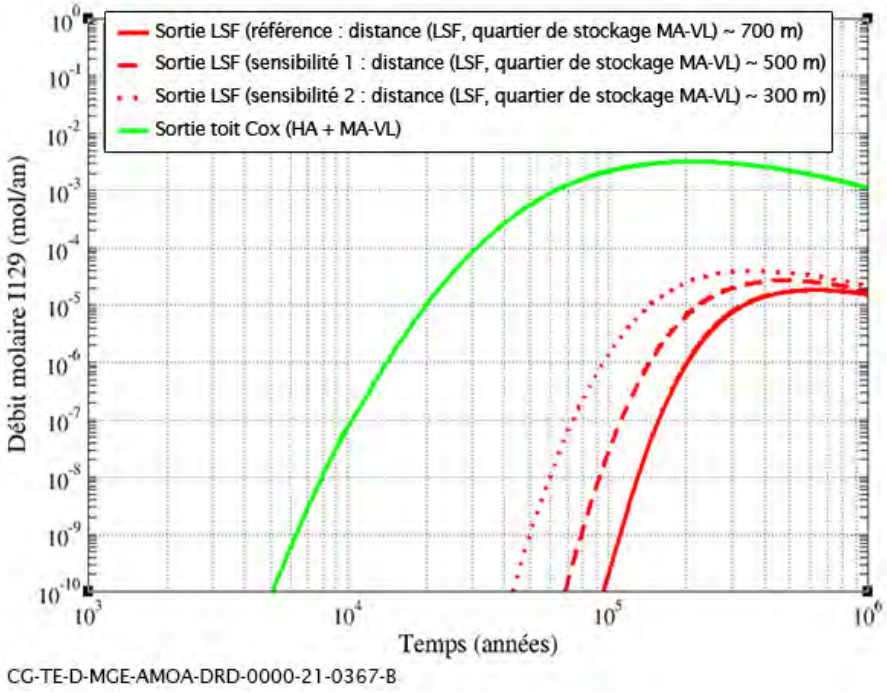


Figure 11-6 *Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), iode 129, étude de sensibilité à la longueur des galeries de liaison principales : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

11.3.2.2 Le cas des SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements

La figure 11-7 synthétise à l'échelle globale du stockage, pour l'étude de sensibilité à la longueur des galeries de liaison principales, les historiques de débit molaire d'iode 129 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien et sortant des liaisons surface-fond pour les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements basés sur les paramètres de la situation de référence du SEN.

Sur la base des paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale, les résultats montrent, lorsque la position de la galerie de recoupe MA-VL par rapport à la base des liaisons surface-fond est avancée de 700 mètres à 500 mètres (respectivement de 700 mètres à 300 mètres) :

- pour le scénario SEA de dysfonctionnement de tous les scellements :
  - ✓ une augmentation du débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond par rapport à celui associé à une distance de 700 mètres, qui reste toujours inférieur (d'environ un facteur 60 respectivement d'environ un facteur 40) à celui sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ une occurrence plus précoce du débit molaire sortant des liaisons surface-fond, avec un maximum de ce débit molaire avancé d'environ 100 000 ans (respectivement d'environ 340 000 ans) par rapport à celui associé à une distance de 700 mètres ;
- pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements :
  - ✓ une augmentation du débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond par rapport à celui associé à une distance de 700 mètres, qui reste toujours inférieur (d'environ un facteur 7 respectivement d'environ un facteur 4) à celui sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ une occurrence plus précoce du débit molaire sortant des liaisons surface-fond, avec un maximum de ce débit molaire avancé d'environ 200 000 ans (respectivement d'environ 300 000 ans) par rapport à celui associé à une distance de 700 mètres.

Les augmentations de débit molaire selon la voie ouvrage sont plus limitées lorsque les scénarios SEA ou *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements reposent sur les paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, car le niveau du débit molaire sortant des liaisons surface-fond de la situation enveloppe est plus élevé, rendant ainsi ce débit moins sensible à la longueur de galeries. Les occurrences de débit molaire maximal sortant des liaisons surface-fond sont toutefois plus précoces que celle en situation de référence, principalement pour le scénario *What-if*, en lien avec la définition « pénalisante » du scénario *What-if* et le caractère « enveloppe » de la situation considérée. Les résultats associés au scénario *What-if* en situation enveloppe sont donc logiquement et directement associés à la définition « conservative » à la fois du scénario et de la situation.

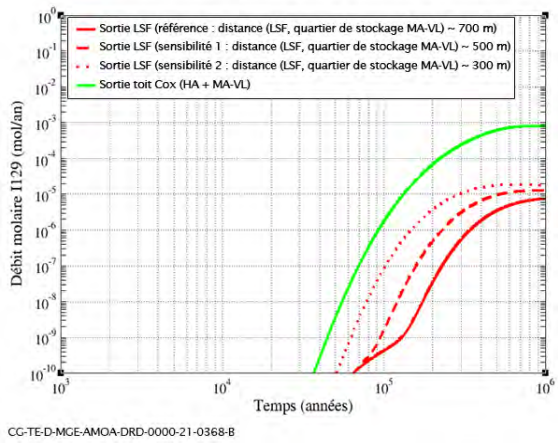
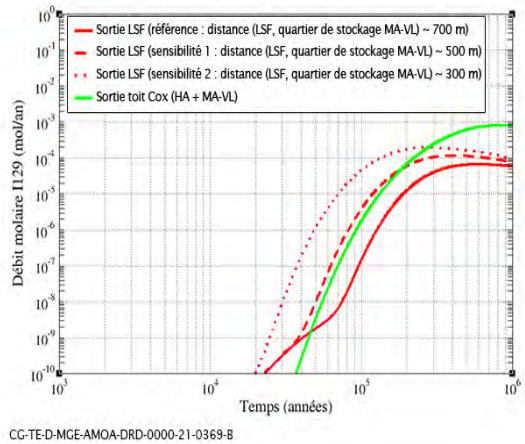
Scénarios de dysfonctionnement des scellements – Sensibilité à la longueur des galeries de liaison principales (position de la galerie de recoupe MA-VL)	
SEA (dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface)	***What-if* (dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface)**
Situation de référence	
	

Figure 11-7 *Scénarios SEA (à gauche) et What-if (à droite) de dysfonctionnement de tous les scellements – situation de référence, iode 129, étude de sensibilité à la longueur des galeries de liaison principales (position de la galerie de recoupe MA-VL) : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

En synthèse

Une diminution de 700 mètres à 500 mètres ou à 300 mètres de la distance entre la base des liaisons surface-fond et les inventaires radiologiques les plus importants du quartier de stockage MA-VL, conduit à une augmentation limitée (moins d'un ordre de grandeur) du débit molaire maximal de radionucléides transitant par les liaisons surface-fond.

Pour les trois cas considérés ci-avant, le débit molaire maximal d'iode 129 arrivant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien est insensible à ces hypothèses de réduction de longueur de galeries et demeure toujours supérieur à celui transitant par les ouvrages (liaisons surface-fond), d'environ un facteur 5 pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN, et d'environ deux ordres de grandeur pour le scénario d'évolution normale en situation enveloppe et pour le scénario SEA de dysfonctionnement de tous les ouvrages de fermeture basé sur les paramètres de la situation de référence du SEN.

Lorsque les scénarios SEA ou *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements reposent sur les paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, l'influence de la distance entre la base des liaisons surface-fond et les inventaires les plus importants du quartier de stockage MA-VL est plus réduite que celle obtenue pour les mêmes scénarios reposant sur les paramètres de la situation de référence, du fait d'un débit molaire par la voie ouvrage plus élevé donc moins sensible.

11.3.3 La sensibilité à la diminution du diamètre des galeries

Cette étude consiste à évaluer l'influence, sur la voie de transfert par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond), du diamètre des galeries de liaison. Dans la mesure où seule la réduction de section peut induire une augmentation de la vitesse de transfert dans les galeries de liaison, il est retenu une diminution du diamètre des galeries d'un mètre.

11.3.3.1 Le cas du scénario d'évolution normale

Les résultats présentés à la figure 11-8, pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale avec un positionnement du stockage à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien, montrent que cette diminution de diamètre a une influence négligeable sur les débits molaires d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond. Les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien demeurent inchangés. Il n'y a pas d'influence significative de la réduction du diamètre des galeries sur la cinétique de transfert par la voie ouvrage.

Pour cet élément d'architecture et de conception, il n'est pas attendu d'influence significative d'une réduction ou d'une augmentation un peu plus importante du diamètre des galeries, dans le domaine d'évolution normale (référence/enveloppe) avec une voie de transfert par les ouvrages toujours largement dominés par celle de la couche du Callovo-Oxfordien de plus de deux ordres de grandeur.

SEN - Sensibilité au diamètre des galeries

Situation enveloppe

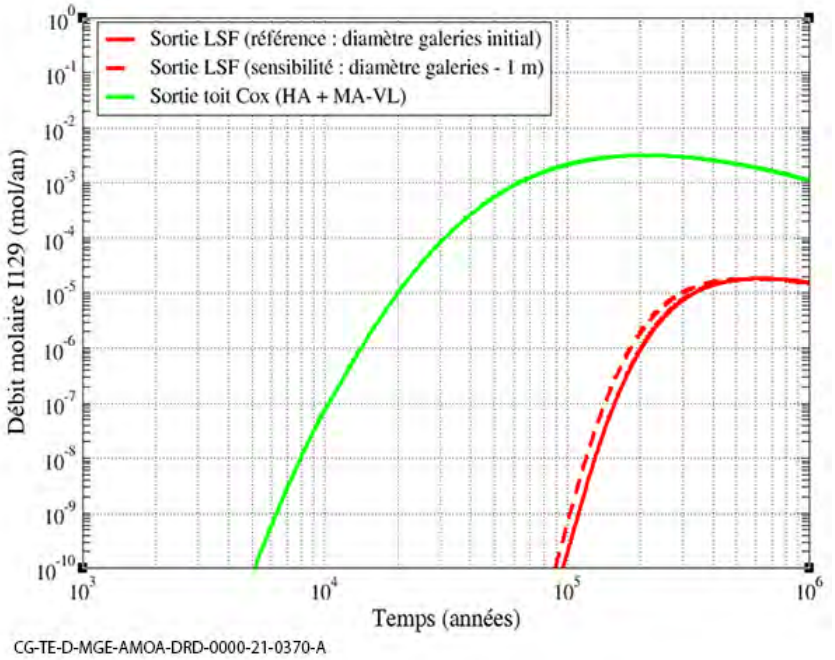


Figure 11-8 *Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), iode 129, étude de sensibilité au diamètre des galeries : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

11.3.3.2 Le cas des scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements

La figure 11-9 synthétise à l'échelle globale du stockage, les historiques de débit molaire d'iode 129 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien et des liaisons surface-fond pour les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements.

Sur la base des paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale, les résultats montrent que :

- pour le scénario SEA :
  - ✓ le débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond est augmenté d'un facteur 1,1 à un million d'années et reste deux ordres de grandeur inférieur à celui sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- pour le scénario *What-if* :
  - ✓ il n'y a pas d'augmentation du débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond au toit du Callovo-Oxfordien, ni de la quantité d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années ; le débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond reste un ordre de grandeur inférieur à celui sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien.

Il n'y a pas d'influence significative de la réduction du diamètre des galeries sur la cinétique de transfert par la voie ouvrage.

Lorsque les scénarios SEA ou *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements reposent sur les paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, il n'y a pas d'augmentation du débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond au toit du Callovo-Oxfordien, ni de la quantité d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années.

Scénarios de dysfonctionnement des scellements - Sensibilité au diamètre des galeries de liaison	
SEA (dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface)	***What-if* (dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface)**
Situation de référence	

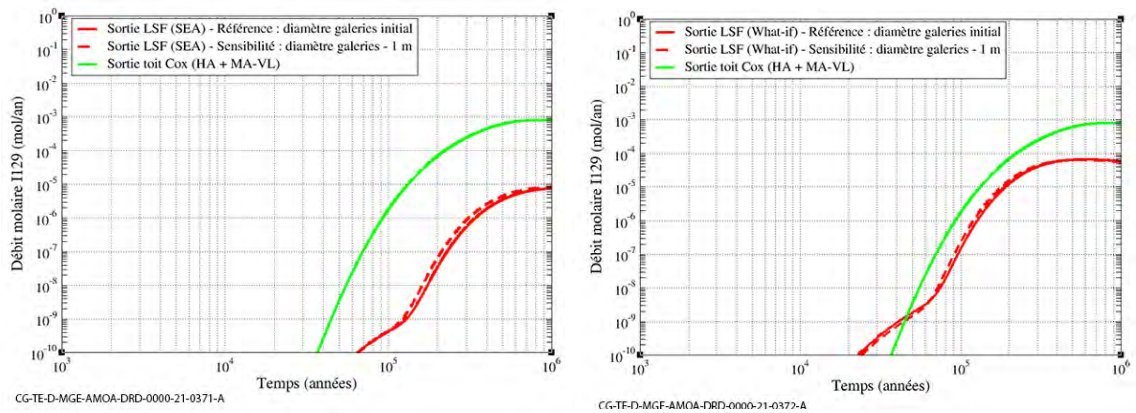


Figure 11-9 *Scénarios SEA (à gauche) et What-if (à droite) de dysfonctionnement de tous les scellements - situation de référence, iode 129, étude de sensibilité au diamètre des galeries de liaison : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

En synthèse

L'influence d'une réduction d'un mètre du diamètre des galeries de liaison sur la voie de transfert par les ouvrages est très faible et limitée, le débit molaire maximal de radionucléides transitant par la voie ouvrage augmentant au plus d'une dizaine de pourcents. Cette réduction n'influe ni sur la dominance de la voie de transfert des radionucléides par la couche du Callovo-Oxfordien, ni sur les débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien.

Enfin, la réduction du diamètre des galeries a peu d'influence sur la cinétique de transfert par la voie ouvrage.

11.3.4 La sensibilité à l'augmentation du diamètre ou du nombre des puits

Cette étude consiste à évaluer, toutes choses égales par ailleurs, l'influence, sur la voie de transfert par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond), de l'ajout d'un puits de diamètre excavé « moyen » ou de manière équivalente l'influence d'une augmentation d'environ 10 % du diamètre excavé de tous les puits ce qui correspond à une augmentation du diamètre de chacun des puits d'environ un mètre.

11.3.4.1 Le cas du scénario d'évolution normale

Les résultats présentés à la figure 11-10, pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, montrent que cette augmentation de diamètre a une influence négligeable sur les débits molaires d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond. Les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien demeurent inchangés. Il n'y a pas d'influence significative de l'augmentation du diamètre des puits sur la cinétique de transfert par la voie ouvrage.

Pour cet élément d'architecture et de conception, il n'est pas attendu d'influence significative d'une réduction ou d'une augmentation un peu plus importante du diamètre des puits, dans le domaine d'évolution normale (référence/enveloppe) avec une voie de transfert par les ouvrages toujours largement dominés par celle de la couche du Callovo-Oxfordien de plus de deux ordres de grandeur.

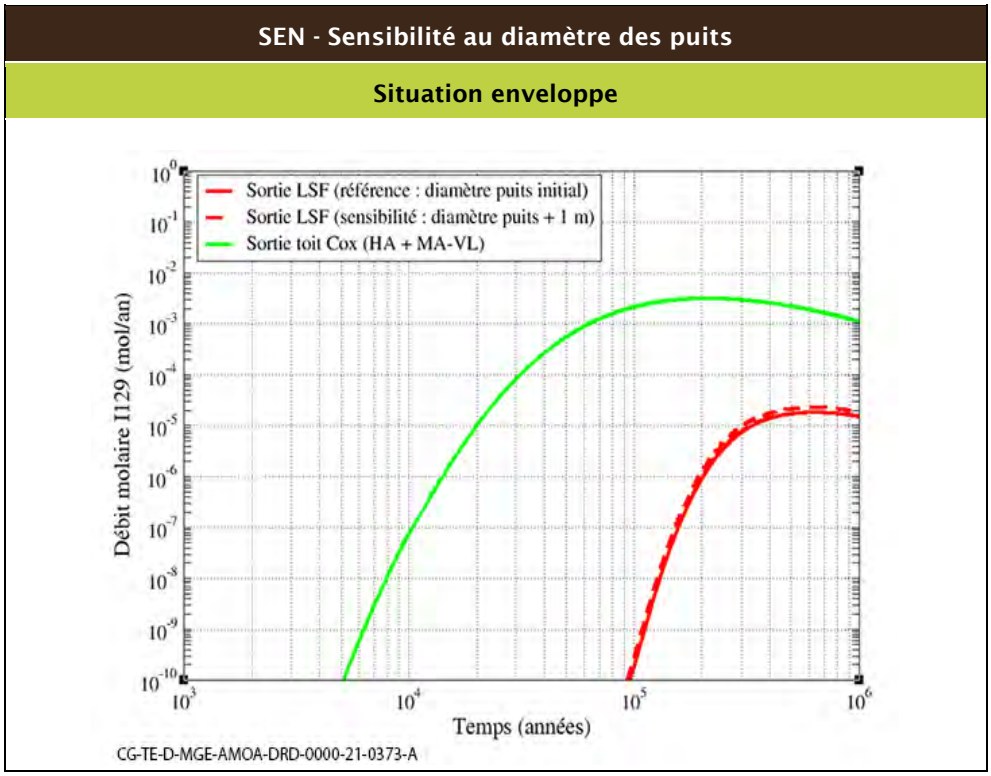


Figure 11-10 *Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), iode 129, étude de sensibilité au diamètre des puits : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

11.3.4.2 Le cas des scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements

La figure 11-11 synthétise à l'échelle globale du stockage, les historiques de débit molaire d'iode 129 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien et des liaisons surface-fond pour les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements. Sur la base des paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale, les résultats montrent que :

- pour le scénario SEA :
  - ✓ l'augmentation du débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond au toit du Callovo-Oxfordien est d'un facteur 1,2 à un million d'années, et l'augmentation de la quantité d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années est du même facteur ; le débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond reste deux ordres de grandeur inférieur à celui sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;

- pour le scénario *What-if* :
  - ✓ l'augmentation du débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond au toit du Callovo-Oxfordien est d'un facteur 1,25 à environ 550 000 ans, et l'augmentation de la quantité d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années est du même facteur ; le débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond reste un ordre de grandeur inférieur à celui sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien.

L'augmentation du diamètre des puits influence peu la cinétique de transfert par la voie ouvrage.

Lorsque les scénarios SEA ou *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements reposent sur les paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, il n'y a pas d'augmentation du débit molaire maximum d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond au toit du Callovo-Oxfordien, ni de la quantité d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à un million d'années.

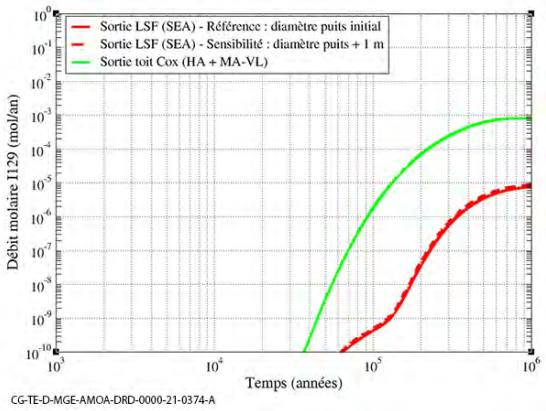
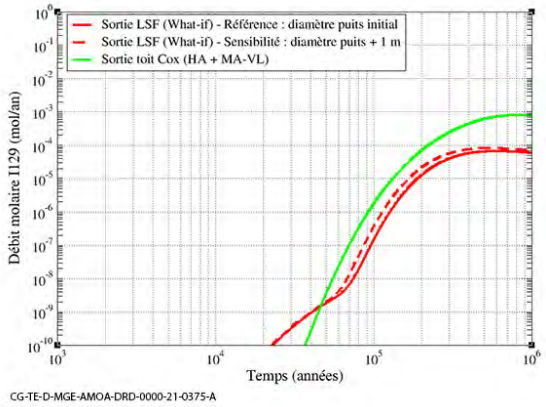
Scénarios de dysfonctionnement des scellements - Sensibilité au diamètre des puits	
SEA (dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface)	***What-if* (dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface)**
Situation de référence	
	

Figure 11-11 *Scénarios SEA (à gauche) et What-if (à droite) de dysfonctionnement de tous les scellements - situation de référence, iode 129, étude de sensibilité au diamètre/nombre de puits : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien*

En synthèse

L'influence, sur la voie de transfert par les ouvrages, de l'ajout d'un puits de diamètre excavé « moyen » ou de manière équivalente, l'influence d'une augmentation d'environ 10 % du diamètre excavé de tous les puits reste très faible et limitée à une augmentation d'au plus une vingtaine de pourcents du débit molaire maximal de radionucléides transitant par la voie ouvrage et n'influe ni sur la dominance de la voie de transfert des radionucléides par la couche du Callovo-Oxfordien, ni sur les débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien.

L'augmentation ou la réduction du diamètre des puits ont peu d'influence sur la cinétique de transfert par la voie ouvrage.

11.3.5 La sensibilité à l'augmentation de la longueur des alvéoles de stockage HA et MA-VL

L'augmentation de la longueur des alvéoles de stockage MA-VL ou HA conduit à une augmentation des surfaces d'échange entre les alvéoles de stockage et la couche de Callovo-Oxfordien, ce qui favorise le transfert diffusif des radionucléides par la voie du Callovo-Oxfordien sur le transfert par la voie « ouvrages », notamment pour les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement des scellements[109] dans le cas des alvéoles de stockage MA-VL[110]. Ainsi, l'augmentation de la longueur des alvéoles permet de tirer davantage parti des propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien.

En synthèse

L'augmentation de la longueur des alvéoles MA-VL ou HA renforce la dominance de la voie de transfert des radionucléides par la couche du Callovo-Oxfordien. L'influence de cet allongement des alvéoles sur les débits molaires des radionucléides aux limites de la couche du Callovo-Oxfordien, est non significative ce quel que soit le scénario considéré.

11.3.6 La sensibilité à l'augmentation/diminution du nombre d'alvéoles de stockage HA en lien avec la flexibilité

Le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA étant positionnés en aval hydraulique par rapport à la base des liaisons surface fond, l'ajout ou la suppression d'alvéoles dans ces quartiers est sans influence sur les débits molaires de radionucléides transitant par la voie ouvrage. En conséquence, il n'a pas été mené d'étude quantitative de sensibilité au nombre d'alvéoles HA.

11.3.7 La sensibilité à l'augmentation/diminution du nombre d'alvéoles de stockage MA-VL en lien avec la flexibilité

Le nombre total d'alvéoles de stockage MA-VL pourrait être :

- diminué de quelques alvéoles. Dans ce cas, eu égard au sens de déploiement progressif du quartier de stockage MA-VL, les alvéoles qui ne seraient pas construits seraient ceux positionnés en fond de quartier de stockage MA-VL ;
- augmenté par la construction d'un à quatre (cf. Configuration (d) de la figure 11-12) alvéoles supplémentaires, toujours en fond de quartier de stockage MA-VL.

