RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANDRA

2026

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

PIÈCE 7

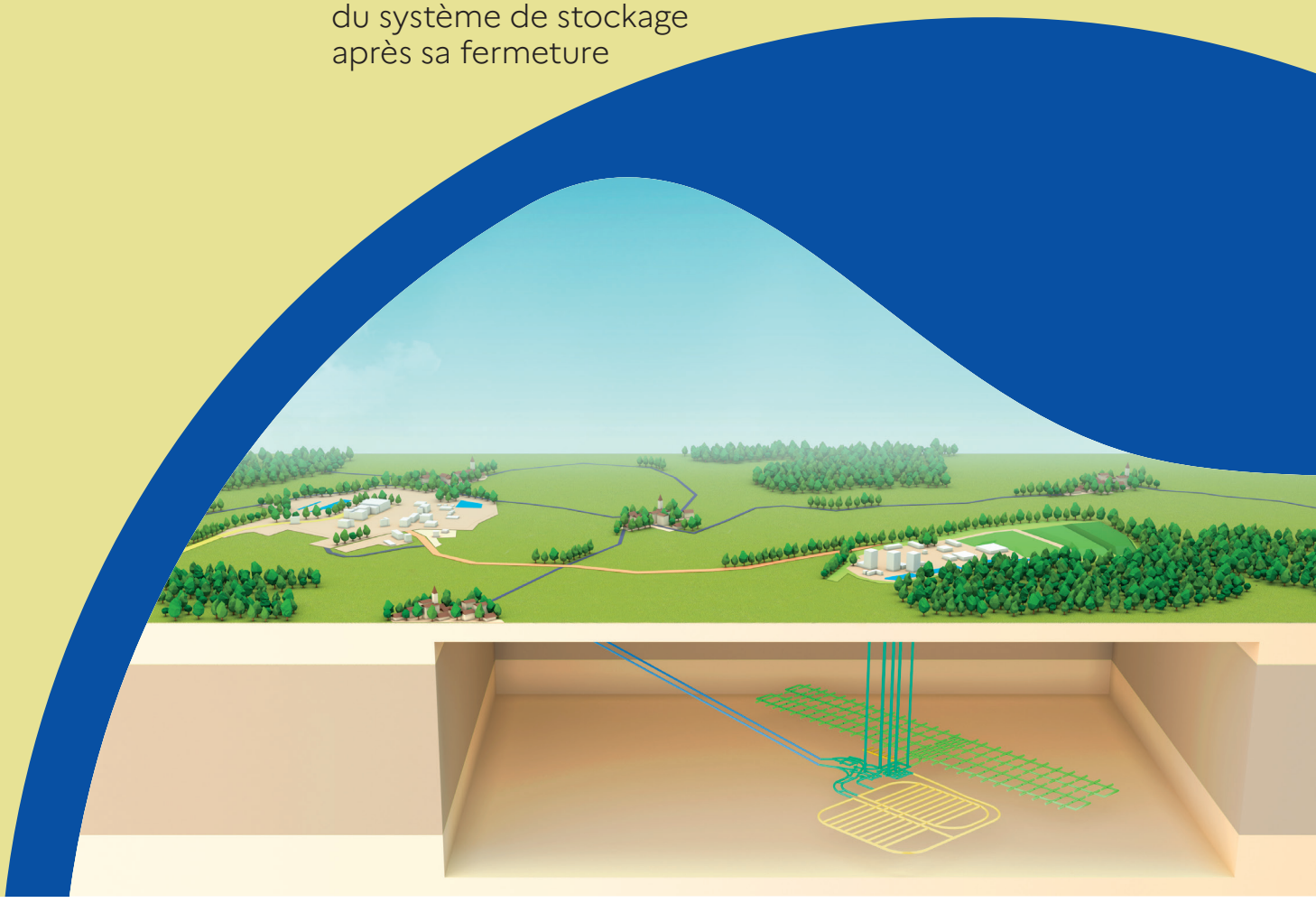
Version préliminaire du rapport de sûreté

PARTIE II

Description de l'INB,
de son environnement et de son fonctionnement
et évolution du système de stockage après fermeture

Volume 7

L'évolution phénoménologique
du système de stockage
après sa fermeture



MISE À JOUR DU DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION POUR ENQUÊTE PUBLIQUE

À la suite de l'instruction technique par l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection et des consultations réglementaires, et avant son passage en enquête publique, des mises à jour ont été apportées par l'Andra dans certaines pièces du dossier (déposé initialement le 16 janvier 2023).

Pour la clarté de l'information, l'Andra assure la traçabilité de ces mises à jour via les moyens suivants :

- des barres grises en marge du texte pour tracer les modifications ou ajouts en amont des consultations réglementaires ;
- un surlignage gris pour tracer les modifications ou ajouts depuis les consultations réglementaires ;
- des tableaux de traçabilité de ces mises à jour.