Des évolutions possibles du quartier de stockage MA-VL entant dans le cadre des études en lien avec la flexibilité, sont illustrées en figure 11-12. Les configurations représentées correspondent à :

- a) l'architecture illustrative sur laquelle sont basées toutes les évaluations des scénarios après-fermeture ;
- b) l'architecture illustrative a) complétée par un alvéole supplémentaire (de couleur bleue) dans le demi-quartier nord ;
- c) l'architecture illustrative a) complétée par un alvéole supplémentaire (de couleur bleue) dans le demi-quartier sud ;
- d) l'architecture illustrative a) complétée de quatre alvéoles supplémentaires (de couleur bleue) ;

[109] Du fait d'une voie de transfert significative par la voie ouvrages.
[110] Du fait du positionnement en « amont hydraulique » du quartier de stockage MA-VL.

- e) l'architecture illustrative a) dans laquelle il a été supprimé un alvéole dans le demi-quartier nord ;
- f) l'architecture illustrative a) dans laquelle il a été supprimé un alvéole dans le demi-quartier sud.

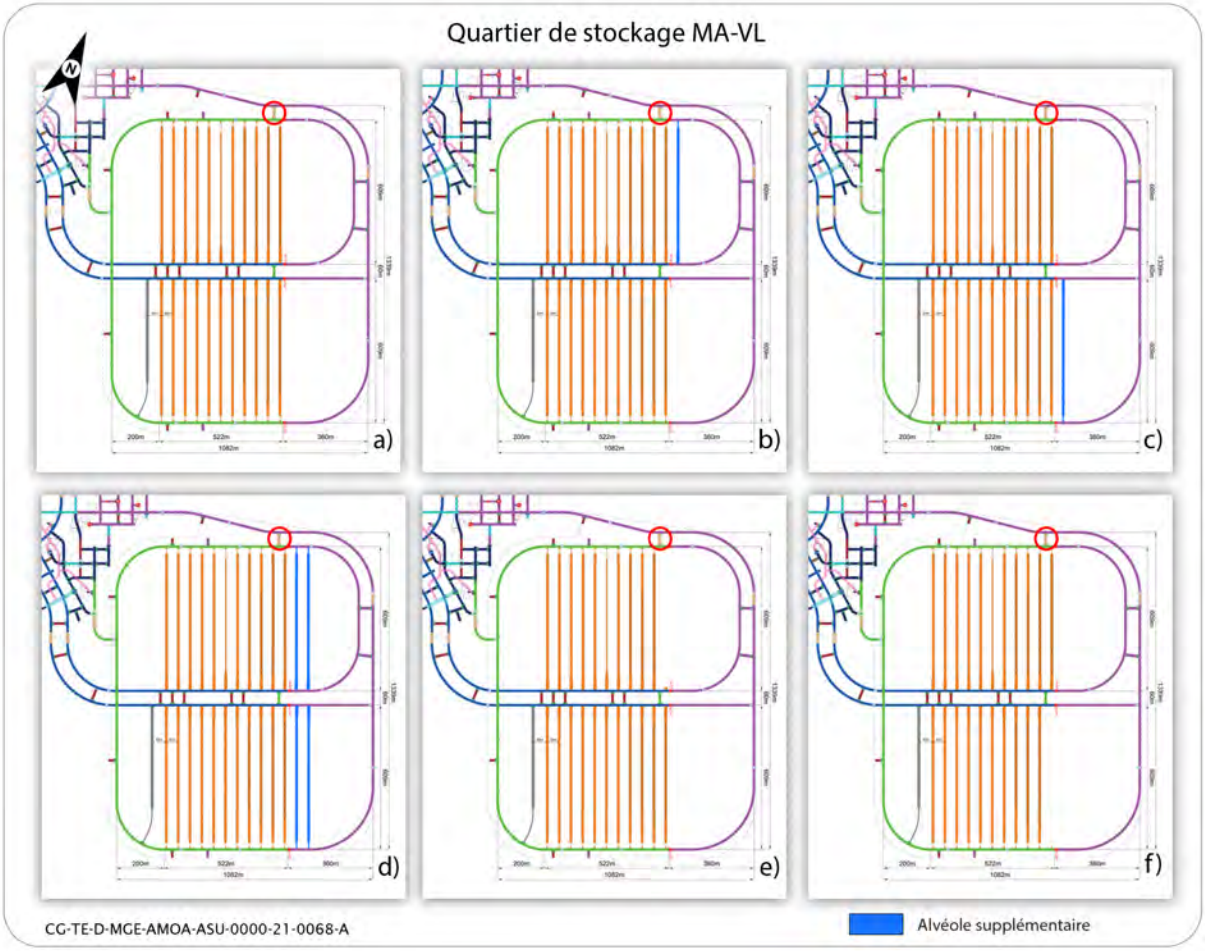


Figure 11-12 *Illustration de différentes configurations d'architecture de quartier de stockage MA-VL entrant dans le cadre des études en lien avec la flexibilité. Le cercle rouge identifie la recoupe nord-est du quartier de stockage MA-VL.*

11.3.7.1 L'effet du positionnement des inventaires dans les alvéoles MA-VL sur le transfert des radionucléides par la voie ouvrage

Le quartier de stockage MA-VL étant positionné en amont hydraulique par rapport à la base des liaisons surface-fond, les débits molaires de radionucléides transitant par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond) sont directement influencés par la répartition des inventaires au sein des alvéoles MA-VL et plus particulièrement au sein des alvéoles les plus proches de la base des liaisons surface-fond (*via* la recoupe au nord-est du quartier : ouvrage cerclé de rouge sur la figure 11-12).

La suppression ou l'ajout d'alvéoles MA-VL se traduirait par une modification de l'architecture à terminaison illustrative et aux fins de la démonstration de sûreté de façon corollaire à une modification de la distribution des inventaires dans le quartier de stockage MA-VL. La démonstration ne s'appuyant que sur l'architecture à terminaison illustrative, les études relatives à la suppression ou à l'ajout d'alvéoles MA-VL ont conduit à s'appuyer sur une approche qualitative.

11.3.7.1.1 La diminution du nombre d'alvéoles de stockage MA-VL

a) Suppression d'alvéoles dans le demi-quartier de stockage MA-VL nord

Toutes choses étant égales par ailleurs, la suppression d'un ou de plusieurs alvéoles en fond de demi-quartier nord (cf. Configuration (e) de la figure 11-12) se traduit par un éloignement du barycentre de l'inventaire global du quartier de stockage MA-VL par rapport à la recoupe au nord-est du quartier et par conséquent à la base des liaisons surface-fond qui tend à réduire le débit molaire en sortie des liaisons surface-fond du fait de l'éloignement global du barycentre de l'inventaire du quartier de stockage MA-VL de la base des liaisons surface-fond.

b) Suppression d'alvéoles dans le demi-quartier de stockage MA-VL sud

La suppression d'alvéoles de stockage MA-VL dans le demi-quartier sud (cf. Configuration (f) de la figure 11-12) a l'effet inverse puisque cette suppression se traduit par un rapprochement du barycentre de l'inventaire global du quartier de stockage MA-VL de la base des liaisons surface-fond. L'effet est toutefois moins marqué que celui de la suppression d'alvéoles dans le demi-quartier nord dont les niveaux d'inventaires ont davantage d'influence sur les débits molaires de radionucléides transitant par les ouvrages que les autres alvéoles.

11.3.7.1.2 L'augmentation du nombre d'alvéoles de stockage MA-VL

a) Ajout d'alvéoles dans le demi-quartier de stockage MA-VL nord

Toutes choses étant égales par ailleurs, l'ajout d'un ou de plusieurs alvéoles en fond de demi-quartier nord (cf. Configuration (b) de la figure 11-12) se traduit par un rapprochement du barycentre de l'inventaire global du quartier de stockage MA-VL par rapport à la base des liaisons surface-fond qui tend à augmenter le débit molaire en sortie des liaisons surface-fond du fait du rapprochement global du barycentre de l'inventaire du quartier de stockage MA-VL de la base des liaisons surface-fond.

La construction de deux alvéoles supplémentaires dans le demi-quartier de stockage MA-VL nord associée à une redistribution pénalisante des inventaires caractérisée par un positionnement de ces inventaires au plus près de la recoupe située au nord-est du quartier, conduirait qualitativement à une augmentation maximale des débits molaires en sortie des liaisons surface-fond de l'ordre de quelques dizaines de pourcents au plus.

De telles augmentations des débits molaires en sortie des liaisons surface-fond, bien que surestimées demeurent limitées.

b) Ajout d'alvéoles dans le demi-quartier de stockage MA-VL sud

L'ajout d'alvéoles de stockage MA-VL dans le demi-quartier sud (cf. Configuration (c) de la figure 11-12) a l'effet inverse puisque cet ajout se traduit par un éloignement du barycentre de l'inventaire global du quartier de stockage MA-VL de la base des liaisons surface-fond. L'effet est toutefois moins marqué que celui de l'ajout d'alvéoles dans le demi-quartier nord dont les niveaux d'inventaires ont davantage d'influence sur les débits molaires de radionucléides transitant par les ouvrages que les autres alvéoles.

11.3.7.2 Le cas du scénario d'évolution normale

Dans le cadre d'un scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 11.4.3.3.1 du présent volume), rappelons que :

- le transfert des radionucléides est très majoritairement diffusif. Les débits molaires de radionucléides transitant par les liaisons surface-fond s'avèrent, suivant la situation considérée, de 2 à 6 ordres de grandeur inférieurs à ceux transitant par la couche du Callovo-Oxfordien et sont principalement issus du quartier de stockage MA-VL situé en amont hydraulique par rapport à la base des liaisons surface-fond. La position, au sein du quartier de stockage MA-VL, de l'inventaire

par rapport à la base de ces liaisons surface-fond influe donc sur les débits molaires transitant par les ouvrages mais est sans influence significative sur les débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien qui résultent très majoritairement de la diffusion des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien ;

- pour un inventaire donné, le flux de radionucléides arrivant aux toit et mur de la couche du Callovo-Oxfordien est proportionnel au rapport S/V, S et V étant respectivement la surface projetée en surface et le volume des quartiers de stockage. Ce rapport demeure inchangé avec l'ajout ou la suppression d'alvéoles de diamètre équivalent ;
- l'étalement, ou au contraire, la concentration d'un même inventaire sur une surface plus grande ou plus petite est de nature à influer sur les concentrations locales en radionucléides dans les plans horizontaux interceptant les toit et mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Toutefois, au-delà des toit et mur de la couche du Callovo-Oxfordien, les effets de diffusion et la dispersion dans des horizons poreux plus perméables conduisent à « lisser » les effets de compacité qui sont sans influence sur les concentrations en radionucléides aux exutoires.

En conséquence, pour un inventaire donné, dans le cadre du scénario d'évolution normale du stockage, l'ajout ou la suppression de quelques alvéoles du quartier de stockage MA-VL est sans influence sur les débits molaires de radionucléides au toit de la couche du Callovo-Oxfordien.

11.3.7.3 Le cas des scénarios de dysfonctionnement des scellements (SEA et *What-if*)

Dans le cadre d'un scénario SEA ou *What-if* de dysfonctionnement des scellements (cf. Chapitre 11.4.3.3.2 du présent volume), rappelons que :

- le transfert des radionucléides est majoritairement diffusif et les débits maximaux de radionucléides transitant par les liaisons surface-fond s'avèrent inférieurs d'un à plusieurs ordres de grandeur aux débits maximaux transitant par la couche du Callovo-Oxfordien, à l'exception des scénarios suivants tous basés sur les paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale :
  - ✓ le scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond ;
  - ✓ le scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements (liaisons surface-fond et galeries).

  Il s'agit de scénarios pour lesquels le débit molaire maximal de radionucléides transitant par la voie ouvrage est respectivement du même ordre de grandeur ou légèrement supérieur à celui transitant par la voie du Callovo-Oxfordien.

- la position, au sein du quartier de stockage MA-VL, de l'inventaire radiologique par rapport à la base de ces liaisons surface-fond, n'influe sur les débits molaires des radionucléides en sortie des ouvrages et sur les débits molaires au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, uniquement pour les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements précités. Dans le cadre de ces scénarios, l'influence sur ces débits molaires est toutefois très limitée (cf. Chapitre 11.3.7.1 du présent volume).

En conséquence, pour un inventaire donné, dans le cadre des scénarios d'évolution altérée et *What-if* de dysfonctionnement des scellements, l'ajout ou la suppression de quelques alvéoles dans le quartier de stockage MA-VL est sans influence significative sur les débits molaires de radionucléides en sortie des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien.

En synthèse

L'ajout ou la suppression, à inventaire radiologique constant, d'alvéoles dans le quartier de stockage MA-VL :

- est, dans le cadre du scénario d'évolution normale ainsi que dans le cadre des scénarios d'évolution altérée et *What-if* de dysfonctionnement des scellements basés sur les paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale, sans influence sur les débits molaires de radionucléides au toit de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- a, dans le cadre des scénarios d'évolution altérée et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements (liaisons surface-fond et galeries) ainsi que du scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond, basés sur les paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, une influence très limitée sur les débits molaires de radionucléides au toit de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 11.3.7.1 du présent volume).

11.4 Les enseignements tirés des études de sensibilité

11.4.1 La sensibilité relative aux paramètres de transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien

Deux études de sensibilité distinctes ont été menées sur deux paramètres clés (coefficient de diffusion effectif, coefficient de sorption) contrôlant le transfert diffusif des radionucléides selon la voie de transfert dominante par la couche du Callovo-Oxfordien, afin d'évaluer le poids respectif des incertitudes associées à chacun de ces deux paramètres. Partant de la situation de référence du scénario d'évolution normale, toutes choses égales par ailleurs :

- l'augmentation du coefficient de diffusion effectif (affectation des valeurs de la situation enveloppe) induit une augmentation significative du débit molaire des radionucléides aux limites de la couche du Callovo-Oxfordien, d'un facteur 2 à 3 pour les trois radionucléides mobiles et à vie longue (iode 129, chlore 36, sélénium 79), et plus importante pour des radionucléides dont la période radioactive est plus faible comme le carbone 14 ou le calcium 41 (radionucléides sensibles au temps de transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien) ;
- la diminution du coefficient de sorption (affectation des valeurs de la situation enveloppe) induit une augmentation significative du débit molaire aux limites de la couche du Callovo-Oxfordien pour certains radionucléides moyennement sorbés tels que le potassium 40 et le calcium 41, avec une légère modification de la hiérarchie des principaux radionucléides mobiles et à vie longue, le potassium 40 devenant prédominant sur le sélénium 79 ;

  Les résultats de chaque étude de sensibilité, sont « couverts » par ceux obtenus avec la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, qui, en plus de considérer les valeurs « conservatives » pour ces deux paramètres spécifiques, intègre notamment l'exigence d'une garde de Callovo-Oxfordien limitée à 50 mètres ;
- pour rappel, l'étude de sensibilité à la prise en compte d'une surpression interstitielle d'origine hydraulique est prospective (sans fondement physique) et consiste à retenir une valeur extrême de moteur hydraulique (combinant à la fois la perméabilité et le gradient de charge à leur valeur maximale respective).

  Les résultats indiquent une voie de transfert toujours dominée par le Callovo-Oxfordien et dont l'intensité est identique à celle ne considérant pas de surpression. En effet, cette surpression qui est de nature à augmenter le gradient hydraulique vertical ascendant laisse inchangé le débit molaire

de radionucléides parvenant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, et induit une augmentation du débit molaire maximal de radionucléides transitant par la voie ouvrage et sortant par les liaisons surface fond, limitée à un facteur compris entre 1,3 et 4 pour l'iode 129. Ainsi, pour les situations de référence et enveloppe du scénario d'évolution normale, la dominance de la voie de transfert des radionucléides par la couche du Callovo-Oxfordien est globalement conservée et l'influence sur les débits molaires des radionucléides aux exutoires demeure limitée.

11.4.2 La sensibilité relative à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL et aux éléments d'architecture et de conception

11.4.2.1 L'influence de la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL

Une étude de sensibilité visant à évaluer l'influence de plusieurs distributions de l'inventaire radiologique MA-VL dans les alvéoles et le quartier de stockage MA-VL (cf. Chapitre 11.3.1 du présent volume) a été menée. Cette étude permet de mesurer l'importance du choix consistant à retenir pour tous les scénarios étudiés (scénario d'évolution normale, scénario d'évolution altérée et *What-if*) une distribution de l'inventaire radiologique MA-VL « au plus près » de la base des liaisons surface-fond et ainsi conforter un tel choix vis-à-vis de la démonstration de sûreté. Les différentes distributions de l'inventaire radiologique MA-VL étudiées laissent inchangé le débit molaire de radionucléides parvenant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien. Pour tous les scénarios étudiés (situation enveloppe du scénario d'évolution normale et scénario d'évolution altérée et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements reposant sur les paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale), le débit molaire maximal des radionucléides selon la voie de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » reste supérieure d'au moins un ordre de grandeur à celui transitant par la voie ouvrage. Pour ces mêmes scénarios, le débit molaire maximal des radionucléides selon la voie ouvrage peut varier sur une plage d'au plus un ordre de grandeur selon les différentes distributions d'inventaire MA-VL étudiées. Pour des scénarios d'évolution altérée et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements reposant sur les paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, l'influence de la distribution de l'inventaire est moins marquée car les débits molaires selon la voie ouvrage sont plus importants dans ce cas.

Ces enseignements susmentionnés établis à partir d'études de sensibilité menées sur les radionucléides les plus mobiles (*i.e.* Car non sorbés dans la couche du Callovo-Oxfordien) et dont la décroissance radioactive est très faible (*i.e.* La période radioactive très élevée) tel que l'iode 129 sont transposables aux substances toxiques chimiques mobiles. Les radionucléides comme les substances toxiques chimiques caractérisés par des coefficients de sorption importants sont bien moins mobiles et n'atteignent pas les limites de la couche du Callovo-Oxfordien sur le million d'années.

11.4.2.2 L'influence des éléments d'architecture

Des éléments à la fois quantitatifs et qualitatifs présentés dans le cadre d'autres études de sensibilité (cf. Chapitres 11.3.2, 11.3.3, 11.3.4, 11.3.5, et 11.3.7 du présent volume) montrent une sensibilité limitée des indicateurs de performance, voire une insensibilité, à de nombreux paramètres de l'architecture de l'installation souterraine. En particulier :

- la diminution de la distance entre la base des liaisons surface-fond et les inventaires les plus importants du quartier de stockage MA-VL de 700 mètres à 500 mètres et jusqu'à 300 mètres, a pour conséquence une augmentation du débit molaire maximal de radionucléides transitant par les liaisons surface-fond limité à un facteur 3 pour tous les scénarios relevant des paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale. La voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste dominante et les débits molaires en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien restent inchangés. Pour les scénarios relevant des paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, l'augmentation du débit molaire maximal de radionucléides transitant par la voie ouvrage est plus limitée car le niveau des débits molaires selon cette voie de transfert est plus important ;

- l'influence, sur la voie de transfert par les ouvrages, d'une réduction d'un mètre du diamètre des galeries de liaison reste très faible et limitée à une augmentation d'au plus une dizaine de pourcents du débit molaire maximal de radionucléides transitant par la voie ouvrage et n'influe, ni sur la dominance du transfert des radionucléides par la couche du Callovo-Oxfordien, ni sur les débits molaires des radionucléides en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien ; il n'y a pas d'influence significative de la réduction du diamètre des galeries sur la cinétique de transfert par la voie ouvrage ;
- l'influence, sur la voie de transfert par les ouvrages, de l'ajout d'un puits de diamètre excavé « moyen » ou de manière équivalente, l'influence d'une augmentation d'environ 10 % du diamètre excavé de tous les puits reste très faible et limitée à une augmentation d'au plus une vingtaine de pourcents du débit molaire maximal de radionucléides transitant par la voie ouvrage et n'influe, ni sur la dominance du transfert des radionucléides par la couche du Callovo-Oxfordien, ni sur les débits molaires des radionucléides en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien ; Il n'y a pas d'influence significative de l'augmentation du diamètre des puits sur la cinétique de transfert par la voie ouvrage ;
- l'augmentation de la longueur des alvéoles de stockage MA-VL ou HA renforce la dominance de la voie de transfert des radionucléides par la couche du Callovo-Oxfordien mais n'influe pas de manière significative sur les débits molaires des radionucléides en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- l'ajout ou la suppression, à inventaire radiologique constant, d'alvéoles dans le quartier de stockage MA-VL :
  - ✓ est, dans le cadre du scénario d'évolution normale et des scénario d'évolution altérée et *What-if* basés sur les paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale, sans influence sur le débit molaire maximal de radionucléides en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ a, dans le cadre des scénarios d'évolution altérée et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements basés sur les paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, une influence très limitée sur le débit molaire de radionucléides en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien.

Ainsi, les études de sensibilité à différents paramètres de l'architecture souterraine du fonctionnement du stockage durant la phase après-fermeture montrent que des évolutions de l'architecture souterraine, entrant notamment dans le cadre des études en lien avec la flexibilité telle que définie à ce stade, mais qui peuvent également être envisagées durant la phase très progressive de construction de l'installation au-delà du périmètre de cette flexibilité, sont compatibles avec un fonctionnement du stockage, conforme à l'attendu. Les études de sensibilité réalisées ne laissent pas envisager de perte de la dominance de la voie de transfert des radionucléides par la couche du Callovo-Oxfordien, ni d'influence significative sur les débits molaires des radionucléides aux exutoires.

Ces enseignements susmentionnés établis à partir d'études de sensibilité menées sur les radionucléides les plus mobiles (*i.e.* Car non sorbés dans la couche du Callovo-Oxfordien) et dont la décroissance radioactive est très faible (*i.e.* La période radioactive très élevée) tel que l'iode 129 sont transposables aux substances toxiques chimiques mobiles. Les radionucléides comme les substances toxiques chimiques caractérisés par des coefficients de sorption importants sont bien moins mobiles et n'atteignent pas les limites de la couche du Callovo-Oxfordien sur le million d'années.

11.4.3 Les grands déterminants pilotant les indicateurs de sûreté en après fermeture

11.4.3.1 Les grands principes de conception de l'architecture souterraine qui tirent parti au mieux des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien

Le transfert des solutés (radionucléides, substances toxiques chimiques) est piloté par la combinatoire entre des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien et des choix de conception de l'architecture souterraine qui en tirent parti.

Les travaux sur la performance et la sûreté du stockage en après fermeture menés depuis plus de 25 ans, évalués régulièrement à chaque grand jalon de développement du centre de stockage Cigéo, fournissent un retour d'expériences sur les grands déterminants du transfert des solutés, qui sont :

- les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien (et des formations encaissantes de l'Oxfordien et du Dogger), qui présentent intrinsèquement des caractéristiques favorables vis-à-vis des faibles écoulements d'eau et du transfert lent et limité des solutés :
  - ✓ la (très) faible perméabilité à l'eau du Callovo-Oxfordien (quelques 10^{-14} à 10^{-13} m.s^{-1}), le faible gradient de charge hydraulique vertical au sein du Callovo-Oxfordien (de quelques 1/100e à quelques 1/10e de m.m^{-1}, selon l'évolution géodynamique considérée et/ou la prise en compte de la surpression hydraulique naturelle), et les faibles gradients de charge horizontaux dans l'encaissant supérieur (quelques 1/1000e de m.m^{-1}) contribuent à limiter le transfert des solutés dans la couche du Callovo-Oxfordien et dans les ouvrages souterrains ;
  - ✓ des capacités de rétention élevées de la couche du Callovo-Oxfordien pour la très grande majorité des solutés, en particulier les actinides et les lanthanides, qui permettent leur atténuation totale à l'échelle de la couche du Callovo-Oxfordien. L'absence de rétention pour quelques radionucléides à vie longue comme l'iode 129, le chlore 36 ou le sélénium 79 est néanmoins compensée par une faible diffusion de pores des solutés dans le Callovo-Oxfordien. À l'échelle de la couche du Callovo-Oxfordien, la diffusion est le mécanisme dominant du transfert des solutés, avec des temps de transfert d'un soluté sans rétention en moyenne de l'ordre de 700 000 ans à 800 000 ans pour une implantation de stockage « réaliste »[111] au sein de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- des principes de conception de l'architecture à terminaison de l'installation souterraine qui permettent de maîtriser les éventuelles perturbations induites par la présence du stockage, et de tirer au mieux parti des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien, en limitant :
  - ✓ l'influence des perturbations physico-chimiques sur le transfert des solutés (notamment pendant les grands transitoires thermiques, thermo-hydromécanique et hydraulique-gaz), grâce à la séparation de plusieurs centaines de mètres entre les quartiers de stockage HA et le quartier de stockage MA-VL et de plusieurs dizaines de mètres entre les alvéoles de déchets MA-VL potentiellement interagissant entre eux : cette séparation limite *de facto* les perturbations physico-chimiques entre quartiers (alvéoles) et des quartiers de stockage HA et MA-VL, et accroît la maitrise des processus au sein du stockage, en particulier les écoulements d'eau et donc le transfert des solutés (exemple de l'indépendance thermique des quartiers de stockage HA et MA-VL ou des règles de co-stockage physico-chimiques) ;
  - ✓ les écoulements et le transfert des solutés dans les ouvrages souterrains, grâce à :
    - un stockage globalement borgne : la borgnitude mobilise ainsi des flux d'eau circulant dans le stockage qui proviennent de la couche du Callovo-Oxfordien, donc des flux d'eau (très) faibles, et limite ainsi le transfert convectif de solutés dans les ouvrages souterrains ;
    - un regroupement de la base des liaisons surface-fond, qui limite les effets de drain hydraulique par les galeries de stockage ;

[111] Notion définie en note de bas de page du chapitre 5.2.1 du présent volume, prenant en compte la cote verticale d'implantation de l'architecture illustrative dans la couche du Callovo-Oxfordien (relativement proche en moyenne du milieu de la couche du Callovo-Oxfordien).

- des alvéoles de grande longueur, limitant les écoulements en fond d'alvéole et favorisant le transfert par diffusion depuis les alvéoles de stockage vers la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les positionnements respectifs des quartiers de stockage par rapport aux liaisons surface-fond (puits et descenderies) en aval hydraulique de la direction des écoulements dans l'Oxfordien carbonaté pour les quartiers de stockage HA et en amont hydraulique pour le quartier de stockage MA-VL ;
- les caractéristiques hydrauliques des ouvrages souterrains, en particulier les scellements, qui permettent « d'isoler hydrauliquement » les quartiers de stockage et le stockage en général de l'Oxfordien carbonaté, ce qui limite l'effet de drain hydraulique du stockage.

11.4.3.2 Les principaux éléments pilotant les écoulements d'eau et le transfert des solutés

La figure 11-13 illustre le « moteur hydraulique » des écoulements d'eau pilotant la voie de transfert convective au sein des ouvrages souterrains. La combinatoire entre les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien et les principes généraux de conception des ouvrages souterrains fait que l'écoulement de l'eau au sein du stockage provient de la couche du Callovo-Oxfordien.

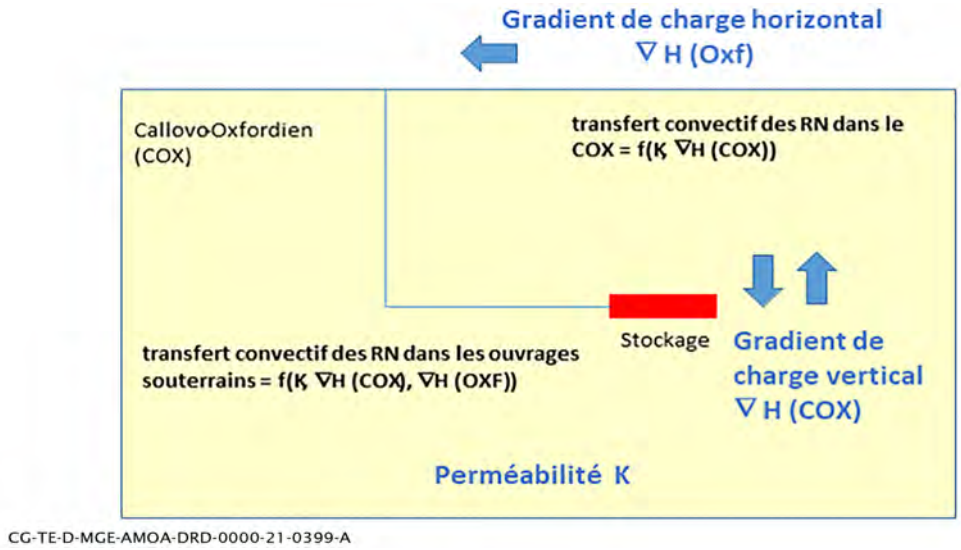
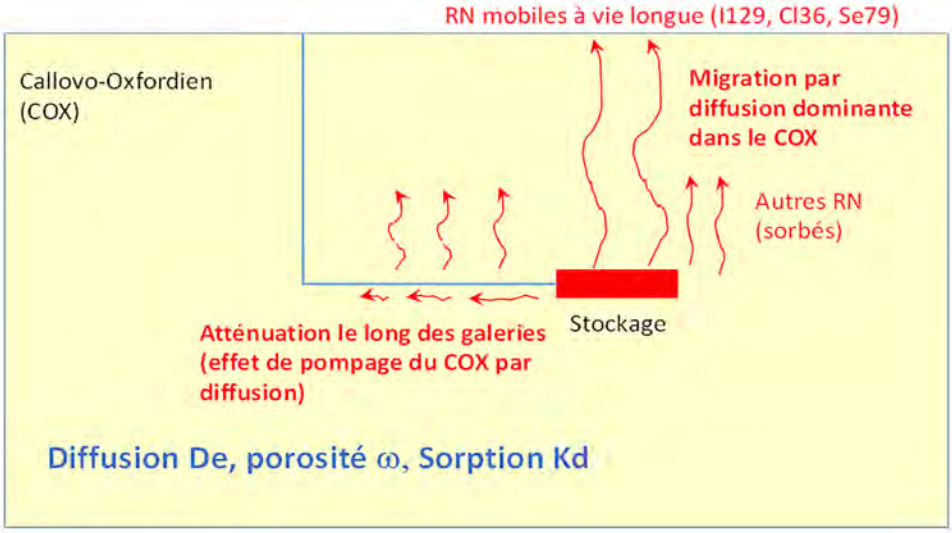


Figure 11-13 Illustration du moteur hydraulique au sein des ouvrages souterrains et de la couche du Callovo-Oxfordien

Les perméabilités des matériaux/composants ouvragés sont intrinsèquement toujours plus élevées que celle de la couche du Callovo-Oxfordien, de sorte que les ouvrages souterrains sont drainants. Toutefois, compte tenu de la très faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien et des faibles gradients de charge hydraulique, le flux d'eau drainé par le stockage et donc circulant en son sein est intrinsèquement (très) faible, même avec une surface de drainage du stockage très importante. Ceci conduit à limiter au 1er ordre le transfert des solutés par les ouvrages souterrains, avec une forte atténuation le long des alvéoles et galeries (illustrée sur la figure 11-14) et ainsi à favoriser le transfert par la couche du Callovo-Oxfordien.

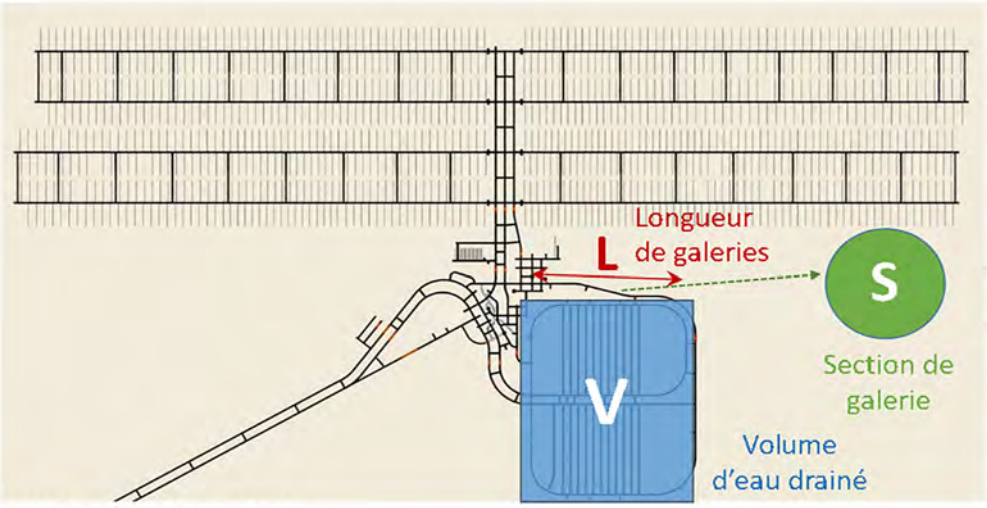


CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0400-A

Figure 11-14 *Illustration du transfert des solutés au sein des ouvrages souterrains et de la couche du Callovo-Oxfordien*

En lien avec les éléments indiqués ci-avant, le transfert des solutés au sein des ouvrages souterrains est piloté par les éléments de conception suivants, comme schématisés sur la figure 11-15 :

- la surface du stockage des ouvrages des quartiers *versus* le Callovo-Oxfordien, qui, conjuguée à la perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien et au faible gradient de charge hydraulique local entre le stockage et le Callovo-Oxfordien, pilotent le volume d'eau drainé V (relation de proportionnalité) et les échanges de masse entre les ouvrages et la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les diamètres des galeries (ou section S), qui, associés au flux d'eau drainé en « amont », pilotent la vitesse de transfert U des solutés au sein des galeries (rapport V/S) ;
- les longueurs de galeries L, qui, associées à la vitesse de transfert U des solutés, pilotent le temps de transfert depuis la sortie des quartiers de stockage jusqu'aux liaisons surface-fond.



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0401-A

Figure 11-15 *Fonctionnement hydraulique des quartiers de stockage pour la voie de transfert par les ouvrages sur l'architecture à terminaison illustrative*

11.4.3.3 Les éléments d'architecture et de conception pilotant les indicateurs de sûreté en après-fermeture

11.4.3.3.1 Dans le cadre du scénario d'évolution normale

En scénario d'évolution normale, l'efficacité des scellements conduit à une voie de transfert par les ouvrages de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle par la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 7.1 du présent volume) : d'au moins six ordres de grandeur en situation de référence (cf. Figure 6-6 du chapitre 6.2.1.3.1 du présent volume) du présent volume et deux ordres de grandeur en situation enveloppe comme illustré au chapitre 6 (cf. Figure 6-30 et figure 6-36 des chapitres 6.3.1.3.3 et 6.3.1.3.4 du présent volume, respectivement pour un stockage implanté à 50 mètres du toit ou du mur du Callovo-Oxfordien). Ceci est rendu possible de par les choix de conception de l'architecture (disposition groupée des liaisons surface-fond, borgnitude des quartiers de stockage, longueur des alvéoles de stockage) qui, associées aux propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien, permettent de limiter les flux d'eau, et conduisent à des temps de transfert de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions d'années au sein des ouvrages souterrains, avec une atténuation très forte des flux de solutés en sortie des liaisons surface-fond, assurant ainsi la dominance de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien.

En lien avec les éléments d'analyse indiqués ci-avant, et les travaux menés depuis plusieurs années, une analyse qualitative et quantitative préalable a été menée relative à l'influence des différents éléments d'architecture et de conception sur les indicateurs de sûreté en après fermeture. Il est ainsi établi que :

- les éléments de conception liés à la compacité du stockage (espacements entre alvéoles, diamètre et longueur de galeries, nombre de quartiers de stockage, positionnement des alvéoles et des inventaires, ajout/suppression d'alvéoles en lien avec le mode de conditionnement des colis…), ne conduisent pas à modifier la quantité d'eau drainée et le fonctionnement hydraulique du stockage, du fait des faibles flux d'eau mis en jeu, et ne sont donc pas influents sur :
  - ✓ les débits molaires de radionucléides au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, malgré des concentrations initiales directement proportionnelles à la compacité :
    - en effet, du fait d'un transfert par diffusion dominante, les forts gradients de concentration d'un stockage compact sont compensés par la plus faible surface où ils s'expriment. Le flux de radionucléides au toit de la couche du Callovo-Oxfordien est proportionnel au gradient de concentration entre le stockage et l'extrémité de la couche, et à la surface projetée des quartiers de stockage au toit de la formation hôte. La concentration au toit de la formation étant très inférieure à celle existant dans les alvéoles de stockage, le flux de concentration ainsi calculé est proportionnel au rapport (S/V), S et V étant respectivement la surface projetée et le volume des quartiers de stockage. Ce rapport (S/V) est quasiment constant d'une compacité à l'autre (proche de l'inverse de la hauteur équivalente des alvéoles de stockage). La quantité instantanée ou cumulée de radionucléides à vie longue sortant est donc indépendante de la compacité du stockage ;
  - ✓ les débits molaires des radionucléides aux exutoires ;
    - en effet, bien que la compacité soit influente sur les débits molaires des radionucléides aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien, les effets de diffusion dans l'argile ainsi que la dilution et la dispersion dans les horizons poreux plus perméables de l'Oxfordien conduisent à « lisser » les effets de compacité au bout d'un à deux kilomètres en aval des écoulements depuis le droit du centre de stockage Cigéo dans l'Oxfordien. Dans la mesure où les exutoires (naturels ou artificiels) sont positionnés bien au-delà d'un à deux kilomètres (cf. Chapitre 2 du présent volume), la compacité du stockage est sans influence sur les débits molaires des radionucléides aux exutoires ;
- le positionnement horizontal du stockage dans le Callovo-Oxfordien dans la ZIOS n'est pas influent sur les débits molaires de radionucléides au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Le transfert étant en diffusion dominante dans le Callovo-Oxfordien, une augmentation/diminution de la garde moyenne de Callovo-Oxfordien sain, *versus* la sensibilité au positionnement latéral du stockage, conduirait à diminuer/augmenter les débits molaires maximaux seulement de quelques pourcents ;

- le positionnement vertical du stockage dans la ZIOS, qui renvoie aux gardes inférieures et supérieures de Callovo-Oxfordien non endommagé de part et d'autre du stockage, est le seul paramètre influent sur les indicateurs de performance en après fermeture ;
- la variation du maximum de débit molaire de radionucléides au toit de la couche du Callovo-Oxfordien par rapport à la garde verticale supérieure de Callovo-Oxfordien non endommagé est directement proportionnelle au ratio du carré des épaisseurs de garde supérieure. En revanche, le maximum de débit molaire total (toit plus mur) sortant de la couche du Callovo-Oxfordien n'est pas sensible à la position verticale du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien.

11.4.3.3.2 Dans le cadre des scénarios d'évolution altérée et scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements

a) L'importance de la voie de transfert par les ouvrages en cas de dysfonctionnement des scellements

Le dysfonctionnement de tout ou partie de l'efficacité hydraulique des scellements conduit à mobiliser la voie de transfert par les ouvrages et à rendre potentiellement non négligeable cette voie par rapport à celle par la couche du Callovo-Oxfordien, voire co-dominante dans les cas « extrêmes » à savoir pour les scénarios *What-if* en situation enveloppe.

b) Le rôle des éléments d'architecture et de conception en cas de dysfonctionnement partiel ou total des scellements

Pour mémoire (cf. Chapitres 8.3.1 et 9.4.1 du présent volume), l'évaluation des scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement des scellements a permis d'illustrer les rôles respectifs de chaque groupe de scellements (efficaces), en regard du dysfonctionnement de l'autre groupe de scellements (par l'interface ou par le noyau et par l'interface).

c) La redondance entre le groupe de scellements des galeries et celui des liaisons surface-fond

Le traitement des scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement des scellements basés sur la situation de référence du SEN a permis d'illustrer la redondance des deux groupes de scellements (liaisons surface-fond, galeries) et la dominance de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien.

d) Le rôle du groupe de scellements de liaisons surface-fond

Le traitement des scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement des scellements basés sur la situation enveloppe du SEN a permis d'illustrer le rôle important des scellements des liaisons surface-fond, la performance hydraulique des scellements des liaisons surface-fond permettant d'assurer la redondance lorsque les scellements des galeries sont dysfonctionnants. Le dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface met en exergue le rôle important des choix de conception de l'architecture, en particulier sa borgnitude et le regroupement des liaisons surface-fond à leur base, et donc à la robustesse du stockage.

e) Le rôle de l'architecture de stockage

Du fait de conditions hydrauliques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien (faibles gradients de charge et perméabilités), associée à des choix de conception limitant les écoulements au sein du stockage (borgnitude des quartiers de stockage, regroupement des liaisons surface-fond à leur base, longueur hectométrique des alvéoles…), seules des faibles proportions de la quantité initiale de solutés mobiles parviennent au toit des liaisons surface-fond sur le million d'années.

Dans tous les cas, le transfert des solutés depuis les alvéoles vers les galeries reste limité en cas de dysfonctionnement des scellements. En effet, la longueur des alvéoles permet un échange de masse avec la couche du Callovo-Oxfordien et le transfert dans les galeries depuis les sorties d'alvéoles vers la zone centrale du stockage (comprenant la base des liaisons surface-fond) permet ensuite une atténuation et un retard des débits de solutés en sortie des liaisons surface-fond (au niveau du toit du Callovo-Oxfordien) sur les quelques centaines de mètres de transfert.

f) Analyse préalable des éléments d'architecture et de conception pilotant les indicateurs de sûreté en après fermeture

Une analyse qualitative et quantitative montre que :

- l'ajout ou la suppression d'alvéoles de stockage à inventaire radiologique total constant, étudiés dans le cadre des analyses en lien avec la flexibilité, ne conduit pas à modifier le fonctionnement de l'installation souterraine, vis-à-vis des conditions de transfert des solutés au sein des ouvrages, même en cas de défaut de scellement :
  - ✓ lorsque ces alvéoles sont situés :
    - en aval hydraulique des liaisons surface-fond, leur contribution radiologique est faible, les écoulements étant globalement orientés vers le fond des quartiers de stockage HA ;
    - en amont hydraulique des liaisons surface-fond (exemple du quartier de stockage MA-VL), la redistribution de l'inventaire radiologique MA-VL, couplée à cet ajout ou suppression d'alvéoles, ne modifie pas les flux de solutés en sortie aux toit et mur de la couche du Callovo-Oxfordien. Cette redistribution peut avoir une influence sur le flux de solutés à la sortie des liaisons surface-fond, mais elle devrait toutefois rester limitée. L'influence hydraulique liée à l'ajout ou à la suppression d'alvéoles est négligeable, dès lors que ces alvéoles sont éloignés de la base des liaisons surface-fond ;
- à inventaire radiologique identique, toutes choses égales par ailleurs pour le quartier de stockage MA-VL, (i) une diminution de l'entraxe entre alvéoles, et/ou (ii) une densité de colis plus importante dans le cadre des analyses en lien avec la flexibilité et/ou (iii) des longueurs de galerie réduites et/ou (iv) des sections de galerie réduites, peuvent globalement conduire à une voie de transfert plus importante par les ouvrages (volume d'eau drainé plus faible, longueur de transfert plus courte).

Conclusion

Les études de sensibilité menées autour des différents scénarios d'évolution du stockage dont les principaux enseignements ont été présentés aux chapitres précédents, permettent, en complément à ces scénarios, d'appréhender le fonctionnement et le niveau de robustesse du système de stockage. Il s'agit d'études de sensibilité relatives d'une part, à certaines propriétés du milieu géologique vis-à-vis de la migration des radionucléides selon les voies de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien et par les ouvrages, et d'autre part, au remplissage des alvéoles MA-VL et aux caractéristiques de certains composants de l'architecture souterraine. On notera ainsi que :

- l'étude de sensibilité aux coefficients de diffusion et de sorption de la couche du Callovo-Oxfordien a permis de confirmer toute l'importance de ces paramètres en cohérence avec les enseignements de l'évaluation du SEN à savoir que la couche du Callovo-Oxfordien constitue la voie de transfert dominante ;
- l'étude de sensibilité à un gradient hydraulique ascendant vertical plus important que celui pris en compte dans le SEN et censé représenter l'effet d'une surpression interstitielle d'origine hydraulique montre qu'une augmentation de ce gradient jusqu'à 0,5 $m.m^{-1}$ se traduit par une augmentation des débits molaires des radionucléides transitant par la voie ouvrage et sortant par les liaisons surface-fond significative mais qui reste limitée au regard des débits molaires transitant par la couche du Callovo-Oxfordien. Cette voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie dominante ;
- l'étude de sensibilité à la répartition de l'inventaire dans les différentes alvéoles MA-VL met en lumière une influence significative de la distance entre les principaux inventaires et la base des liaisons surface-fond sur les débits molaires de radionucléides transitant par la voie ouvrage. Cette influence, bien qu'importante n'est pas de nature à remettre en cause la dominance de la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien pour le scénario d'évolution normale et est sans impact significatif sur les débits molaires aux exutoires pour tous les autres scénarios, qu'il s'agisse des scénarios d'évolution altérée ou des scénarios *What-if* ;
- les études de sensibilité à différents paramètres de l'architecture souterraine montrent une sensibilité limitée des indicateurs de performance, voire une insensibilité, à de nombreux paramètres de l'architecture de l'installation souterraine tels que :
  - ✓ la distance entre la base des liaisons surface-fond et les inventaires les plus importants du quartier de stockage MA-VL ;
  - ✓ la réduction du diamètre des galeries de liaison ;
  - ✓ l'ajout d'un puits de diamètre excavé « moyen » ou de manière équivalente, l'influence d'une augmentation d'environ 10 % du diamètre excavé de tous les puits ;
  - ✓ l'augmentation de la longueur des alvéoles de stockage MA-VL ou HA ;
  - ✓ l'ajout ou la suppression, à inventaire radiologique constant, d'alvéoles dans le quartier de stockage MA-VL.

Ainsi, les études de sensibilité à l'architecture (longueur, diamètre, nombre d'alvéoles) réalisées confirment la prédominance de la voie de transfert des radionucléides par la couche du Callovo-Oxfordien compte tenu de ses caractéristiques favorables, et des principes directeurs retenus pour l'architecture (structuration générale planaire (cf. « Dossier de justification des choix d'architecture » (35)) ainsi que le peu d'influence sur les débits molaires des radionucléides aux exutoires. Ces résultats montrent la flexibilité de l'architecture à des évolutions de conception (cf. Volume 11 du présent rapport).

Ces enseignements établis à partir d'études de sensibilité menées sur les radionucléides les plus mobiles (*i.e.* Car non sorbés dans la couche du Callovo-Oxfordien) et dont la décroissance radioactive est très faible (*i.e.* La période radioactive très élevée) tel que l'iode 129 sont transposables aux substances toxiques chimiques mobiles.

12

Les enseignements de la démonstration de sûreté après-fermeture

12.1 Une démarche fondée sur des exigences règlementaires de haut niveau et sur des pratiques de référence à l'international 710
12.2 Une démarche d'évaluation de sûreté qui repose sur des scénarios contrastés permettant d'évaluer le fonctionnement prévu du stockage ainsi que la robustesse de l'évaluation de sûreté face aux incertitudes résiduelles 711
12.3 Des résultats qui confirment la maîtrise du comportement des radionucléides au regard des objectifs de protection 712
12.4 Des composants et des dispositions de conception pour la protection à long terme 715
12.5 Des dispositions de surveillance mises en place dès la construction initiale en vue de la protection après-fermeture et à long terme 723

12.1 Une démarche fondée sur des exigences règlementaires de haut niveau et sur des pratiques de référence à l'international

La démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture s'appuie sur les textes réglementaires nationaux et standards internationaux en lien avec la sûreté, et plus particulièrement le guide de sûreté n° 1 relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (1). Cette démarche a été éprouvée et enrichie depuis plus de 30 ans au travers des nombreuses boucles d'itérations entre les avancées dans la connaissance, dans la conception et les études de sûreté. Les résultats de ces itérations se sont concrétisés par de nombreux dossiers remis par l'Andra et évalués par l'ASN, ainsi que par des revues d'experts internationales et des revues d'experts mandatées par des parties prenantes.

L'évaluation de la sûreté après fermeture vise à s'assurer que le système de stockage (milieu naturel, en particulier la couche argileuse hôte du Callovo-Oxfordien, les composants ouvragés du stockage, en particulier les colis de déchets, les scellements, et l'architecture du stockage) garantit la protection de l'homme et de l'environnement après fermeture et à long terme. Pour cela, un ensemble d'indicateurs de performance (comme, par exemple le débit molaire relâché par les colis, les ouvrages de stockage, la couche du Callovo-Oxfordien) est évalué et l'impact radiologique sous la forme d'une dose annuelle totale à laquelle pourrait être exposée une personne du public est calculé. L'évaluation vise également à s'assurer de l'absence d'impact des substances toxiques chimiques présentes dans les déchets.

Une démarche qui est à la fois qualitative et quantitative et qui repose sur des arguments croisés et la quantifications d'indicateurs de performance et d'incidence sur la santé humaine. La démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture renvoie ainsi :

- au fondement du stockage géologique profond, comme notamment la quantité de radionucléides et de substances toxiques chimiques contenus dans les déchets, qui est restée confinée dans le stockage, dans son champ proche ou dans la couche du Callovo-Oxfordien, à un million d'année ;
- à l'incidence sur la santé humaine, comme la dose radiologique annuelle totale à laquelle pourrait être exposée une personne. Cette dose s'apprécie au regard de la valeur repère de 0,25 $mSv.an^{-1}$ retenue par l'Autorité de sûreté nucléaire comme indicateur pour l'évolution normale du système de stockage en après fermeture, elle-même correspondant à une fraction de la limite de dose annuelle pour une personne du public du fait d'installations d'activités nucléaires qui est de 1 $mSv.an^{-1}$ (Cette valeur est à comparer à l'exposition moyenne hors radioactivité et médical qui est de 0,06 $mSv.an^{-1}$ en France et à l'exposition moyenne d'une personne résidant en France aux rayonnements ionisants qui est de 4,5 $mSv.an^{-1}$).

12.2 Une démarche d'évaluation de sûreté qui repose sur des scénarios contrastés permettant d'évaluer le fonctionnement prévu du stockage ainsi que la robustesse de l'évaluation de sûreté face aux incertitudes résiduelles

La démarche d'évaluation de sûreté après fermeture définitive de l'installation de stockage se fonde :

- sur la connaissance et l'analyse du comportement dans le temps des composants du système de stockage ainsi que des processus, événements et phénomènes qui se déroulent sur toutes les phases de vie du stockage ;
- sur un ensemble de scénarios d'évolution dont la quantification à l'aide d'indicateurs définis permet de vérifier le bon fonctionnement et la robustesse du stockage, et ainsi que l'objectif fondamental de protection de la santé des personnes et de l'environnement est respecté.

Sur la base de la connaissance scientifique et technologique acquise à chaque étape, différents scénarios sont définis pour être quantifiés et apporter des éléments d'appréciation de la performance du système de stockage, de sa robustesse vis-à-vis des incertitudes résiduelles et du respect des objectifs de protection. Ce sont :

- un scénario d'évolution normale qui vise à évaluer la performance attendue du système de stockage tel que conçu et les incidences résiduelles sur la santé de l'homme en après fermeture ;
- des situations ou des scénarios destinés à montrer la robustesse du système de stockage en intégrant des incertitudes résiduelles ou des dysfonctionnements postulés (de manière conventionnelle (« arbitraire ») et pénalisante) de composants et vérifier que la sûreté à long terme après fermeture est toujours maîtrisée.

Le scénario d'évolution normale est défini en s'appuyant sur la connaissance scientifique et technologique acquise à date. En cohérence avec le guide n° 1 de l'ASN, ce scénario est représenté par une situation de référence comprenant les événements les plus probables et se fondant sur le meilleur état des connaissances scientifique et technologique disponible issu de recherches menées depuis plus de 25 ans. De manière prudente, cette situation de référence intègre néanmoins des représentations conservatives, comme par exemple (i) la considération d'un état saturé en eau des ouvrages dès la fermeture de l'installation souterraine sans prendre en compte le transitoire de resaturation de ces ouvrages qui peut durer quelques milliers d'années du fait de la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien, et (ii) une représentation des exutoires par pompage visant à capter de manière conservative, la totalité du flux de solutés arrivant dans la zone et non la quantité et la concentration locale autour du pompage.

Une autre situation et d'autres scénarios sont définis afin de démontrer la robustesse de la démonstration de sûreté après fermeture vis-à-vis de la conception du stockage et des incertitudes de connaissances résiduelles :

- une situation « enveloppe » qui repose sur les exigences applicables (comme, par exemple l'exigence de 50 mètres de Callovo-Oxfordien sain (*e.g.* Non mécaniquement endommagé au pourtour des ouvrages souterrains) de part et d'autre du stockage) et qui cumule des valeurs de paramètres et hypothèses conservatives, notamment pour la couche du Callovo-Oxfordien.

Cette représentation majore le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'aux exutoires puis à l'homme. Elle constitue par ce choix d'hypothèses et de données conservatives, la limite du domaine d'évolution normale du système de stockage et de son environnement. Elle conduit par cette définition à une borne supérieure de l'impact cumulé des incertitudes résiduelles de connaissance en évolution normale ;

- des scénarios de déviation de l'évolution normale, que l'on qualifie de scénarios d'évolution altérée (SEA), de scénarios « *What-if* », ou de scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI).

  Ces scénarios visent à tester la robustesse du système de stockage à une perte ou une dégradation d'une fonction de sûreté fondamentale de ce dernier, même si cette perte ou dégradation est considérée comme peu ou très peu vraisemblable. Il s'agit par exemple de la défaillance postulée de tous les colis ou de tous les scellements ou encore d'une intrusion humaine involontaire dans le stockage par un forage en cas d'oubli de l'existence de ce dernier sur le long terme.

L'évaluation de sûreté, objet du présent rapport, traite l'ensemble des scénarios indiqués ci-dessus, en incluant des demandes de l'ASN et de son appui technique l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) faites lors de l'instruction du dossier d'options de sûreté (cf. Volume 2 du présent rapport). Elle permet de tester en profondeur la robustesse de la sûreté après fermeture du stockage, en particulier au travers de la combinatoire de conservatismes, par exemple sur les valeurs des paramètres de migration des radionucléides, ou le choix postulé de situation/scénario, comme la défaillance de tous les scellements par le noyau et l'interface qui conduit à favoriser le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques par la voie de l'installation souterraine (*e.g.* Voie ouvrage) ou la présence d'une discontinuité dans la couche du Callovo-Oxfordien qui n'aurait pas été détectée.

Les résultats de l'évaluation de sûreté après fermeture confirment la capacité du système de stockage à garantir la sûreté sur le long terme notamment par la maîtrise du comportement des radionucléides au regard des objectifs de protection. Des grands traits de cette atteinte des objectifs de sûreté sont résumés comme suit.

12.3 Des résultats qui confirment la maîtrise du comportement des radionucléides au regard des objectifs de protection

12.3.1 Les résultats des évaluations de la situation de référence de l'évolution normale de l'installation de stockage soulignant des incidences très faibles

L'évaluation de la situation de référence de l'évolution normale dont les résultats sont présentés au chapitre 6 du présent volume et synthétisés au chapitre 7 du présent volume, met ainsi en exergue le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien du fait de ses caractéristiques favorables et de l'apport des dispositions de conception de l'installation souterraine. Ces dispositions tirent parti des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien (comme par exemple des alvéoles de grande longueur qui favorisent le transfert par la roche hôte, épaisseur de garde saine de la couche du Callovo-Oxfordien supérieure à 50 mètres) et en les préservant (comme par exemple en limitant la température maximale dans la roche hôte en deçà de 100 °C autour des quartiers de déchets exothermiques, comme les déchets vitrifiés de haute activité) les dispositions d'architecture et de conception favorisent le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques par la couche du Callovo-Oxfordien.

Ceci se traduit par les grands traits suivants :

- la quasi-totalité des 144 radionucléides est confinée dans le stockage ou en son champ proche sur le long terme ;
- seuls les radionucléides à vie longue mobiles (*e.g.* Solubles et sans rétention, l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79) migrent depuis le stockage au sein de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à ses extrémités, les ouvrages de stockage ne constituant pas une voie de transfert privilégiée.

  Leur transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien par diffusion dominante est néanmoins lent et limité, les temps de transfert de ces radionucléides étant de l'ordre de 700 000 ans.

  Ces radionucléides à vie longue, mobile ou peu sorbés, parviennent aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien, mais avec des débits molaires et en quantité très faibles dans le temps. À titre d'exemple, à un million d'années, au plus de l'ordre de 20 % de l'inventaire initial en iode 129 parvient aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien.

  Seuls ces trois radionucléides mobiles à vie longue parviennent donc aux exutoires sur le million d'années, mais *de facto* de manière lente et très atténuée.

En termes d'indicateur de dose à l'homme, la dose maximale atteinte, après plus de 600 000 ans, est de l'ordre de 0,0015 $mSv.an^{-1}$, donc très inférieure à la valeur de référence de 0,25 $mSv.an^{-1}$ citée dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1).

S'agissant des substances toxiques chimiques, leur migration est également très atténuée et seules les quelques substances mobiles comme le sélénium parviennent aux exutoires. Les concentrations maximales obtenues sont très inférieures aux normes réglementaires de qualité environnementale (NQE).

Les évaluations réalisées sur la base des meilleures connaissances disponibles confirment donc la bonne performance du système de stockage et des incidences sanitaires très inférieures aux valeurs de références fixées par le guide de sûreté n° 1 de l'ASN.

12.3.2 Les résultats des évaluations des autres situations et scénarios soulignant la robustesse du stockage

12.3.2.1 Les résultats de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale

La situation enveloppe du scénario d'évolution normale, dont les résultats sont présentés au chapitre 6 du présent volume et synthétisés au chapitre 7 du présent volume, constitue, du fait des cumuls de conservatismes sur toute la chaîne de transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'à l'homme, une estimation quantifiée majorante des expositions individuelles permettant de couvrir de façon enveloppe les incertitudes résiduelles de connaissances.

Toutefois, même en considérant de telles hypothèses, la couche du Callovo-Oxfordien, cette dernière continue de jouer un rôle central, renforcé par la conception du stockage précitée, et le système de stockage continue de garantir la sûreté, comme souligné par les grands traits suivants :

- la grande majorité des radionucléides restent toujours confinés dans les ouvrages de stockage ou dans le Callovo-Oxfordien en champ proche de ces ouvrages ;
- les quelques radionucléides qui migrent depuis le stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien sont globalement identiques à ceux de la situation de référence (l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79). Leur migration se fait toujours par diffusion dominante ; les temps de transfert jusqu'aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien sont néanmoins plus courts que pour la situation de référence, de l'ordre de 100 000 ans à 200 000 ans, mais les débits molaires dans le temps restent faibles et à un million d'années, la fraction de la quantité initiale de ces radionucléides qui est sortie de la couche du Callovo-Oxfordien reste limitée (au plus de l'ordre de 40 % au toit ou au mur de la couche du Callovo-Oxfordien) ;

- s'agissant des substances toxiques chimiques, seules les substances mobiles, principalement le sélénium et le bore parviennent aux exutoires, leurs concentrations maximales aux exutoires sont très inférieures aux normes réglementaires de qualité environnementale (NQE).

La situation d'évolution normale enveloppe, qui constitue une estimation conservative des impacts en situation d'évolution normale du stockage confirme la robustesse du système de stockage face aux incertitudes résiduelles de connaissance. Les incidences sur la santé des personnes restent très inférieures à la valeur de référence du guide de sûreté n° 1 de l'ASN dans la majorité des exutoires et biosphères étudiés, même en cumulant les conservatismes afin de majorer les transferts des radionucléides et substances toxiques chimiques vers la biosphère. Elles sont de l'ordre de grandeur de cette valeur pour un des exutoires « Pompage dans l'Oxfordien » (pour une classe d'âge dans le cas d'une biosphère chaude).

12.3.2.2 Les résultats des scénarios de déviation de l'évolution normale du système de stockage

La démonstration de la robustesse du système de stockage est renforcée par les résultats des scénarios de déviation de l'évolution normale du système de stockage et de son environnement, ce d'autant que ces scénarios ont traité les deux situations notamment la situation enveloppe fondée sur les caractéristiques (enveloppes) de la couche du Callovo-Oxfordien :

- des scénarios de dysfonctionnement des scellements des ouvrages ;
- des scénarios de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA ;
- des scénarios d'intrusion humaine involontaires après perte de connaissance de l'existence de l'installation ;
- un scénario postulant une discontinuité non détectée dans le Callovo-Oxfordien.

Les résultats des évaluations de ces scénarios soulignent encore le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien, même avec des caractéristiques enveloppes, renforcé par la conception du stockage précitée (en particulier la modularité du stockage ou les longueurs de galeries depuis les alvéoles jusqu'aux liaisons surface-fond). Ces résultats sont pour l'essentiel similaires à ceux du scénario d'évolution normale, en termes de performances de confinement et d'incidences sanitaires sur l'homme aux exutoires des principaux radionucléides contributeurs à la dose.

Ainsi à titre d'exemple illustratif, on notera les éléments suivants :

- en cas de dysfonctionnement des scellements par l'interface (SEA) ou par le noyau et par l'interface (*What-if*), la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie prépondérante de migration des substances radioactives dans la plupart des cas.

  La faible perméabilité du Callovo-Oxfordien limite *de facto* les flux d'eau dans le stockage. Ces flux ne constituent donc pas un vecteur de transfert des radionucléides très important, de sorte que les longueurs de galerie de quelques centaines de mètres depuis les alvéoles jusqu'aux liaisons surface-fond permettent une atténuation de la quantité de radionucléides qui migrent dans les galeries, par effet de transfert vers le Callovo-Oxfordien. À cela, s'ajoute pour les colis de déchets HA, le positionnement du quartier de stockage HA en aval hydraulique des écoulements dans l'Oxfordien carbonaté par rapport aux liaisons surface-fond qui accentue la limitation des flux d'eau dans les galeries vers les liaisons surface-fond et l'effet de transfert des radionucléides par diffusion depuis les galeries vers le Callovo-Oxfordien.

  Seul le cas « extrême » du scénario *What-if* postulant le dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et l'interface conduit à une voie de transfert co-dominante entre celle par le Callovo-Oxfordien et celle par les ouvrages ; cette codominance est néanmoins à relativiser dans la mesure où son occurrence intervient pendant le transitoire hydraulique gaz et que les évaluations de sureté sont menées de manière enveloppe en conditions saturées dès le début de la fermeture définitive ;
- en cas de perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA, celle-ci entrainerait un relâchement prématuré des radionucléides et des substances toxiques chimiques. Toutefois, le

Callovo-Oxfordien permet de toujours limiter la migration des radionucléides. La perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA se traduit uniquement par une date d'occurrence des débits molaires maximaux des radionucléides mobiles à vie longue aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien légèrement avancée par rapport à celle du scénario d'évolution normale, mais ces débits molaires maximaux restent similaires à ceux du scénario d'évolution normale. Ainsi *in fine*, la quantité de radionucléides mobiles à vie longue arrivant aux exutoires sur le prochain million d'années et les incidences en termes d'exposition humaine sont similaires à celles du scénario d'évolution normale ;

- une éventuelle discontinuité qui n'aurait pas été détectée pourrait constituer une voie de transfert préférentielle pour les radionucléides mobilisables. Cependant du fait de la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien, et considérant une conductivité hydraulique représentative de matériaux argileux remaniés, l'influence de la discontinuité dans le stockage resterait très limitée, à la fois en termes d'hydraulique et de transfert des solutés. Ainsi, la quasi-totalité des radionucléides contenus dans le stockage ne « verrait » pas la discontinuité ; l'impact sanitaire sur l'homme resterait uniquement lié aux quelques radionucléides mobiles à vie longue comme pour les autres scénarios et resterait très inférieur aux objectifs de protection fixés par le guide n° 1 de l'ASN.
- pour les mêmes raisons que celles indiquées pour une éventuelle discontinuité, les intrusions humaines involontaires, même pour le cas le plus pénalisant correspondant à un forage de grande profondeur atteignant l'installation de stockage puis abandonné, ont un impact inférieur aux objectifs de protection fixés par le guide de sûreté n° 1 de l'ASN.

L'ensemble des résultats des évaluations quantitatives confirment la robustesse du sytème de stockage face aux incertitudes résiduelles de connaissance.

12.4 Des composants et des dispositions de conception pour la protection à long terme

La notion de composant important pour la protection (CIP) est utilisée pour des composants (naturel ou ouvragé) du système de stockage qui jouent un rôle important vis-à-vis de l'accomplissement de l'objectif fondamental de protection de l'homme et de l'environnement. Cela entend les composants qui accomplissent et/ou contribuent à la réalisation des fonctions fondamentales de sûreté après fermeture et à long terme et de manière passive. De par les échelles de temps concernées, et du caractère passif du système de stockage sans surveillance au-delà d'une certaine période en après fermeture, le terme d'EIP n'a pas été retenu pour l'après-fermeture et le terme de CIP a été retenu pour relier aux composants naturel et ouvragés.

Ces composants importants pour la protection sont la couche du Callovo-Oxfordien, le pilier de la sûreté après-fermeture, et des composants ouvragés conçus pour tirer parti des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien. À ces composants s'ajoutent des dispositions de conception contribuant à la sûreté à long terme du stockage.

La liste de ces composants et/ou dispositions repose sur l'ensemble des éléments de la démonstration de sûreté après fermeture exposée dans le présent volume en particulier sur les enseignements issus des résultats des évaluations quantitatives de l'ensemble des scénarios de sûreté et des études de sensibilité associées. L'approche reconduit celle retenue pour le « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (2).

12.4.1 La couche du Callovo-Oxfordien – le pilier de la sûreté après fermeture

Par ses caractéristiques géométriques et physico-chimiques intrinsèques (profondeur au-delà de 300 mètres, épaisseur supérieure à 140 mètres, faible perméabilité, capacité de rétention élevée, faibles coefficients de diffusion…), la formation du Callovo-Oxfordien dans laquelle est implantée l'INB Cigéo est le composant central pour assurer la sûreté ***passive*** après fermeture et à très long terme.

À cela s'ajoutent les caractéristiques géologiques favorables du site d'implantation : sa localisation dans une zone géologique d'activité sismique très faible et dont l'évolution géodynamique interne est limitée sur le million d'années, l'absence de discontinuités majeures, des faibles gradients hydrauliques verticaux dans le Callovo-Oxfordien, l'absence de ressources exceptionnelles.

Elle contribue de par ses caractéristiques favorables à la réalisation des deux fonctions de sûreté fondamentales pour le long terme après fermeture :

- isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines banales ;
- limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère.

Les travaux de reconnaissance depuis la surface et dans le Laboratoire souterrain sur le milieu géologique d'implantation de l'installation souterraine, en particulier la couche du Callovo-Oxfordien, ont permis de déterminer ses caractéristiques intrinsèques et de vérifier qu'elles sont favorables à un stockage géologique de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue.

La couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle sont implantées les zones de stockage répond ainsi aux critères techniques de site du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1).

12.4.1.1 La profondeur de la couche du Callovo-Oxfordien

La profondeur de la couche du Callovo-Oxfordien (au-delà de 300 mètres), et des ouvrages de stockage à environ 500 mètres, protègent le système de stockage des phénomènes de surface (estimés de l'ordre de 200 mètres dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1)) ou d'une intrusion humaine involontaire qualifiée de « banale[112] ». L'absence de ressource exceptionnelle du site d'implantation permet également de limiter les intrusions humaines.

Par ailleurs, le caractère « asismique » du Bassin parisien et l'évolution géodynamique interne limitée et homogène au niveau du site d'implantation de l'INB sur le prochain million d'années protègent de l'effet d'un séisme.

12.4.1.2 Les caractéristiques intrinsèques de la couche du Callovo-Oxfordien

Les caractéristiques intrinsèques de la couche du Callovo-0xfordien permettent de limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets

De par sa très faible perméabilité et les faibles gradients hydrauliques, la couche du Callovo-Oxfordien limite les circulations d'eau, vecteur potentiel de dégradation des colis et de migration des radionucléides et substances toxiques chimiques relâchées par ces colis de déchets, au sein du stockage et au sein de la couche elle-même.

En effet, de faibles circulations d'eau associées aux caractéristiques géométriques et physico-chimiques de la couche du Callovo-Oxfordien (épaisseur importante, chimie de l'eau réductrice, capacité de rétention élevée…) sont favorables :

- à la limitation de la dégradation des colis stockés. En particulier, cela contribue à la limitation du relâchement des radionucléides et toxiques chimiques des déchets HA vitrifiés ;

[112] En général, ce sont des chantiers de faible profondeur comme, par exemple des chantiers routiers.

- au maintien de la plupart des radionucléides et substances toxiques chimiques relâchés par les colis de déchets dans les ouvrages souterrains ou en champ proche des ouvrages de stockage sur le long terme ;
- à un transfert lent par diffusion et privilégié des radionucléides et des toxiques chimiques potentiellement relâchés par les colis de déchets par la couche du Callovo-Oxfordien, démontrant ainsi son rôle central.

Les résultats de l'évaluation du scénario d'évolution normale soulignent ainsi le rôle majeur de la couche du Callovo-Oxfordien dans la sûreté à long terme. La couche du Callovo-Oxfordien, pour laquelle on dispose d'un socle de connaissances très important issu de plus de 25 ans d'études et de recherches, permet de garantir :

- le confinement de la grande majorité des radionucléides dans le stockage ou en son champ proche, du fait de ses caractéristiques favorables (épaisseur de garde saine de la couche du Callovo-Oxfordien d'au moins 50 mètres, forte capacité de rétention, transfert lent par diffusion dominante, faible solubilité des radionucléides) ;
- la limitation du transfert des quelques radionucléides qui peuvent migrer depuis le stockage, ceux mobiles à vie longue (chlore 36, iode 129 et sélénium 79), en quantités (très) faibles et pour des échelles de temps de plusieurs centaines de milliers d'années.

12.4.1.3 Des dispositions de conception préservant les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien

Des dispositions de conception sont retenues pour préserver les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien. Ce sont notamment :

- l'orientation des alvéoles de stockage et des galeries devant recevoir un scellement, selon la contrainte horizontale majeure. Cette disposition limite l'extension verticale de l'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien à leur pourtour (*e.g.* Champ proche) et préserve ainsi au maximum des épaisseurs de garde de Callovo-Oxfordien sain (*e.g.* Non endommagé) de part et d'autre du stockage ;
- la limitation des vides dans les alvéoles de stockage, qui concourt à limiter une éventuelle extension de la zone endommagée de Callovo-Oxfordien à leur pourtour sur le long terme ;
- la limitation des températures (inférieures à 100 °C) dans la couche du Callovo-Oxfordien pour les déchets exothermiques, en particulier le quartier de stockage HA. Il s'agit d'éviter un endommagement mécanique d'origine thermique et thermohydromécanique, et des transformations minéralogiques significatives, et limiter *de facto* les processus de migration des radionucléides et substances toxiques (la température étant un facteur intrinsèque d'accroissement de ces processus, comme la solubilité, la rétention, la diffusion ou la convection) ;
- le choix de scellements « passant au gaz » qui limitent la pression de gaz dans le stockage et empêche une fracturation au gaz du Callovo-Oxfordien en grand ;
- le choix de matériaux de composants ouvragés compatibles avec les caractéristiques du Callovo-Oxfordien afin de limiter les interactions physico-chimiques, en tant que nécessaire. Il s'agit notamment du choix d'argile pour les noyaux des scellements, *de facto* en équilibre avec les argilites du Callovo-Oxfordien.

  Par ailleurs, la couche du Callovo-Oxfordien présente de par ses caractéristiques, un fort pouvoir tampon intrinsèque des perturbations chimiques, comme par exemple la perturbation alcaline (contact avec des matériaux et/ou des eaux cimentaires) ou la perturbation fer/argile, de sorte que ces perturbations restent limitées en champ proche du stockage et contribuent à garantir une préservation des propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien.

12.4.2 Des composants ouvragés conçus pour tirer parti des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien

Si la couche du Callovo-Oxfordien joue un rôle central dans la sûreté passive à long terme après fermeture du stockage, des composants ouvragés sont conçus pour tirer parti de ses caractéristiques favorables. Ils contribuent également à assurer le bon fonctionnement du système de stockage, en jouant un rôle complémentaire au Callovo-Oxfordien. Ce sont :

- les scellements qui contribuent à la réalisation de la fonction de sûreté « *S'opposer à la circulation de l'eau* » et ainsi à « Limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère » ;
- les colis de déchets vitrifiés HA qui contribuent à la fonction de sûreté « *Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans les alvéoles de stockage* ».

Ces composants contribuent au bon fonctionnement et à la robustesse du système de stockage en limitant le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et/ou leur migration hors des alvéoles, en particulier selon la voie de transfert par les ouvrages.

12.4.2.1 Des scellements qui s'opposent à la circulation d'eau par les ouvrages souterrains

Associés à la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien et aux faibles gradients hydrauliques au sein de cette couche, les scellements contribuent à limiter les flux d'eau dans le stockage en particulier des alvéoles et quartiers de stockage vers les liaisons surface-fond. Leur localisation au sein du stockage leur confère des rôles différenciés :

- de par leur position en sortie des ouvrages de stockage, les scellements des liaisons surface-fond jouent le rôle le plus important parmi l'ensemble des scellements en contribuant à limiter les flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations sus-jacentes ;
- les scellements des liaisons surface-fond tirent parti de l'absence de zone endommagée connectée (comme celle observée dans l'unité litho-stratigraphique dite argileuse (UA) où sont implantés les alvéoles et les galeries) dans l'unité litho-stratigraphique dite silto-carbonatée (USC) située au toit du Callovo- Oxfordien, pouvant constituer une zone de perméabilité élevée. La mise en place d'un noyau à base d'argile gonflante de faible perméabilité dans l'USC au contact direct de la couche du Callovo-Oxfordien (avec le retrait total des revêtements-soutènements) permet ainsi de concevoir des scellements dont la perméabilité globale à saturation est faible (à ce stade de l'ordre de 10^{-11} m.s^{-1}) et compatible avec la capacité à laisser passer le gaz ;
- les scellements dans les galeries augmentent leur résistance hydraulique et contribuent à de faibles vitesses d'écoulement d'eau dans l'installation. En cas de perte de la fonction hydraulique des scellements des liaisons surface-fond, les scellements dans les galeries contribuent à limiter les flux d'eau et les flux de radionucléides et substances toxiques chimiques transportés le long des galeries.

12.4.2.2 Des colis de déchets vitrifiés HA empêchant puis limitant le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques

Bien que son rôle soit plus limité au regard de ceux du Callovo-Oxfordien et des scellements, le conteneur de stockage HA contribue à empêcher le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques des colis de déchets HA vitrifiés.

L'Andra conçoit un conteneur de stockage HA (en tenant compte des incertitudes scientifiques, des limites technologiques et des facteurs économiques) pour lui conférer la plus grande durée possible d'étanchéité de manière à ne mobiliser les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien qu'après que l'activité radiologique contenue dans les déchets ait suffisamment décru. ». Ainsi, son rôle est limité

dans le temps (de l'ordre de quelques centaines d'années), en contribuant notamment à mobiliser les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien uniquement dans des conditions de température maîtrisées.

L'Andra retient à ce stade une étanchéité à l'eau du conteneur de stockage des déchets HA vitrifiés *a minima* tant que la température à cœur du verre est supérieure à 50 °C pour les déchets vitrifiés du quartier pilote HA et à 70 °C pour les déchets vitrifiés du quartier de stockage HA, afin de contribuer à favoriser une dissolution lente des verres et ainsi à limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques dans le temps.

Ce choix correspond par ailleurs à des niveaux de température pour lesquels le comportement des radionucléides et substances toxiques chimiques dans l'alvéole et le Callovo-Oxfordien est maitrisé. En outre, les effets de ces niveaux de température sur ce comportement, en particulier la migration (rétention, diffusion…) sont (très) limités.

12.4.3 Des dispositions de conception contribuant à la sûreté à long terme du stockage

À ce stade, des dispositions de conception, notamment en matière d'architecture souterraine, contribuent à la sûreté à long terme après fermeture. Ce sont :

- un regroupement des puits et de la base des descenderies dans une même zone restreinte ;
- une longueur importante des alvéoles qui favorise la voie de transfert privilégiée par le Callovo-Oxfordien ;
- une longueur des galeries depuis les alvéoles jusqu'aux liaisons surface fond qui favorise la voie de transfert privilégiée par le Callovo-Oxfordien ;
- un stockage plan qui favorise des épaisseurs de gardes importantes de la couche du Callovo-Oxfordien, *a minima* de 50 mètres de part et d'autre des ouvrages de stockage ;
- une architecture souterraine à terminaison avec des quartiers de stockage borgnes qui contribue à limiter les écoulements dans le stockage en mobilisant préférentiellement les faibles écoulements dans le Callovo-Oxfordien.

Ces dispositions visent à favoriser la durabilité des colis de déchets et à privilégier la voie de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques potentiellement relâchés des colis de stockage par le Callovo-Oxfordien.

12.4.3.1 Le regroupement des puits et de la base des descenderies dans une même zone restreinte

Le regroupement des puits et de la base des descenderies dans une même zone d'emprise restreinte contribue à limiter les circulations d'eau au sein du stockage, en particulier entre les différentes liaisons surface-fond. Cette disposition favorise la mobilisation de la faible perméabilité et des (très) faibles gradients hydrauliques verticaux dans la couche du Callovo-Oxfordien, donc des flux d'eau (très) faibles.

Dans ce contexte général, la localisation du quartier de stockage HA globalement en aval hydraulique des puits et de la base des descenderies par rapport au sens des écoulements dans l'Oxfordien calcaire contribuent aussi à limiter les écoulements d'eau et donc la migration de radionucléides et substances toxiques chimiques, depuis ces quartiers vers les puits et les descenderies.

12.4.3.2 Des longueurs significatives des alvéoles de stockage et des galeries depuis les alvéoles jusqu'aux liaisons surface-fond

Associées aux (très) faibles flux d'eau circulant dans le stockage, les longueurs :

- des alvéoles de stockage, d'ordre pluri-décamétriques pour les alvéoles de stockage HA et de plusieurs centaines de mètres pour les alvéoles MA-VL, tout en respectant l'exigence de préservation d'une garde minimale de 50 mètres du Callovo-Oxfordien ;
- des galeries depuis les alvéoles jusqu'aux liaisons surface-fond, de plusieurs centaines de mètres ;
- favorisent le transfert privilégié des radionucléides et substances toxiques chimiques depuis les alvéoles de stockage ou les galeries vers la couche du Callovo-Oxfordien.

Ainsi, pour ceux qui sortent néanmoins des alvéoles de stockage vers les galeries, plus particulièrement en cas de scénario de dysfonctionnement des scellements, les longueurs des quartiers de stockage et des galeries vers les liaisons surface-fond favorisent un transfert privilégié vers le Callovo-Oxfordien et contribuent à limiter les flux de radionucléides et substances toxiques chimiques qui arriveraient au niveau des liaisons surface-fond par les ouvrages du stockage.

12.4.3.3 La structure générale planaire du stockage et les dimensions verticales des ouvrages de stockage aussi limitées que nécessaire

Cette disposition permet de préserver des épaisseurs importantes de couche du Callovo-Oxfordien entre le stockage et les formations encaissantes (Oxfordien calcaire et Dogger), favorables à la limitation du transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques, en termes de temps de transfert depuis le stockage jusqu'aux extrémités de la couche et de quantité de radionucléides et substances toxiques chimiques qui migrent ainsi.

12.4.3.4 Le caractère borgne des quartiers de stockage HA et MA-VL

Cette disposition d'architecture contribue à limiter les flux d'eau dans le stockage en mobilisant les faibles flux d'eau circulant dans la couche du Callovo-Oxfordien, notamment en cas de dysfonctionnement de tous les scellements.

Le caractère borgne des quartiers de stockage conduit à (i) favoriser une dégradation faible et lente des colis de déchets, (ii) privilégier pour les radionucléides et substances toxiques chimiques la voie de transfert (lente) par la couche du Callovo-Oxfordien, et (iii) limiter le transfert de ceux-ci *via* les ouvrages (galeries et liaisons surface-fond).

12.4.4 Les fonctions et leur correspondance avec les principaux composants du système de stockage

Le tableau 12-1 synthétise les fonctions de sûreté après fermeture et leur correspondance avec les principaux composants du système de stockage et les caractéristiques associées.

Tableau 12-1 Tableau de correspondance : fonctions de sûreté après fermeture/composants du système de stockage

Composants du système de stockage		Formation hôte	Architecture			Scellements		Composants ouvragés HA				Composants ouvragés MA-VL		
										Alvéole HA			Alvéole MA-VL	
Fonctions de sûreté après fermeture		Callovo-Oxfordien	Liaisons surface-fond	Quartiers	Galeries remblayées	Scellements LSF	Scellements fond	Colis primaire HA	Conteneur de stockage HA	MREA	Partie utile de l'alvéole	Colis primaire MA-VL	Partie utile de l'alvéole	Revêtements/ Soutènements (cimentaires)
Isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines														
		(1)												
Limiter le transfert jusqu'à la biosphère des radionucléides (RN) et des substances toxiques chimiques (TC)														
Laisser passer les gaz					(23)	(10)	(10)							
S'opposer à la circulation de l'eau		(2)	(6)	(7) (8)		(11)	(12) (25)							
Limiter le relâchement des RN et TC et les immobiliser dans les alvéoles	**Protéger les déchets de l'eau**								(14)	(15)				
	Limiter la mobilité des RN et TC dans l'alvéole	(3)						(13)			(16)	(17)	(16)	(16)
Retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques relâchés hors des alvéoles		(4) (5)		(9)							(18)		(18)	(4) (19)
Préserver les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés impliqués dans la réalisation des fonctions de sûreté après-fermeture														
Préserver les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien			(21)	(8) (20) (22)	(21)						(20), (21) (26)		(20), (21) (26)	
Préserver les caractéristiques favorables des composants ouvragés impliqués dans la réalisation des fonctions de sûreté après-fermeture				(24)	(24)		(25)			(15)	(24)		(24)	(24)

(1) Profondeur, géodynamique faible, et homogène
(2)Très faible perméabilité et gradients hydrauliques verticaux faibles
(3) Chimie des eaux du Callovo-Oxfordien
(4) Capacité de rétention
(5) Transfert dominant par diffusion et épaisseur associée
(6) Regroupement des liaisons surface-fond
(7) Quartier(s) borgne(s)
(8) Distance entre quartiers exothermiques isolés des autres quartiers
(9) Architecture « planaire » des quartiers
(10) Nature et densité du noyau argileux
(11) Noyau argileux et absence de ZFC
(12) Noyau argileux et ZFC cicatrisée
(13) Verre nucléaire
(14) Etanchéité à l'eau
(15) Tampon des fluides acides provenant du Callovo-Oxfordien oxydé
(16) Environnement chimique alcalin
(17) Matrice selon les familles de déchets MA-VL
(18) Longueur des alvéoles et des galeries permettant un transfert vers le Callovo-Oxfordien
(19) Épaisseur et nature du matériau cimentaire
(20) Dimensionnement THM
(21) Limitation des vides résiduels (remblayage…)
(22) Co-stockage physico-chimique des familles de déchets MA-VL
(23) Nature et densité du matériau de remblayage
(24) Limitation de la quantité d'acier
(25) Orientation des galeries devant recevoir un scellement

(26) Choix de matériaux des composants ouvragés compatibles avec les caractéristiques du Callovo-Oxfordien afin de limiter les interactions physico-chimiques

12.5 Des dispositions de surveillance mises en place dès la construction initiale en vue de la protection après-fermeture et à long terme

12.5.1 La stratégie retenue

Comme indiqué dans les chapitres ci-avant, les composants importants du système de stockage assurent leur fonction dès la phase après fermeture et sur le long terme sans nécessité d'intervention humaine (« sûreté passive »).

La stratégie de surveillance retenue par l'Andra (65) intègre cet objectif à terme et prévoit la mise en œuvre d'activités de contrôle et de surveillance de composants et paramètres dès la phase de construction initiale puis les phases temporelles ultérieures. Ces activités visent à vérifier qu'au moment où les ouvrages souterrains sont remblayés et scellés, d'une part l'état initial du stockage dès le début de la fermeture intègre l'installation souterraine telle que construite avec le retour d'expérience de son exploitation et d'autre part le bon comportement des différents composants naturel (cas de la couche du Callovo-Oxfordien) et ouvragés (cas de colis de déchets radioactifs par exemple) pendant ces phases.

La stratégie de surveillance vis-à-vis de la sûreté après fermeture retenue répond ainsi aux objectifs suivants :

- vérifier que les éventuelles perturbations en particulier sur la couche de Callovo-Oxfordien liées à la construction de l'INB Cigéo n'impactent pas les fonctions fondamentales de sûreté après fermeture et que ses propriétés restent dans le domaine autorisé[113] ;
- s'assurer et vérifier que l'installation, construite et exploitée conformément aux plans (spécifications et mesures d'assurance de la qualité) fonctionne conformément aux exigences de protection de l'homme, de l'environnement et de sûreté nucléaire. Il s'agit ainsi de :
  - ✓ vérifier que les principales hypothèses prises pour évaluer la sûreté après fermeture restent bien dans la gamme de valeurs de la connaissance scientifique et technologique utilisées ;
  - ✓ vérifier que les ouvrages construits évoluent tels que prévus suite à leur recette au regard de leurs fonctions de sûreté après-fermeture et de la récupérabilité des colis ;
  - ✓ vérifier le maintien des conditions d'environnement en souterrain pilotant les processus thermique, hydraulique, gaz, mécanique, chimique, biologique et radiologique (THGMCBR) ;
  - ✓ identifier les dérives éventuelles de ces processus des ouvrages souterrains pouvant impacter les fonctions de sûreté après-fermeture et la capacité de récupérabilité des colis de déchets ;
  - ✓ conforter les modèles d'évolution de ces processus intervenant dans les ouvrages souterrains retenus dans l'évaluation de sûreté après fermeture ;
  - ✓ mettre à jour si nécessaire les modèles et paramètres de l'évaluation de sûreté après fermeture ;
- au travers des retours d'expérience au fur et à mesure du développement progressif, apporter l'ensemble des éléments permettant de :
  - ✓ réduire les incertitudes retenues dans l'évaluation de la sûreté après fermeture de l'installation (on tend vers une installation construite en lieu et place d'une installation conçue) ;
  - ✓ participer à l'optimisation des solutions technologiques qui seront *in fine* retenues pour la fermeture de l'installation souterraine (cas des scellements par exemple) ;

[113] Le domaine autorisé sera défini à l'issue de l'autorisation de création (*via* la publication du décret et les prescriptions techniques de l'ASN en particulier).

- ✓ supporter les futures décisions à chaque étape clé y compris pour faire évoluer la conception (synthèse de la phase industrielle pilote, réexamens de sûreté, construction d'une nouvelle tranche, mise en place d'un scellement, etc.).

Afin de répondre à ces objectifs, les dispositions techniques pour la surveillance répondent aux principes directeurs suivants :

- conception de l'installation nucléaire favorisant sa mise en œuvre. Elle permet ainsi d'accéder au comportement global des ouvrages souterrains et de l'installation souterraine en général avec :
  - ✓ des choix de conception visant la minimisation des phénomènes pouvant intervenir dans l'évolution du stockage afin d'en faciliter leur compréhension et leur modélisation ;
    - choix de matériaux connus et dont le comportement est connu (acier noir, béton...) ;
    - conception de l'architecture souterraine permettant par exemple la séparation des zones de stockage pour assurer une « indépendance » du comportement phénoménologique (35) ;
  - ✓ la mise en place privilégiée d'une surveillance déportée avec la réalisation d'ouvrage témoins ;
  - ✓ le choix de suivre les colis de stockage de déchets radioactifs de manière indirecte au travers de la surveillance de leurs conditions d'environnement ;
  - ✓ la surveillance de sections d'ouvrages ou de parties de composants représentatives d'un fonctionnement plus général ;
  - ✓ la mise en place d'une gestion des données adaptée aux spécificités du comportement des ouvrages souterrains et de stockage (cinétiques des processus relevant de la sûreté en après fermeture, durée d'ordre séculaire de la phase de fonctionnement de l'installation souterraine, etc.) ;
- définition de l'état initial des formations géologiques et plus particulièrement le Callovo-Oxfordien ainsi que de celui des composants ouvragés afin de permettre le suivi de leur évolution et ce, en particulier, dès la construction des ouvrages souterrains pendant la phase de construction initiale et lors des phases ultérieures de déploiement ;
- vérification de la sûreté de l'installation telle que réalisée. Ceci se traduit par une adaptation des modalités de surveillance aux risques de fonctionnement de l'installation avec :
  - ✓ la prise en compte des « bonnes pratiques » mises en place dans des contextes similaires (installation nucléaire de base, etc.). Ceci se traduit par la favorisation de modalités de surveillance simples, éprouvées et durables ;
  - ✓ la mise en place d'une surveillance permettant d'avoir la meilleure représentativité des processus suivis au regard des fonctions de sûreté après-fermeture et de récupérabilité ;
  - ✓ la limitation de dispositifs de surveillance intrusifs pour préserver les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien vis-à-vis de la sûreté après-fermeture.
- privilégier des dispositifs simples, c'est-à-dire dont la technologie peut être considérée comme validée et largement éprouvée industriellement en termes de mesure, de fonctionnement et de durabilité acquis dans un contexte industriel surface ou fond, nucléaire ou conventionnel, et prenant en compte les adaptations au contexte de l'INB Cigéo (environnement du souterrain, durées du fonctionnement, etc.) auquel ils sont destinés (miniaturisation, durabilité, résistance aux conditions d'environnement, etc.) :
  - ✓ certains dispositifs de mesure/capteurs ont été directement mis en œuvre dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne car disponibles sur le marché et déjà adaptés aux besoins de l'Andra ;
  - ✓ d'autres ont été modifiés en portant une attention particulière à la technologie, la robustesse, la répétabilité, la résolution et la complémentarité recherchées entre les capteurs ;
  - ✓ d'autres ont été développés spécifiquement dans une logique de prospective/innovation ;
- support au développement progressif de l'installation en permettant d'acquérir un retour d'expérience sur son fonctionnement et le cas échéant sa conception :
  - ✓ en particulier par la mise en place de la phase industrielle pilote au cours de laquelle la surveillance de l'installation souterraine au regard de ses spécificités participe aux éléments

techniques qui sont fournis au Parlement pour qu'il puisse fonder sa décision sur la poursuite ou non du projet à l'horizon 2040-2050 ;

- ✓ par une optimisation continue des modalités de surveillance qui s'appuie sur le maintien d'un développement scientifique et technologique et facilitée par le développement progressif des ouvrages souterrains par tranches successives.

12.5.2 Le déploiement de la surveillance

12.5.2.1 L'établissement d'un état initial

Une attention particulière est portée à la couche de Callovo-Oxfordien, composant central du système de stockage après fermeture et à long terme. Le programme de reconnaissance déployé depuis plus d'une vingtaine d'année notamment au sein de la ZIOS, permet d'avoir une connaissance approfondie et robuste sur les plans sédimentologique, structural, hydrogéologique, géomécanique et géochimique de ses caractéristiques physico-chimiques valorisées dans la démonstration de sûreté (25).

Par la suite, pendant la construction initiale et afin de pouvoir mettre en œuvre la surveillance des perturbations éventuelles apportées par le stockage sur la couche de Callovo-Oxfordien et pouvant l'impacter dès cette phase, permettant de définir son « état initial » avant toute identification de perturbation puis le suivi de son évolution, l'Andra prévoit de réaliser la campagne, dite « ZBS », composée de forages permettant de caractériser les propriétés hydrodispersives des argilites du Callovo-Oxfordien en pourtour de la zone d'implantation des zones de stockage (66).

Lors du creusement des ouvrages de liaison surface-fond, l'état initial du Callovo-Oxfordien support à sa surveillance pendant la phase de fonctionnement est conforté dans le cadre de la reconnaissance à l'avancement puis tout au long du déploiement de l'installation souterraine.

Pour ce qui concerne plus particulièrement les colis de stockage HA :

- le socle de connaissances des colis primaires constitue une base solide pour établir l'état initial. Celui-ci sera conforté au moment de la livraison sur l'INB Cigéo après la mise en œuvre du processus d'acception selon les étapes suivantes (cf. volume 3 du présent rapport): l'approbation de la famille de colis, l'accord de sa prise en charge, l'accord de livraison et l'acceptation, L'acceptation[114] d'un colis, étape finale du processus d'acceptation (est délivrée lorsque l'ensemble des contrôles systématiques et, le cas échéant, hors flux ont été réalisés.
- des opérations de contrôles sont menées sur la fabrication des conteneurs en usine avant livraison (cf. Volume 3 du présent rapport) puis des contrôles lors des opérations de fermeture du colis de stockage HA (exemple après soudure du couvercle et du corps de conteneur) au sein du bâtiment nucléaire de surface EP1 (cf. volume 5 du présent rapport).

Concernant les scellements, l'état initial est établi à l'issue de leur recettage au moment des opérations de fermeture selon un processus normalisé de type IVVQ. Cette recette correspond à une vérification que la réalisation du composant est conforme aux exigences qui lui sont spécifiées, qu'elles soient relatives à ses matériaux, sa conception ou son fonctionnement. Cette recette peut être assujettie à un contrôle de qualité à l'issue de sa fabrication.

12.5.2.2 Les activités de surveillance

Lors du creusement des ouvrages souterrains en particulier des descenderies et des puits, les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien support à sa surveillance sont confortés dans le cadre de la reconnaissance à l'avancement pendant ces opérations de creusement. La surveillance du comportement de la couche du Callovo-Oxfordien est initiée en particulier pour vérifier que ses propriétés favorables sont préservées et que les perturbations en particulier mécaniques apportées par le creusement évoluent dans un domaine qui reste compatible avec l'épaisseur de garde saine retenue

[114] L'acceptation est l'acte par lequel l'exploitant matérialise son accord pour le stockage dans son installation d'un colis de déchets radioactifs donné.

dans l'évaluation de sûreté après fermeture et à long terme *(i.e.* Caractérisation de la zone endommagée par le creusement) (cf. Le « Dossier de justification des choix architecture souterraine (35)).

Pour ce qui concerne les alvéoles et colis de stockage HA vis-à-vis de la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage », les dispositions de surveillance permettent de vérifier les conditions d'ambiance de l'alvéole (température, hygrométrie et présence d'eau liquide, présence d'oxygène ou d'hydrogène), la composition chimique de l'eau liquide récupérée en tête d'alvéole, les déformations des chemisages et des colis et l'état de corrosion des conteneurs. Pour les alvéoles du quartier de stockage HA, les besoins de surveillance seront réexaminés notamment au regard du retour d'expérience qui aura été capitalisé sur l'exploitation et la surveillance des alvéoles HA du quartier pilote pendant la phase industrielle pilote (cf. Le « Dossier de justification de la conception de l'alvéole HA (47)).

Pour ce qui concerne les alvéoles de stockage MA VL vis-à-vis de la même fonction de sûreté, l'Andra identifie également le besoin de surveiller les conditions d'ambiance de l'alvéole ainsi que les déformations de l'alvéole et des colis (cf. Le « Dossier de justification de la conception de l'alvéole MA-VL (37)).

La surveillance mise en œuvre pendant la phase de surveillance de l'installation (cf. Pièce 13 « Évaluation économique et sociale des infrastructures de transport du projet global Cigéo (67)) comprend des dispositifs déjà mis en place avant la fermeture définitive et maintenus si besoin après la fermeture, et éventuellement des dispositifs complémentaires :

- tous les dispositifs de suivi après fermeture sont choisis de manière à préserver la couche du Callovo-Oxfordien afin qu'elle puisse jouer pleinement son rôle central et sans intervention vis-à-vis de la protection à long terme de l'homme et l'environnement ;
- plusieurs pistes sont à ce stade envisageables : techniques non intrusives en surface (géophysique…), mesures dans des forages instrumentés réalisés depuis la surface jusqu'à l'Oxfordien calcaire situé au-dessus de la couche du Callovo-Oxfordien.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1	Illustration du système de stockage après fermeture	19
Figure 1-2	Déclinaison de l'objectif fondamental de sûreté en fonctions de sûreté après-fermeture	23
Figure 1-3	Schéma illustrant l'approche itérative de la démarche d'évaluation de la sûreté après-fermeture	27
Figure 1-4	Représentation schématique des composants et voies de transfert potentielles prises en compte pour la description des scénarios	31
Figure 1-5	Illustration schématique des classes et nomenclatures des scénarios retenus pour l'évaluation de sûreté après fermeture	33
Figure 1-6	Illustration schématique de la déclinaison du scénario d'évolution normale (SEN) en situation de référence et en situation enveloppe	37
Figure 1-7	Illustration schématique de l'analyse des risques et incertitudes de connaissances scientifiques et technologiques et des modalités de leur gestion	46
Figure 1-8	Illustration schématique de l'apport de l'analyse des risques et incertitudes à la définition des scénarios après fermeture	48
Figure 1-9	Illustration schématique de l'établissement de la liste de scénarios à quantifier sur la base de l'analyse des risques et incertitudes	49
Figure 1-10	Schéma illustrant l'utilisation d'indicateurs autres que la dose en s'appuyant sur la période radioactive du radionucléide et son comportement en solution	50
Figure 1-11	Étapes de la démarche biosphère appliquée aux évaluations quantitatives	53
Figure 1-12	Schéma illustratif des transferts de solutés depuis un exutoire jusqu'à l'homme	55
Figure 1-13	Enchaînement des modèles en hydraulique et en transfert de solutés	57
Figure 1-14	Principe de l'architecture de calcul par compartiments emboîtés	59
Figure 1-15	Architecture de la plateforme Cassandra	61
Figure 1-16	Chaîne de calcul intégrant les différents outils de simulation utilisée pour les évaluations de performance et de sûreté en après fermeture	61
Figure 2-1	Illustration schématique des composants analysés en regard de leur contribution principale aux (sous)fonctions de sûreté après fermeture	66
Figure 2-2	Illustration schématique des composants analysés ne contribuant pas à la réalisation des fonctions de sûreté après fermeture mais constituant une voie de transfert potentielle	68
Figure 2-3	Localisation des exutoires retenus pour la situation de référence et pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale	172
Figure 3-1	Schéma illustratif du SEA de « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par l'interface »	187
Figure 3-2	Schéma illustratif du SEA de « Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface »	189
Figure 3-3	Schéma illustratif du SEA de « Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface »	191
Figure 3-4	Schéma illustratif du scénario What-if de « Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par le noyau argileux et par l'interface »	193

Figure 3-5	Schéma illustratif du scénario What-if de « Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface »	195
Figure 3-6	Schéma illustratif du scénario What-if de « Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau argileux et par l'interface »	197
Figure 3-7	Illustration schématique des scénarios d'intrusion humaine involontaire retenus pour quantification	202
Figure 3-8	Logigramme résumant les modalités de gestion des incertitudes résiduelles par les scénarios (SEN et SEA et What-if identifiés) en regard de la fonction s'opposer à la circulation de l'eau	204
Figure 3-9	Logigramme résumant les modalités de gestion des incertitudes résiduelles par les scénarios (SEN et SEA et What-if identifiés) en regard de la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans les alvéoles de stockage »	205
Figure 4-1	Localisation des exutoires retenus pour la situation de référence et pour la situation enveloppe	213
Figure 4-2	Groupes hypothétiques biosphère (GH) à construire pour les évaluations après fermeture du système de stockage Cigéo (biosphère type tempérée)	217
Figure 4-3	Schéma des voies de transfert retenues pour un individu représentatif du groupe de référence hypothétique multi-activités	219
Figure 4-4	Schéma des voies de transfert retenues pour un individu représentatif du groupe de référence hypothétique multi-activités pêcheur chasseur à l'exutoire rivière Ornain (GH6)	220
Figure 4-5	Groupes retenus en biosphère subtropicale Cr	221
Figure 4-6	Groupes de référence hypothétiques traités en biosphère type boréale	223
Figure 5-1	Représentation schématique des composants et voies de transfert potentielles pris en compte pour la description de chacune des situations du scénario d'évolution normale	227
Figure 5-2	Illustration de l'architecture à terminaison retenue pour les évaluations de sûreté en après-fermeture	231
Figure 5-3	Inventaires radiologiques des principaux radionucléides mobiles ou relativement mobiles (carbone 14, chlore 36, potassium 40, calcium 41, sélénium 79, iode 129) dans le quartier pilote HA et les quartiers de stockage HA et MA-VL	232
Figure 5-4	Illustration de la distribution des familles de colis retenue au sein du quartier pilote HA	233
Figure 5-5	Illustration de la distribution des familles de colis retenue au sein du quartier de stockage HA	233
Figure 5-6	Mode de répartition de l'inventaire radiologique MA-VL retenu pour le traitement quantitatif des deux situations du SEN	234
Figure 5-7	Illustration de la répartition de l'inventaire radiologique MA-VL retenue pour le traitement du SEN avec l'iode 129 comme radionucléide « pilote »	235
Figure 5-8	Illustration de la distribution des familles de colis retenue au sein du quartier de stockage MA-VL avec l'iode 129 comme radionucléide « pilote »	236
Figure 5-9	Inventaires massiques des principales substances toxiques chimiques mobiles ou relativement mobiles (bore, sélénium, cyanure, mercure, arsenic, uranium) dans le quartier pilote HA et les quartiers de stockage HA et MA-VL	237
Figure 5-10	Représentation schématique du positionnement vertical des ouvrages souterrains de l'installation souterraine de Cigéo au sein de la couche du Callovo-Oxfordien pour la situation de référence	238
Figure 5-11	Gradients de charge hydraulique ascendants verticaux dans la couche du Callovo-Oxfordien pour le scénario d'évolution géodynamique phénoménologique applicable pour la situation de référence	240

Figure 5-12 Cartographie des gradients de charge hydraulique verticaux dans la couche du Callovo-Oxfordien à l'actuel (applicable pour la situation de référence) pour l'architecture à terminaison illustrative 241
Figure 5-13 Combinatoire des gradients de charge hydraulique (vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien et horizontal dans l'Oxfordien) retenue pour la situation de référence 241
Figure 5-14 Schéma de conceptualisation de l'endommagement mécanique (zones de fracturation connectée et à fracturation discrète) en situation de référence 243
Figure 5-15 Représentation schématique de la zone affectée par le transitoire thermique autour d'un alvéole HA 244
Figure 5-16 Principes de représentation de la partie utile des alvéoles MA-VL et des perturbations chimiques associées en fonction du type de déchet et des catégories physico-chimiques des familles MA-VL 246
Figure 5-17 Principes de représentation de la partie utile des alvéoles HA en situation de référence 248
Figure 5-18 Représentation schématique des alvéoles HA de stockage de colis de déchets HA en situation de référence 248
Figure 5-19 Durées d'étanchéité des conteneurs de stockage HA retenues en situation de référence 250
Figure 5-20 Schéma conceptuel de la zone fracturée connectée au droit de la partie utile d'un alvéole de stockage MA-VL (orienté selon la contrainte principale majeure) et des caractéristiques de transport et de rétention en situation de référence du SEN (représentation du foisonnement : ZFC-f) 254
Figure 5-21 Schéma de conceptualisation de la zone de fracturation connectée surendommagée (zone de foisonnement ZFC-f) au droit de la partie utile des alvéoles MA-VL en situation de référence 254
Figure 5-22 Illustration de la position des scellements dans l'architecture de stockage à terminaison illustrative 260
Figure 5-23 Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un ouvrage de fermeture de liaison surface-fond (puits) en situation de référence 261
Figure 5-24 Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un ouvrage de fermeture de liaison surface-fond (descenderie) en situation de référence 262
Figure 5-25 Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique des scellements et des remblais de galerie en situation de référence 264
Figure 5-26 Schéma illustratif de la conceptualisation du linéaire de dépose ([2] sur le schéma) et de la ZFC ([3] sur le schéma) au droit du scellement des galeries en situation de référence du SEN 265
Figure 5-27 Représentation schématique de la couche du Callovo-Oxfordien et des encaissants supérieurs et inférieurs 269
Figure 5-28 Illustration schématique des cas d'évaluation des transferts des solutés vers les exutoires retenus dans les formations encaissantes en situation de référence du SEN 269
Figure 5-29 Principe de conceptualisation du modèle hydrogéologique pour l'évaluation de performance et de sûreté 270
Figure 5-30 Méthode d'évaluation de la concentration pompée aux exutoires de type pompage dans la ZFD 272
Figure 5-31 Conceptualisation de l'exutoire de la zone de fracturation diffuse dans le Dogger 273
Figure 5-32 Illustration schématique du positionnement des alvéoles de stockage HA et MA-VL dans la couche du Callovo-Oxfordien, en situation enveloppe du SEN (prise en compte de l'épaisseur de garde minimale fixée par les exigences en partie supérieure (50 mètres)) 276
Figure 5-33 Illustration schématique du positionnement des alvéoles de stockage HA et MA-VL dans la couche du Callovo-Oxfordien, en situation enveloppe

	du SEN (prise en compte de l'épaisseur de garde minimale fixée par les exigences en partie inférieure (50 mètres))	276
Figure 5-34	Positionnement vertical des ouvrages souterrains de l'installation souterraine de Cigéo au sein de la couche du Callovo-Oxfordien pour la situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien (à gauche) ou à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien (à droite))	277
Figure 5-35	Gradients de charge ascendants verticaux dans la couche du Callovo-Oxfordien pour le scénario d'évolution géodynamique maximaliste applicable pour la situation enveloppe	278
Figure 5-36	Combinatoire des gradients de charge hydraulique (vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien et horizontal dans l'Oxfordien) retenue pour la situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien (à gauche) ou à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien (à droite))	279
Figure 5-37	Représentation illustrative de la conceptualisation du foisonnement en situation enveloppe du SEN au droit de la partie utile des alvéoles de stockage MA-VL	281
Figure 5-38	Schéma de conceptualisation de l'endommagement mécanique (zones de fracturation connectée et à fracturation discrète) en situation enveloppe	282
Figure 5-39	Principes de représentation de la partie utile des alvéoles HA en situation enveloppe	284
Figure 5-40	Représentation schématique des alvéoles HA de stockage de colis de déchets HA en situation enveloppe du SEN	284
Figure 5-41	Durées d'étanchéité des conteneurs de stockage HA retenues en situation enveloppe	285
Figure 5-42	Schéma conceptuel de la zone fracturée connectée au droit de la partie utile d'un alvéole de stockage HA (orienté selon la contrainte principale majeure) en situation enveloppe du SEN (représentation du foisonnement : ZFC-f). Position haute du stockage	288
Figure 5-43	Schéma conceptuel de la zone fracturée connectée au droit de la partie utile d'un alvéole de stockage MA-VL (orienté selon la contrainte principale majeure) et des caractéristiques de transport et de rétention en situation enveloppe du SEN (représentation du foisonnement : ZFC-f). Position haute du stockage	289
Figure 5-44	Schéma de conceptualisation de la zone de fracturation connectée surendommagée (zone de foisonnement) au droit de la partie utile des alvéoles MA-VL en situation enveloppe	289
Figure 5-45	Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un ouvrage de fermeture de liaison surface-fond (puits) en situation enveloppe	292
Figure 5-46	Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un ouvrage de fermeture de liaison surface-fond (descenderie) en situation enveloppe	293
Figure 5-47	Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique des scellements et des remblais de galerie en situation enveloppe	295
Figure 5-48	Illustration schématique des cas d'évaluation visant à maximiser les transferts des solutés vers les exutoires retenus dans les formations encaissantes en situation enveloppe du SEN	299
Figure 5-49	Évolution géologique et géomorphologique selon un scénario géodynamique maximaliste : bâti géologique 3D à l'actuel (à gauche) et à un million d'années (à droite)	300
Figure 5-50	Trajectoires hydrauliques dans l'Oxfordien moyen selon un scénario d'évolution géodynamique maximaliste en situation enveloppe – particules relâchées à t = 0 (à gauche) et à t = 400 000 ans (à droite)	300
Figure 5-51	Trajectoires hydrauliques dans le Dogger selon un scénario d'évolution géodynamique maximaliste en situation enveloppe – particules relâchées à t = 0 (à gauche) et à t = 400 000 ans (à droite)	301

Figure 5-52 Positionnement des indicateurs intermédiaires pour la voie de transfert par les ouvrages (galeries, liaisons surface-fond) 305
Figure 5-53 Positionnement des indicateurs intermédiaires horizontaux pour la voie de transfert par le milieu géologique 306
Figure 5-54 Positionnement des indicateurs intermédiaires verticaux pour la voie de transfert par le milieu géologique 306
Figure 6-1 Scénario d'évolution normale – situation de référence : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage (quartiers pilote HA et de stockage HA (en haut) et quartier de stockage MA-VL (en bas)) 312
Figure 6-2 Scénario d'évolution normale – situation de référence : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier pilote HA 313
Figure 6-3 Scénario d'évolution normale – situation de référence : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier de stockage HA (cas sans auto-irradiation du verre) 314
Figure 6-4 Scénario d'évolution normale – situation de référence : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier de stockage HA (cas avec auto-irradiation du verre) 314
Figure 6-5 Scénario d'évolution normale – situation de référence : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL 315
Figure 6-6 Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur) 317
Figure 6-7 Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits molaires des principaux radionucléides au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 319
Figure 6-8 Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits molaires des principaux radionucléides au mur de la couche du Callovo-Oxfordien 320
Figure 6-9 Scénario d'évolution normale - situation de référence : détail des contributions (Se(+VI) HA, Se(-II/0) HA, Se(+VI) MA-VL) à l'historique de débit molaire du sélénium 79 au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 321
Figure 6-10 Scénario d'évolution normale – situation de référence : cartographies de concentration (mol.m^{-3}) en iode 129, uranium 238, neptunium 237 et thorium 230 dans la couche du Callovo-Oxfordien autour d'un alvéole HA à un million d'années 322
Figure 6-11 Scénario d'évolution normale – situation de référence, quartiers de stockage HA (à gauche) et quartier de stockage MA-VL (à droite) : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit) 324
Figure 6-12 Scénario d'évolution normale – situation de référence, prise en compte de l'auto-irradiation du verre dans les quartiers de stockage HA : historiques des débits molaires en iode 129 sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur) 326
Figure 6-13 Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien, et depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à la zone de fracturation diffuse dans le Dogger 330
Figure 6-14 Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour le groupe de

	référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)	332
Figure 6-15	Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)	333
Figure 6-16	Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des doses aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », la biosphère froide et la classe d'âge adulte	336
Figure 6-17	Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des doses aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte	337
Figure 6-18	Scénario d'évolution normale – situation de référence : terme source en sélénium dans le quartier pilote HA	340
Figure 6-19	Scénario d'évolution normale – situation de référence : terme source en sélénium dans le quartier de stockage HA (cas sans auto-irradiation du verre)	340
Figure 6-20	Scénario d'évolution normale – situation de référence : terme source en sélénium dans le quartier de stockage HA (cas avec auto-irradiation du verre)	341
Figure 6-21	Scénario d'évolution normale – situation de référence : termes sources en sélénium et cyanure dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL	341
Figure 6-22	Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits massiques en sélénium (en haut) et cyanure (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)	343
Figure 6-23	Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits massiques des principales substances toxiques chimiques au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	345
Figure 6-24	Scénario d'évolution normale – situation de référence : historiques des débits massiques en sélénium (en haut) et cyanure (en bas), depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien, et depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à la zone de fracturation diffuse dans le Dogger	347
Figure 6-25	Scénario d'évolution normale - situation de référence : historiques des concentrations en sélénium et en cyanure aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »	348
Figure 6-26	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage (quartiers pilote HA et de stockage HA (en haut) et quartier de stockage MA-VL (en bas))	350
Figure 6-27	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier pilote HA	351
Figure 6-28	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans le quartier de stockage HA	352
Figure 6-29	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL	353
Figure 6-30	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : historiques des débits	

	molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)	355
Figure 6-31	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : historiques des débits molaires des principaux radionucléides au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	358
Figure 6-32	Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : détail des contributions (Se(+VI) HA, Se(-II/0) HA, Se(+VI) MA-VL) à l'historique de débit molaire du sélénium 79 au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	359
Figure 6-33	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), quartiers de stockage HA (à gauche) et quartier de stockage MA-VL (à droite) : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), en chlore 36 (au milieu) et en sélénium 79 (en bas), entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit)	360
Figure 6-34	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien	365
Figure 6-35	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2)** : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires Oxfordien (zone de fracturation diffuse) et Ornain	368
Figure 6-36	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)	371
Figure 6-37	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : historiques des débits molaires des principaux radionucléides au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	375
Figure 6-38	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), quartiers de stockage HA (à gauche) et quartier de stockage MA-VL (à droite) : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), en chlore 36 (au milieu) et en sélénium 79 (en bas), entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit)	376
Figure 6-39	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), **exutoire Dogger (cas 3)** : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à la zone de fracturation diffuse dans le Dogger	381
Figure 6-40	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)	383

Figure 6-41 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte 387
Figure 6-42 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Oxfordien (cas 2)** : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 389
Figure 6-43 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Ornain (cas 2)** : historiques des doses à l'exutoire « Rivière Ornain » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités (pêcheur chasseur) », les biosphères tempérée et froide et la classe d'âge adulte 392
Figure 6-44 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Oxfordien (cas 2)** : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte 394
Figure 6-45 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), **exutoire Dogger (cas 3)** : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 397
Figure 6-46 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), **exutoire Dogger (cas 3)** : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte 399
Figure 6-47 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : terme source en sélénium dans le quartier pilote HA 401
Figure 6-48 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : termes sources en bore et sélénium dans le quartier de stockage HA 401
Figure 6-49 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : termes sources en bore, sélénium et cyanure dans l'ensemble des alvéoles du quartier de stockage MA-VL 402
Figure 6-50 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : historiques des débits massiques en sélénium (en haut), bore (au milieu) et cyanure (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur) 404
Figure 6-51 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : historiques des débits massiques des principales substances toxiques chimiques au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 406
Figure 6-52 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : historiques des débits massiques en sélénium (en haut), bore (au milieu) et cyanure (en bas), depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusqu'aux toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien 407
Figure 6-53 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoires Oxfordien et**

	Ornain (cas 2) : historiques des débits massiques en sélénium (en haut), bore (au milieu) et cyanure (en bas), depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires Oxfordien (zone de fracturation diffuse) et Ornain	410
Figure 6-54	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : historiques des débits massiques en sélénium (en haut), bore (au milieu) et cyanure (en bas) sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit et mur)	413
Figure 6-55	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : historiques des débits massiques des principales substances toxiques chimiques au mur de la couche du Callovo-Oxfordien	415
Figure 6-56	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), **exutoire Dogger (cas 3)** : historiques des débits massiques en sélénium (en haut), bore (au milieu) et cyanure (en bas), depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à l'exutoire Dogger (zone de fracturation diffuse)	416
Figure 6-57	Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : historiques des concentrations en principales substances toxiques chimiques à l'exutoire « Pompage dans le Barrois »	418
Figure 6-58	Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2)** : historiques des concentrations en principales substances toxiques chimiques aux exutoires « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Rivière Ornain »	420
Figure 6-59	Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), **exutoire Dogger (cas 3)** : historiques des concentrations en principales substances toxiques chimiques à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »	422
Figure 7-1	Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan de masse de l'iode 129 à un million d'années après la fermeture du stockage exprimé en pourcentages de l'inventaire total initial dans les différents compartiments du système de stockage, ayant transité par le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ou ayant transité par les formations encaissantes sus-jacentes et sous-jacentes	431
Figure 7-2	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), **exutoire Barrois (« cas 1 »)** : bilan de masse de l'iode 129 à un million d'années après la fermeture du stockage exprimé en pourcentages de l'inventaire total initial dans les différents compartiments du système de stockage, ayant transité par le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ou ayant transité par les formations encaissantes sus-jacentes et sous-jacentes	434
Figure 7-3	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), **exutoires Oxfordien et Ornain (« cas 2 »)** : bilan de masse de l'iode 129 à un million d'années exprimé en pourcentages de l'inventaire total initial dans les différents compartiments du système de stockage, ayant transité par le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ou ayant transité par les formations encaissantes sus-jacentes et sous-jacentes	435
Figure 7-4	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du mur du Callovo-Oxfordien), **exutoire Dogger (« cas 3 »)** : bilan de masse de l'iode 129 à un million d'années après la fermeture du stockage exprimé en pourcentages de l'inventaire total initial dans les différents compartiments du système de stockage, ayant transité par	

	le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien ou ayant transité dans les formations encaissantes sus-jacentes et sous-jacentes	436
Figure 7-5	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : historiques des concentrations à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »	439
Figure 7-6	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée et un individu adulte	440
Figure 7-7	Facteurs de conversion biosphère et influence de différents paramètres : biosphère type, classe d'âge, voies d'exposition et régime alimentaire pour les trois principaux radionucléides contribuant à l'incidence sanitaire sur l'homme	442
Figure 7-8	Répartition de l'exposition interne par ingestion pour les trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36, sélénium 79), pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée et un individu adulte	443
Figure 7-9	Scénario d'évolution normale : historiques des débits massiques des principales substances toxiques chimiques au toit de la couche du Callovo-Oxfordien, en situation de référence (à gauche) et en situation enveloppe (à droite)	450
Figure 8-1	Schéma illustratif du SEA de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)	456
Figure 8-2	Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en SEA de dysfonctionnement des LSF par l'interface (basé sur la situation de référence du SEN)	458
Figure 8-3	Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en SEA de dysfonctionnement des LSF par l'interface (basé sur la situation enveloppe du SEN)	459
Figure 8-4	Schéma illustratif du SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)	460
Figure 8-5	Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de galerie en SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface (basé sur la situation de référence du SEN)	462
Figure 8-6	Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de galerie en SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface (basé sur la situation enveloppe du SEN)	463
Figure 8-7	Schéma illustratif du SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)	465
Figure 8-8	SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface, paramètres de la situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) du SEN : champs de charges hydrauliques (m) dans le quartier de stockage MA-VL	472
Figure 8-9	SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface - situation de référence : représentation schématique des processus de transfert des solutés au sein du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien	474
Figure 8-10	SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface - situation enveloppe : représentation schématique des processus de transfert des solutés au sein du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien	475
Figure 8-11	SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface : historiques des débits molaires d'iode 129 entrant dans les galeries de	

	liaison et de retour d'air, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	477
Figure 8-12	SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	481
Figure 8-13	SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires de chlore 36 sortant des liaisons surface-fond et au toit du Callovo-Oxfordien	483
Figure 8-14	SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires de sélénium 79 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	485
Figure 8-15	SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface - situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires des principaux radionucléides dont le débit molaire instantané au toit de la couche du Callovo-Oxfordien excède 10^{-10} mol.an^{-1}	487
Figure 8-16	SEN et SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA - hypothèses de la situation enveloppe du SEN : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79	493
Figure 8-17	SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage du quartier pilote HA (« SEA HA0 ») - hypothèses de la situation enveloppe du SEN, quartiers de stockage HA : historique des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)	495
Figure 8-18	SEA de dysfonctionnement de conteneurs de stockage du quartier de stockage HA (« SEA HA1/HA2 ») - hypothèses de la situation enveloppe du SEN, quartiers de stockage HA : historique des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)	496
Figure 8-19	SEN et SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA - situation enveloppe, quartiers de stockage HA : historiques des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien pour le SEN, le « SEA HA0 » de dysfonctionnement des conteneurs de stockage du quartier pilote HA, et le « SEA HA1/HA2 » de dysfonctionnement de conteneurs du quartier de stockage HA	499
Figure 9-1	Schéma illustratif du scénario What-if de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par le noyau argileux et par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)	510
Figure 9-2	Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en What-if de dysfonctionnement des LSF par le noyau argileux et l'interface (basé sur la situation de référence du SEN)	512
Figure 9-3	Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en What-if de dysfonctionnement des LSF par le noyau argileux et l'interface (basé sur la situation enveloppe du SEN)	513
Figure 9-4	Schéma illustratif du What-if de dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite)	514

Figure 9-5 Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en What-if de dysfonctionnement des scellements de galeries par le noyau argileux et par l'interface (basé sur la situation de référence du SEN) 517
Figure 9-6 Schéma de principe de la conceptualisation hydraulique d'un scellement de liaison surface-fond (puits) en What-if de dysfonctionnement des scellements de galeries par le noyau argileux et par l'interface (basé sur la situation enveloppe du SEN) 518
Figure 9-7 Schéma illustratif du scénario What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau argileux et par l'interface, basé sur la situation de référence du SEN (à gauche) et sur la situation enveloppe du SEN (à droite) 520
Figure 9-8 SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface, hypothèses de la situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) du SEN - Champs de charges hydrauliques (m) dans le quartier de stockage MA-VL 526
Figure 9-9 SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface - situation de référence : représentation schématique des processus de transfert des solutés au sein du stockage et du Callovo-Oxfordien 528
Figure 9-10 SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface - situation enveloppe : représentation schématique des processus de transfert des solutés au sein du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien 529
Figure 9-11 What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface : historiques des débits molaires d'iode 129 entrant dans les galeries de liaison et de retour d'air et dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 531
Figure 9-12 SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 535
Figure 9-13 SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires de chlore 36 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 538
Figure 9-14 SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires de sélénium 79 sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 540
Figure 9-15 What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface - situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : historiques des débits molaires des principaux radionucléides dont le débit molaire instantané au toit de la couche du Callovo-Oxfordien excède 10^{-10} mol.an^{-1} 542
Figure 9-16 What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire « Barrois » (cas 1)** : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusqu'aux toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien 545
Figure 9-17 What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoires « Oxfordien » et « Ornain » (cas 2)** : historiques des débits molaires en iode 129 (en haut), chlore 36 (au

	milieu) et sélénium 79 (en bas), depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires Oxfordien et Ornain	546
Figure 9-18	SEN et What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA - hypothèses de la situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) du SEN : termes sources en iode 129, chlore 36 et sélénium 79	554
Figure 9-19	What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA - hypothèses de la situation de référence du SEN, quartiers de stockage HA : historique des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)	556
Figure 9-20	What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA - hypothèses de la situation enveloppe du SEN, quartiers de stockage HA : historique des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)	557
Figure 9-21	SEN et What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA - situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite), quartiers de stockage HA : historiques des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien pour le SEN et le What-if	560
Figure 9-22	Représentation schématique d'une discontinuité non détectée postulée non traversante et qui intercepte quatre alvéoles de stockage MA-VL, à l'extrémité sud du quartier de stockage MA-VL. Le modèle numérique représente une discontinuité au nord-est du quartier de stockage MA-VL (les flèches sont respectivement parallèles et perpendiculaires à la faille de Gondrecourt)	563
Figure 9-23	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) - quartier de stockage MA-VL : champ des pertes de charges hydrauliques (en mètres) induites par la discontinuité selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)	567
Figure 9-24	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : historiques des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, en sortie de la discontinuité (au mur de la couche du Callovo-Oxfordien) pour les quatre valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité considérées	569
Figure 9-25	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) – quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, par la discontinuité et par la couche du Callovo-Oxfordien, pour les deux bornes de la gamme de valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité étudiée (10^{-8} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1})	571
Figure 9-26	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée, la classe d'âge « adulte », pour la situation de référence du le scénario d'évolution normale, et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)	576

Figure 9-27 Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante - quartier de stockage MA-VL : champ des pertes de charges hydrauliques (en mètres) induites par la discontinuité selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité) 579
Figure 9-28 Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante : historiques des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, en sortie de la discontinuité (au mur de la couche du Callovo-Oxfordien) pour les quatre valeurs de conductivité hydraulique de la discontinuité considérées 580
Figure 9-29 Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante - quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 au mur de la couche du Callovo-Oxfordien, par la discontinuité et par la couche du Callovo-Oxfordien, pour les deux bornes de la gamme de valeurs de la conductivité hydraulique de la discontinuité étudiée (10^{-8} m.s^{-1} et 10^{-5} m.s^{-1}) 582
Figure 9-30 Scénario What-if avec discontinuité non détectée et traversante : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée, la classe d'âge « adulte », pour le scénario d'évolution normale, et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité) 588
Figure 10-1 Photo illustrant l'examen d'une carotte remontée en surface 605
Figure 10-2 Représentation schématique du scénario de forage intrusif en vue d'une exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage 608
Figure 10-3 Distribution de l'inventaire en iode 129 (en moles par alvéole), familles de colis et position du forage au sein du quartier de stockage HA pour le traitement des scénarios d'intrusion humaine (échelles verticale et horizontale non respectées) 609
Figure 10-4 Mode de répartition de l'inventaire radiologique et position du forage au sein du quartier de stockage MA-VL retenus pour le traitement des scénarios d'intrusion humaine 610
Figure 10-5 Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage HA : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif 612
Figure 10-6 Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage HA : champ des pertes de charges hydrauliques (en mètres) induites par le forage selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage 613
Figure 10-7 Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage MA-VL : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif 614
Figure 10-8 Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – échelle quartier de stockage MA-VL (en haut) et échelle stockage (en bas) : champ des pertes de charges hydrauliques (en mètres) induites par le forage selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage 615
Figure 10-9 Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage HA : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du toit du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal excède 10^{-10} mol.an^{-1} 616
Figure 10-10 Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires sortant par

	le forage intrusif (au niveau du toit du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal excède 10^{-5} mol.an^{-1}	618
Figure 10-11	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du toit du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal est compris entre 10^{-10} mol.an^{-1} et 10^{-5} mol.an^{-1}	618
Figure 10-12	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte	620
Figure 10-13	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans	620
Figure 10-14	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an	621
Figure 10-15	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte	624
Figure 10-16	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans	625
Figure 10-17	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an	625
Figure 10-18	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte	629
Figure 10-19	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans	629
Figure 10-20	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an	630
Figure 10-21	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte	633
Figure 10-22	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans	634
Figure 10-23	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an	634
Figure 10-24	Représentation schématique du scénario de forage intrusif en vue d'une exploration du Dogger abandonné à sa profondeur cible	638

Figure 10-25 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage HA : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif 640
Figure 10-26 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage MA-VL : champ de charges hydrauliques (en mètres) selon un plan 2D horizontal traversant les ouvrages de stockage pour les cas avec et sans forage intrusif 641
Figure 10-27 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage HA : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du mur du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal excède 10^{-10} mol.an^{-1} 642
Figure 10-28 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du mur du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal excède 10^{-5} mol.an^{-1} 643
Figure 10-29 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage MA-VL : historiques des débits molaires sortant par le forage intrusif (au niveau du mur du Callovo-Oxfordien) pour les radionucléides dont le débit molaire maximal est compris entre 10^{-10} mol.an^{-1} et 10^{-5} mol.an^{-1} 644
Figure 10-30 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte 645
Figure 10-31 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans 646
Figure 10-32 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an 646
Figure 10-33 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte 649
Figure 10-34 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans 650
Figure 10-35 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage HA : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an 650
Figure 10-36 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte 654

Figure 10-37 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans 654
Figure 10-38 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an 655
Figure 10-39 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge adulte 658
Figure 10-40 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 10 ans 659
Figure 10-41 Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible - quartier de stockage MA-VL : historiques des doses à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et la classe d'âge enfant de 1 an 659
Figure 10-42 Représentation schématique du foreur dans une atmosphère issue du dégazage de l'installation souterraine suite à un forage et contenant de la radioactivité 664
Figure 11-1 Scénario d'évolution normale - situation de référence - études de sensibilité à l'augmentation du coefficient de diffusion effectif et à la diminution du coefficient de sorption dans le Callovo-Oxfordien : historiques de débit molaire sortant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 679
Figure 11-2 Scénario d'évolution normale - situation de référence (à gauche) et enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien) (à droite), iode 129, étude de sensibilité au gradient de charge hydraulique ascendant vertical dans le Callovo-Oxfordien : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 681
Figure 11-3 Scénarios SEA (à gauche) et What-if (à droite) de dysfonctionnement de tous les scellements - situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), iode 129, étude de sensibilité au gradient de charge hydraulique ascendant vertical dans le Callovo-Oxfordien : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 682
Figure 11-4 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), iode 129, étude de sensibilité à la distribution de l'inventaire radiologique MA-VL au sein du quartier et des alvéoles MA-VL : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 684
Figure 11-5 Scénarios SEA (à gauche) et What-if (à droite) de dysfonctionnement de tous les scellements, situation de référence, iode 129, étude de sensibilité à la distribution de l'inventaire MA-VL au sein du quartier et des alvéoles MA-VL : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien 686
Figure 11-6 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), iode 129, étude de sensibilité à

	la longueur des galeries de liaison principales : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	688
Figure 11-7	Scénarios SEA (à gauche) et What-if (à droite) de dysfonctionnement de tous les scellements – situation de référence, iode 129, étude de sensibilité à la longueur des galeries de liaison principales (position de la galerie de recoupe MA-VL) : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	689
Figure 11-8	Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), iode 129, étude de sensibilité au diamètre des galeries : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	691
Figure 11-9	Scénarios SEA (à gauche) et What-if (à droite) de dysfonctionnement de tous les scellements - situation de référence, iode 129, étude de sensibilité au diamètre des galeries de liaison : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	692
Figure 11-10	Scénario d'évolution normale - situation enveloppe (stockage implanté à 50 mètres du toit du Callovo-Oxfordien), iode 129, étude de sensibilité au diamètre des puits : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	693
Figure 11-11	Scénarios SEA (à gauche) et What-if (à droite) de dysfonctionnement de tous les scellements - situation de référence, iode 129, étude de sensibilité au diamètre/nombre de puits : historiques de débit molaire sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	694
Figure 11-12	Illustration de différentes configurations d'architecture de quartier de stockage MA-VL entrant dans le cadre des études en lien avec la flexibilité. Le cercle rouge identifie la recoupe nord-est du quartier de stockage MA-VL.	696
Figure 11-13	Illustration du moteur hydraulique au sein des ouvrages souterrains et de la couche du Callovo-Oxfordien	703
Figure 11-14	Illustration du transfert des solutés au sein des ouvrages souterrains et de la couche du Callovo-Oxfordien	704
Figure 11-15	Fonctionnement hydraulique des quartiers de stockage pour la voie de transfert par les ouvrages sur l'architecture à terminaison illustrative	704

Tableaux

Tableau 2-1	Synthèse des risques et des incertitudes résiduelles relatives aux caractéristiques intrinsèques du Callovo-Oxfordien et de leurs modalités de gestion	73
Tableau 2-2	Synthèse des risques et incertitudes de l'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées	78
Tableau 2-3	Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation oxydante induite par l'oxygène de l'air pendant la phase de fonctionnement et des modalités de gestion associées	80
Tableau 2-4	Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation d'origine thermique des modalités de gestion associées	82
Tableau 2-5	Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation alcaline de la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées	84
Tableau 2-6	Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation saline dans la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées	86

Tableau 2-7	Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation organique dans la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées	88
Tableau 2-8	Synthèse des risques et incertitudes liés au cumul des perturbations chimiques dans la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées	90
Tableau 2-9	Synthèse des risques et incertitudes liés au transport colloïdal dans le Callovo-Oxfordien endommagé ou non et des modalités de gestion associées	93
Tableau 2-10	Synthèse de l'analyse des risques et incertitudes vis-à-vis de l'architecture illustrative retenue pour les évaluations	98
Tableau 2-11	Contribution des différents types de scellements dans le Callovo-Oxfordien à la fonction « S'opposer à la circulation de l'eau »	100
Tableau 2-12	Synthèse des risques et incertitudes vis-à-vis des caractéristiques intrinsèques du noyau argileux et de la mise en place et des modalités de gestion associées	103
Tableau 2-13	Synthèse des risques et incertitudes associées aux perturbations mécaniques du scellement et des modalités de gestion associées	105
Tableau 2-14	Synthèse des risques et incertitudes liés à la perturbation alcaline des noyaux argileux de scellements et des modalités de gestion associées	107
Tableau 2-15	Synthèse des risques et incertitudes liés à l'activité bactérienne dans les noyaux argileux des scellements et des modalités de gestion associées	108
Tableau 2-16	Synthèse des risques et incertitudes associés au linéaire de dépose des scellements de galerie et des modalités de gestion associées	110
Tableau 2-17	Synthèse des risques et incertitudes associées au comportement des argilites au droit du noyau argileux des scellements des LSF et des modalités de gestion associées	111
Tableau 2-18	Synthèse des risques et incertitudes des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien au droit du noyau argileux des scellements et des modalités de gestion associées	114
Tableau 2-19	Synthèse de l'analyse des risques et incertitudes vis-à-vis de la migration des solutés pendant le transitoire hydraulique gaz et des modalités de gestion associées	116
Tableau 2-20	Synthèse de l'analyse des risques et incertitudes vis-à-vis la migration des radionucléides gazeux pendant le transitoire hydraulique gaz et des modalités de gestion associées	117
Tableau 2-21	Synthèse des risques et incertitudes du transitoire hydraulique-gaz affectant la couche du Callovo-Oxfordien et des modalités de gestion associées	120
Tableau 2-22	Synthèse de l'analyse des risques et incertitudes du transitoire hydraulique-gaz sur le noyau des scellements et son dispositif de confinement mécanique et des modalités de gestion associées	122
Tableau 2-23	Synthèse des risques et incertitudes des composants assurant le soutènement des ouvrages remblayés et des modalités de gestion associées	127
Tableau 2-24	Synthèse des incertitudes résiduelles de connaissance sur les modèles de relâchement des déchets HA et MA-VL vitrifiés et de leurs modalités de gestion	132
Tableau 2-25	Synthèse des incertitudes résiduelles de connaissance sur les modèles de relâchement des déchets HA non vitrifiés et de leurs modalités de gestion	133
Tableau 2-26	Synthèse des choix des modèles de relâchement retenus pour les déchets HA et MA-VL vitrifiés et les déchets HA non vitrifiés	134
Tableau 2-27	Synthèse des incertitudes résiduelles de connaissance sur la spéciation du sélénium dans les déchets HA vitrifiés et de leurs modalités de gestion	135

Tableau 2-28	Synthèse des risques et incertitudes du conteneur de stockage incertitudes et des modalités de gestion associées	137
Tableau 2-29	Synthèse des risques et incertitudes du conteneur de stockage et des modalités de gestion associées	139
Tableau 2-30	Synthèse des risques et incertitudes du MREA et des modalités de gestion associées	141
Tableau 2-31	Synthèse des risques et incertitudes en lien avec les conditions physico-chimiques dans les alvéoles HA et des modalités de gestion associées	143
Tableau 2-32	Synthèse des risques et incertitudes liés au transfert et à la rétention dans l'alvéole HA et des modalités de gestion associées	144
Tableau 2-33	Synthèse des incertitudes et des modalités de gestion associées vis-à-vis de l'analyse des risques et incertitudes du chemisage	147
Tableau 2-34	Synthèse des risques internes et incertitudes liés à l'influence du MREA sur les propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien et modalités de gestion associées	148
Tableau 2-35	Synthèse des incertitudes résiduelles associées aux modèles de relâchement des déchets MA-VL et de leur paramétrage et des modalités de gestion associées	154
Tableau 2-36	Synthèse des risques internes et incertitudes résiduelles des bétons de structure des alvéoles MA-VL et modalités de gestion associées	158
Tableau 2-37	Synthèse des incertitudes et des modalités de gestion associées vis-à-vis de l'analyse des risques et incertitudes de la perturbation saline dans l'alvéole MA-VL	159
Tableau 2-38	Synthèse des risques et incertitudes de la perturbation organique dans les bétons de structure MA-VL et des modalités de gestion associées	161
Tableau 2-39	Synthèse des risques internes et incertitudes résiduelles liés au cumul des perturbations dans les bétons de structure MA-VL et des modalités de gestion associées	162
Tableau 2-40	Synthèse des risques et incertitudes liés aux formations encaissantes et modalités de gestion associées	169
Tableau 2-41	Choix des exutoires pour les évaluations d'impact radiologique et toxicologique	172
Tableau 2-42	Synthèse des risques et incertitudes liés à la biosphère et modalités de gestion	174
Tableau 3-1	Liste des cas de calcul associés au scénario d'évolution normale (SEN)	207
Tableau 3-2	Liste des scénarios d'évolutions altérée (SEA) retenus et définis pour quantification	208
Tableau 3-3	Liste des scénarios What-if retenus et définis pour quantification (LSF : Liaisons surface-fond)	209
Tableau 3-4	Liste des scénarios d'intrusion humaine involontaires (SIHI) pour quantification	210
Tableau 4-1	Choix des exutoires pour les évaluations en biosphère type tempérée	213
Tableau 4-2	Choix des groupes de référence hypothétiques (biosphère type tempérée)	215
Tableau 4-3	Exutoires retenus pour la biosphère chaude type Cr	221
Tableau 4-4	Choix des exutoires en biosphère froide type boréale	222
Tableau 5-1	Liste des radionucléides retenus pour l'évaluation quantitative du scénario d'évolution normale (chaînes de filiation incluses)	228
Tableau 5-2	Modèles de relâchement retenus pour la quantification des termes sources verre (quartiers de stockage HA) en situation de référence	251
Tableau 5-3	Modèles de relâchement retenus pour la quantification des termes sources des colis MA-VL, par alvéole, en situation de référence	255
Tableau 5-4	Situation de référence – valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert de solutés retenues pour les trois anions mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79)	274

Tableau 5-5 Situation de référence – valeurs des paramètres de rétention chimique (sorption, précipitation) retenues pour les trois anions mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79) 275
Tableau 5-6 Modèles de relâchement retenus pour la quantification des termes sources verre (quartiers de stockage HA) en situation enveloppe 286
Tableau 5-7 Situation enveloppe - valeurs des paramètres hydrauliques et de transfert de solutés retenues pour les trois anions mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79) 302
Tableau 5-8 Situation enveloppe - valeurs des paramètres de rétention chimique (sorption, précipitation) retenues pour les trois anions mobiles (iode 129, chlore 36, sélénium 79) 304
Tableau 6-1 Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages » 318
Tableau 6-2 Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (cumulés sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial respectif des quartiers de stockage HA et du quartier de stockage MA-VL) entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit) 325
Tableau 6-3 Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, depuis la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux différents exutoires (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial) 328
Tableau 6-4 Scénario d'évolution normale – situation de référence : doses maximales et occurrences des doses maximales aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 334
Tableau 6-5 Scénario d'évolution normale – situation de référence : doses maximales et occurrences des doses maximales aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », la biosphère froide et la classe d'âge adulte 336
Tableau 6-6 Scénario d'évolution normale – situation de référence : doses maximales et occurrences des doses maximales aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte 338
Tableau 6-7 Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan des débits massiques en sélénium et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages » 344
Tableau 6-8 Scénario d'évolution normale – situation de référence : bilan des débits massiques en sélénium et en cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, depuis la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux différents exutoires (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial) 346
Tableau 6-9 Scénario d'évolution normale – situation de référence : concentrations maximales en sélénium et en cyanure et occurrences des concentrations maximales aux exutoires « Pompage dans le Barrois » et « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » 349

Tableau 6-10 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages » 356
Tableau 6-11 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : bilan des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (cumulés sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial respectif des quartiers de stockage HA et du quartier de stockage MA-VL) entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit) 362
Tableau 6-12 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à l'exutoire Barrois (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial) 364
Tableau 6-13 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2) :** bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires Oxfordien et Ornain (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial) 367
Tableau 6-14 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages » 372
Tableau 6-15 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : bilan des débits molaires d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (cumulés sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial respectif des quartiers de stockage HA et du quartier de stockage MA-VL) entrant dans les galeries d'accès (HA uniquement), entrant dans les galeries de liaison, entrant dans la zone centrale, sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (au toit) 378
Tableau 6-16 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), **exutoire Dogger (cas 3)** : bilan des débits molaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79, cumulés sur un million d'années, et des débits molaires maximaux, depuis le mur de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à l'exutoire Dogger (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial) 380
Tableau 6-17 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée, chaude et froide et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 384
Tableau 6-18 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte 386

Tableau 6-19 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Oxfordien (cas 2)** : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée, chaude et froide et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 390
Tableau 6-20 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Ornain (cas 2)** : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Rivière Ornain » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités (pêcheur chasseur) », les biosphères tempérée et froide et la classe d'âge adulte 393
Tableau 6-21 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Oxfordien (cas 2)** : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte 395
Tableau 6-22 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), **exutoire Dogger (cas 3)** : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée, chaude et froide et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 398
Tableau 6-23 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), **exutoire Dogger (cas 3)** : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » pour les groupes de référence hypothétiques « éleveur de bovins » et « villageois jardinier », la biosphère tempérée et la classe d'âge adulte 399
Tableau 6-24 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres) : bilan des débits massiques en sélénium, bore et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages » 405
Tableau 6-25 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : bilan des débits massiques en sélénium, bore et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à l'exutoire Barrois (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial) 408
Tableau 6-26 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2)** : bilan des débits massiques en sélénium, bore et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, depuis le toit de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires Oxfordien et Ornain (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial) 411
Tableau 6-27 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres) : bilan des débits massiques en sélénium, bore et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, par les voies de transfert « couche du Callovo-Oxfordien » et « ouvrages » 414
Tableau 6-28 Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), **exutoire Dogger (cas 3)** : bilan des débits massiques en sélénium, bore et cyanure, cumulés sur un million d'années, et des débits massiques maximaux, depuis le mur de

	la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à l'exutoire Dogger (valeurs normées par rapport à l'inventaire total initial)	417
Tableau 6-29	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : concentrations maximales en principales substances toxiques chimiques et occurrences des concentrations maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois »	419
Tableau 6-30	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoires Oxfordien et Ornain (cas 2)** : concentrations maximales en principales substances toxiques chimiques et occurrences des concentrations maximales aux exutoires « Pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse) » et « Rivière Ornain »	421
Tableau 6-31	Scénario d'évolution normale – situation enveloppe (stockage implanté avec une garde inférieure de 50 mètres), **exutoire Dogger (cas 3)** : concentrations maximales en principales substances toxiques chimiques et occurrences des concentrations maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) »	423
Tableau 7-1	Valeurs des facteurs de conversion biosphère des trois principaux radionucléides (iode 129, chlore 36, sélénium 79) pour le groupe de référence « multi-activités », pour différentes biosphères types et différentes classes d'âge	441
Tableau 7-2	Scénario d'évolution normale : doses cumulées maximales et occurrences des doses cumulées maximales aux principaux exutoires retenus en situation de référence (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans le Dogger ») et en situation enveloppe (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien », « Pompage dans le Dogger »), pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée ou chaude et la classe d'âge adulte	447
Tableau 7-3	Scénario d'évolution normale : doses cumulées maximales et occurrences des doses cumulées maximales aux principaux exutoires retenus en situation de référence (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans le Dogger ») et en situation enveloppe (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien », « Pompage dans le Dogger »), pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée ou chaude et la classe d'âge enfant de 10 ans	448
Tableau 7-4	Scénario d'évolution normale : doses cumulées maximales et occurrences des doses cumulées maximales aux principaux exutoires retenus en situation de référence (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans le Dogger ») et en situation enveloppe (« Pompage dans le Barrois », « Pompage dans l'Oxfordien », « Pompage dans le Dogger »), pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée ou chaude et la classe d'âge enfant de 1 an	449
Tableau 8-1	Scénarios d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des scellements par l'interface	454
Tableau 8-2	Valeurs des conductivités hydrauliques des argilites endommagées mécaniquement (ZFC) pour les scénarios d'évolution altérée de dysfonctionnement des scellements par l'interface (les valeurs dégradées dans le cadre des SEA sont ombrées)	468
Tableau 8-3	Débits d'eau sortant des liaisons surface-fond (LSF) et vitesses d'écoulement en sortie de quartier de stockage MA-VL pour le SEN et les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface (paramètres des situations de référence et enveloppe du SEN)	470
Tableau 8-4	SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface – situations de référence et enveloppe : bilans des quantités d'iode 129 (cumulées sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial respectif en HA et en MA-VL, puis par rapport à	

	l'inventaire total initial HA + MA-VL) entrant dans les galeries d'accès, dans les galeries de liaison, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	478
Tableau 8-5	SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface - situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : débits molaires maximum d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien, dates d'occurrence de ces maxima et rapport entre les maxima par la voie « ouvrages » et par la voie « couche du Callovo-Oxfordien »	480
Tableau 8-6	Dysfonctionnements considérés dans le SEA « Dysfonctionnement de conteneurs de stockage HA (quartier pilote HA et quartier de stockage HA) » et les effets induits sur le relâchement et la migration (les dysfonctionnements dans le cadre des SEA sont ombrés)	492
Tableau 8-7	SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage du quartier pilote HA (« SEA HA0 »), respectivement du quartier de stockage HA (« SEA HA1/HA2 ») - hypothèses de la situation enveloppe du SEN, quartiers de stockage HA : bilans de la quantité d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial des déchets HA) relâchée à un million d'années, entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)	497
Tableau 9-1	Scénarios What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface entre le noyau argileux et la couche du Callovo-Oxfordien	509
Tableau 9-2	Valeurs des conductivités hydrauliques des argilites endommagées mécaniquement (ZFC) pour les scénarios What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau argileux et par l'interface (les valeurs dégradées dans le cadre des scénarios What-if sont ombrées)	522
Tableau 9-3	Débits d'eau sortant des liaisons surface-fond (LSF) et vitesses d'écoulement en sortie de quartier de stockage MA-VL pour le SEN et les What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface (hypothèses des situations de référence et enveloppe du SEN)	525
Tableau 9-4	SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface – situations de référence et enveloppe : bilans des quantités d'iode 129 (cumulées sur un million d'années, en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial respectif en HA et en MA-VL, puis par rapport à l'inventaire total initial HA + MA-VL) entrant dans les galeries d'accès, dans les galeries de liaison, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien	532
Tableau 9-5	SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface - situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : débits molaires maximum d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien, dates d'occurrence de ces maxima et rapport entre les maximas par la voie « ouvrages » et par la voie « couche du Callovo-Oxfordien »	536
Tableau 9-6	SEN et What-if de dysfonctionnement des scellements par le noyau et par l'interface - situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : débits molaires maximum d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien, dates d'occurrence de ces maxima et rapport entre les maximas par la voie « ouvrages » et par la voie « couche du Callovo-Oxfordien »	548
Tableau 9-7	What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Barrois (cas 1)** : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités »,	

	les biosphères tempérée, chaude et froide, et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)	549
Tableau 9-8	What-if de dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface - situation enveloppe (stockage implanté avec une garde supérieure de 50 mètres), **exutoire Oxfordien (cas 2)** : doses maximales et occurrences des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans l'Oxfordien » pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée, chaude et froide, et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)	550
Tableau 9-9	Dysfonctionnements considérés dans le scénario What-if « Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA » et effets induits ou postulés sur le relâchement et la migration (les dysfonctionnements dans le cadre des What-if sont ombrés)	552
Tableau 9-10	What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA - hypothèses de la situation de référence du SEN, quartiers de stockage HA : bilans de la quantité d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial des déchets HA) relâchée à un million d'années, entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)	558
Tableau 9-11	What-if de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA des quartiers HA - hypothèses de la situation enveloppe du SEN, quartiers de stockage HA : bilans de la quantité d'iode 129, de chlore 36 et de sélénium 79 (en pourcentage par rapport à l'inventaire total initial des déchets HA) relâchée à un million d'années, entrant dans les galeries, dans la zone centrale, et sortant des liaisons surface-fond et de la couche du Callovo-Oxfordien (toit)	559
Tableau 9-12	Paramètres pour la représentation de la discontinuité non détectée postulée	564
Tableau 9-13	Pourcentage de l'inventaire radiologique du quartier de stockage MA-VL contenu dans les quatre alvéoles interceptés par la discontinuité non détectée postulée, pour chacun des trois radionucléides considérés, en lien avec la distribution pénalisante de l'inventaire	565
Tableau 9-14	Évolution du débit d'eau drainé par la discontinuité non détectée postulée et non traversante, en fonction de sa conductivité hydraulique	568
Tableau 9-15	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien et dates d'occurrence de ces débits maximaux, en SEN et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)	572
Tableau 9-16	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : inventaire sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien par la discontinuité, cumulé sur un million d'années, rapporté à l'inventaire initial des quatre alvéoles interceptés, en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité retenue, pour chacun des trois radionucléides considérés	574
Tableau 9-17	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : inventaire sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (discontinuité comprise), cumulé sur un million d'années, rapporté à l'inventaire du quartier de stockage MA-VL, en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité retenue, pour chacun des trois radionucléides considérés	575
Tableau 9-18	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et non traversante (garde inférieure de la couche du Callovo-Oxfordien) : doses	

	maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » et dates d'occurrence de ces doses maximales, pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée et la classe d'âge « adulte », en SEN et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)	577
Tableau 9-19	Évolution du débit d'eau drainé par la discontinuité non détectée postulée et traversante en fonction de sa conductivité hydraulique	578
Tableau 9-20	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante : débits molaires maximaux au mur de la couche du Callovo-Oxfordien et dates d'occurrence de ces débits maximaux, en SEN et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)	583
Tableau 9-21	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante : inventaire sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien par la discontinuité, cumulé sur un million d'années, rapporté à l'inventaire initial des quatre alvéoles interceptés, en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité retenue, pour chacun des trois radionucléides considérés	584
Tableau 9-22	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante : inventaire sortant au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (discontinuité comprise), cumulé sur un million d'années, rapporté à l'inventaire du quartier de stockage MA-VL, en fonction de la conductivité hydraulique de la discontinuité retenue, pour chacun des trois radionucléides considérés	585
Tableau 9-23	Scénario What-if avec discontinuité non détectée postulée et traversante : doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) » et dates d'occurrence de ces doses maximales, pour le groupe de référence « multi-activités », la biosphère tempérée et la classe d'âge « adulte », en SEN et pour le scénario avec discontinuité non détectée (selon la conductivité hydraulique appliquée dans la discontinuité)	589
Tableau 10-1	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage HA : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an	622
Tableau 10-2	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage HA : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an	626
Tableau 10-3	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage MA-VL : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an	631
Tableau 10-4	Scénario de forage géothermique arrêté au niveau du stockage – quartier de stockage MA-VL : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Barrois », pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an	635
Tableau 10-5	Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage HA : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an	647

Tableau 10-6	Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage HA : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an	651
Tableau 10-7	Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage MA-VL : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour une biosphère tempérée, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an	656
Tableau 10-8	Scénario de forage d'exploration du Dogger abandonné à sa cote cible – quartier de stockage MA-VL : doses maximales et dates d'occurrence des doses maximales à l'exutoire « Pompage dans le Dogger (zone de fracturation diffuse) », pour une biosphère chaude, le groupe de référence « multi-activités » et les classes d'âge adulte, enfant de 10 ans et enfant de 1 an	660
Tableau 12-1	Tableau de correspondance : fonctions de sûreté après fermeture/composants du système de stockage	721

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2008). 32 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/content/download/50883/352509?version=2.

2 Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture (DOS-AF). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOASR20000150062. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-apres-fermeture_0.pdf.

3 Stockage définitif des déchets radioactifs - Prescriptions de sûreté particulières. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011). N°SSR-5. 92 p.

4 Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011). N°SSG-14. 104 p.

5 Radioactive Waste Disposal Facilities Safety Reference Levels. WENRA WGWD (2014). 81 p. Disponible à l'adresse : http://www.wenra.org/media/filer_public/2015/03/18/srl_disposal_final_version_2014_12_22.pdf.

6 Methods for safety assessment of geological disposal facilities for radioactive waste: Outcomes of the NEA MeSA initiative. OCDE; Nuclear Energy Agency (NEA) (2012). N°NEA 6923. 242 p.

7 Integration Group for the Safety Case. NEA IGSC Scenario Development Workshop, 1-3 June 2015, Issy-les-Moulineaux, France. OECD Publishing (2016). Vol. NEA-RWM-R-2015-3.

8 RFS III.2.f du 10 juin 1991 : Définition des objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stockage. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (1991). Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/l-asn-reglemente/rfs/rfs-relatifs-aux-inb-autres-que-rep/rfs-iii.2.f-du-01-06-1991.

9 ICRP Publication 101: Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimisation of radiological protection. Annals of the ICRP (2006). Vol. 36, N°3, 104 p.

10 ICRP Publication 103: The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP (2007). ICRP. Vol. 37, N°2-4, 330 p.

11 ICRP Publication 122: Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste. Annals of the ICRP (2013). Weiss, W.,Larsson, C.M.,McKenney, C.,Minon, J.P.,Mobbs, S.,Schneider, T.,Umeki, H.,Hilden, W.,Pescatore, C.,Vesterlind, M. Vol. 42, N°3, 54 p.

12 Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants. Ministère de la Santé, de la Famille et des Personnes handicapées (2003). Journal officiel de la République française, N°262, pp.58003–68.

13 Grammont, V., Boudet, C. Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires - Démarche intégrée pour la gestion des émissions et substances chimiques par les installations classées - Impact des activités humaines sur les milieux et la santé. Ineris (2013). N°DRC-12-125929-13162B. 102 p.

14 Lettre CODEP-DRC-2018-001635 de l'ASN du 12 janvier 2018 relative au Dossier d'options de sûreté pour le projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. Autorité

de sûreté nucléaire (ASN) (2018). N°CODEP-DRC-2018-001635. 45 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/Lettre-adressee-a-l-Andra-precisant-les-options-de-surete-Cigeo.

15 Bailey, L., Becker, D., Beuth, T., Capouet, M., Cormenzana, J.L., Cuñado, M., Galson, D.A., Griffault, L., Marivoet, J., Serres, C. PAMINA Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case: European Handbook of the state-of-the-art of safety assessments of geological repositories - Part 1. European Commission (2011). N°D-N°: 1.1.4. Disponible à l'adresse : https://igdtp.eu/wp-content/uploads/2019/10/pamina-D1.1.4.pdf.

16 "Reference biospheres" for solid radioactive waste disposal: report of biomass theme 1 of the Biosphere modelling and Assessment (BIOMASS) programme. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2003). N°IAEA-BIOMASS-6. 563 p. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Biomass6_web.pdf.

17 Expériences internationales des dossiers de sûreté pour les dépôts en formation géologique (INTESC) : Résultats du projet INTESC. OCDE; Nuclear Energy Agency (NEA) (2009). N°AEN 6252. 208 p.

18 Rôle des informations géoscientifiques dans le dossier de sûreté pour la gestion des déchets radioactifs : principales conclusions du projet AMIGO. OCDE; Nuclear Energy Agency (NEA) (2010). N°NEA 6396. 56 p.

19 Scenario development methods and practice: an evaluation based on the NEA Workshop on Scenario development Madrid, Spain, May 1999. Nuclear Energy Agency (NEA); OCDE (2001). N°NEA 3059. 248 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/scenario-development-methods-and-practice_9789264193536-en.

20 An International Peer Review of the Safety Options Dossier of the Project for Disposal of Radioactive Waste in Deep Geological Formations (Cigéo): final report of the IAEA International Review team. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017). N°IAEA/CIG/FRA. 43 p.

21 Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation (DOS-Expl). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOASR10000150060. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-exploitation.pdf.

22 Projet de stockage Cigéo - Examen du Dossier d'Options de Sûreté, tome 1. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2017). N°IRSN 2017-00013. 243 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/Documents/Dechets/IRSN_Rapport-2017-0013_GPDOS-Cigeo_Tome-1.pdf.

23 Projet de stockage Cigéo - Examen du Dossier d'Options de Sûreté, tome 2. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2017). N°IRSN 2017-00013. 209 p.

24 The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste: Specific safety guide. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2012). N°SSG-23. 120 p.

25 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo. Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-LST-AMOA-TR0-0000-20-0001.

26 HIDRA - The International Project on Inadvertant Human Intrusion in the context of Disposal of Radioactive Waste. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017). 144 p. Disponible à l'adresse : https://www-ns.iaea.org/downloads/rw/projects/hidra/hidra-draft-report.pdf.

27 Dossier 2005 Argile. Tome Évaluation de sûreté du stockage géologique. Andra (2005). Document N°CRPADSQ040022. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/270.pdf.

28 Stockage réversible profond - Étape 2009. Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde. Andra (2010). Document N°DCOM/DIR/10-0107. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-01/392.pdf.

29 Safety of geological disposal of high level and long lived radioactive waste in France: An international Peer Review of the “Dossier 2005 Argile” concerning the disposal in the Callovo-Oxfordian formation. OCDE; Nuclear Energy Agency (NEA) (2006). N°NEA/RWM/PEER(2006)1. 52 p.

30 International features, events and processes (IFEP) list of the deep geological disposal of radioactive waste (Version 3.0). Nuclear Energy Agency (NEA); OCDE (2019). N°NEA/RWM/R(2019). 166 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2019/rwm-r2019-1.pdf.

31 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. Tome I du référentiel de site - L'histoire géologique et état actuel. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-RAP-AMOA-GE0-0000-20-0003.

32 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. Le comportement des radionucléides et des toxiques chimiques. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-20-0022.

33 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. Le modèle hydrogéologique à l'actuel et son évolution sur le prochain million d'années. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-GE0-0000-20-0002.

34 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. Tome IV du référentiel de site - Le comportement thermo-hydro-mécanique des formations géologiques. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-RAP-AMOA-GE0-0000-20-0009.

35 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification des choix d’architecture souterraine. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-AF0-0000-19-0001.

36 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. Le comportement mécanique des alvéoles MA-VL (après fermeture). Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-19-0006.

37 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la conception de l’alvéole MA-VL. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0045.

38 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. L'activité bactérienne et l'évolution phénoménologique du stockage dans le temps (après fermeture). Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-GE0-0000-19-0008.

39 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Synthèse de l’analyse des risques et incertitudes après fermeture de Cigéo. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NSY-AMOA-SR2-0000-20-0013.

40 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la version préliminaire des spécifications d’acceptation des colis. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-DJD-AMOA-SR0-0000-19-0043.

41 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-FER-0000-19-0045.

42 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0046.

43 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. Le transitoire hydraulique-gaz et le devenir des radionucléides gazeux (après fermeture). Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0007.

44 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. Le comportement des déchets vitrifiés (HA et MA-VL). Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0015.

45 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. Les modèles de relâchement phénoménologiques des radionucléides des colis de déchets HA et MA-VL en fonction des conditions d'environnement : synthèse des connaissances. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-20-0033.

46 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. Les modèles de relâchement phénoménologiques des radionucléides pour les différentes familles de colis de déchets HA et MA-VL en fonction des conditions d'environnement : synthèse des connaissances. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-20-0020.

47 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la conception de l'alvéole HA. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0044.

48 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la conception des conteneurs de stockage des colis HA. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-CS0-0000-19-0002.

49 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Note scénarios, hypothèses et résultats des calculs de conséquences. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-20-0012.

50 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. Le comportement mécanique et la corrosion des composants métalliques des alvéoles HA dans le temps (exploitation et après-fermeture). Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0005.

51 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. La corrosion des matériaux métalliques. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0012.

52 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. L'évolution chimique des alvéoles HA et du Callovo-Oxfordien en champ proche (après fermeture). Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0008.

53 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. Le comportement des déchets MA-VL. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0016.

54 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. L'évolution chimique des alvéoles MA-VL et du Callovo-Oxfordien en champ proche. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0009.

55 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la conception des alvéoles dédiés au stockage des colis de déchet bitumés mis en conteneur renforcé. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-MT0-0000-20-0017.

56 Linard, Y., Vinsot, A., Vincent, B., Delay, J., Wechner, S., La Vaissière, R. de, Scholz, E., Garry, B., Lundy, M., Cruchaudet, M., Dewonck, S., Vigneron, G. Water flow in the Oxfordian and Dogger limestone around the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C (2011). Vol. 36, N°17-18, pp.1450–68.

57 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-19-0015.

58 BIOCLIM Deliverable D10-12: Development and Application of a Methodology for Taking Climate-Driven Environmental Change into Account in Performance Assessments. Work package 4: Biosphere system description. EC Contract n° FIKW-CT2000-00024). European Commission (2004). N°Deliverable D10-12. 298 p. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/mini-sites/bioclim/pdf/d10-12.pdf.

59 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. Tome III du référentiel de site - L'évolution naturelle sur le prochain million d'années. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-ESE-0000-20-0017.

60 Enquête alimentaire sur la zone OPE du Centre Meuse Haute-Marne de l'Andra : synthèse des résultats. Andra (2015). Document N°SURNTASSE140009.

61 Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective. Agence nationale sécurité sanitaire alimentaire nationale (ANSES); Santé publique France (2017). 556 p.

62 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Hypothèses et valeurs des paramètres retenus dans les évaluations quantitatives de performance et de sûreté en après fermeture. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-20-0097.

63 Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. Version consolidée. Ministère de la Santé et des Solidarités (2017).

64 Eckerman, K.F., Ryman, J.C. External exposure to radionuclides in air, water, and soil. United States Environmental Protection Agency (1993). N°EPA 402-R-93-081. 238 p.

65 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. La stratégie de surveillance de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-19-0005.

66 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 20 - Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-PDD-AMOA-SDR-0000-19-0002.

67 Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo. Pièce 13 - Évaluation économique et sociale des infrastructures de transport du projet global Cigéo. Andra (2020). Document N°CG-TE-D-RAP-AMOA-EEE-0000-19-0081.

© Andra • Décembre 2022 • Création graphique : Agence Les Récréateurs • Crédit photo : Andra

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00

www.andra.fr