Les corrections mineures (orthographiques, de forme ou d'imprécision) ne sont pas matérialisées.

Sommaire

1. Un site d'implantation et des principes directeurs de conception concourant à une maîtrise des grands traits de l'évolution du système de stockage sur le long terme 7

1.1 Un environnement géologique simple, à l'écart de grands accidents géologiques et s'inscrivant dans le contexte connu du Bassin parisien 10

1.2 Les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien comme formation d'accueil des ouvrages souterrains 12

1.2.1 Les propriétés favorables à l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien en grand 12

1.2.2 Les propriétés favorables des argilites du Callovo-Oxfordien en tant que matériau vis-à-vis du confinement 14

1.3 Des formations encaissantes qui prennent le relai de la formation du Callovo-Oxfordien et complètent la performance du système de stockage 18

1.4 Des principes directeurs et des choix de conception préservant les propriétés favorables des composants et facilitant la maîtrise de la description de l'évolution phénoménologique du stockage 18

1.4.1 Une architecture implantée en profondeur et sur un seul niveau 19

1.4.2 Une architecture de stockage globalement borgne et élancée 22

1.4.3 La séparation des familles de déchets et des distances de garde importantes entre les zones de stockage qui limitent ou empêchent les interactions physico-chimiques à distance 23

1.4.4 Des dispositions de conception et des règles de dimensionnement qui concourent à la limitation des perturbations 24

1.5 Des échelles de temps et d'espace des processus majeurs qui concourent naturellement à une simplification et une maîtrise de l'évolution phénoménologique du stockage et des environnements géologiques 32

2. L'évolution du milieu géologique sur le site d'implantation de l'installation souterraine au cours du prochain million d'années 35

2.1 Un site géologique d'implantation de l'installation nucléaire peu affecté par la présence du stockage 36

2.1.1 La formation du Callovo-Oxfordien 36

2.1.2 Les formations encaissantes 37

2.2 Une évolution en grand du milieu géologique sur le site d'implantation de l'INB pilotée par les phénomènes géodynamiques 39

2.2.1 Une géodynamique interne du site d'implantation lente et de faible ampleur 39

2.2.2 Des évolutions possibles du climat encadrant le domaine d'évolution géodynamique externe 40

2.3 Une évolution des écoulements hydrogéologiques du fait de l'évolution géodynamique du site 46

2.3.1 Les écoulements à l'actuel 46

2.3.2 L'évolution des écoulements sur le prochain million d'années 49

3. L'évolution du système de stockage 57

3.1 Le transitoire thermique dans les ouvrages souterrains et le Callovo-Oxfordien 58
3.1.1 Un état thermique initial du site d'implantation déterminé par le flux géothermique et les propriétés thermiques des formations sédimentaires 58
3.1.2 Le cadre général du transitoire thermique 58
3.1.3 À l'échelle du milieu géologique et du Callovo-Oxfordien en grand 61
3.1.4 À l'échelle du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA 61
3.1.5 À l'échelle du quartier de stockage MA-VL 63
3.1.6 Dans le reste du stockage 65
3.2 Le transitoire hydraulique/gaz dans l'installation souterraine 67
3.2.1 Le transitoire hydrique et gazeux au sein des ouvrages pendant la phase de fonctionnement 67
3.2.2 Après fermeture, un transitoire de resaturation couplé à la production de gaz 71
3.2.3 Le retour vers un nouvel équilibre : l'état saturé 75
3.3 L'évolution chimique des ouvrages et du milieu géologique environnant 78
3.3.1 L'évolution géochimique du Callovo-Oxfordien 79
3.3.2 L'évolution chimique des ouvrages cimentaires (galeries, alvéoles MA-VL) 80
3.3.3 L'évolution chimique des alvéoles HA 82
3.4 L'évolution mécanique des ouvrages et du milieu géologique environnant 86
3.4.1 L'évolution mécanique du milieu géologique en grand sur le site d'implantation des ouvrages souterrains de l'INB 87
3.4.2 L'évolution mécanique des ouvrages 88
3.4.3 Les ouvrages de fermetures 101

4. Le relâchement et le transfert des radionucléides 105
4.1 Le comportement des colis 106
4.1.1 Les colis de déchets HA 106
4.1.2 Les colis de déchets MA-VL 109
4.2 Le transfert des radionucléides 111
4.2.1 Dans les composants ouvragés 111
4.2.2 Dans le Callovo-Oxfordien et les encaissants jusqu'aux exutoires 120
4.2.3 Dans les encaissants jusqu'aux exutoires 123

5. Les incertitudes résiduelles 125
5.1 Le site 127
5.1.1 La perméabilité en grand du Callovo-Oxfordien 127
5.1.2 Les propriétés de diffusion et de rétention du Callovo-Oxfordien 128
5.1.3 La surpression interstitielle naturelle dans le Callovo-Oxfordien 130
5.1.4 L'évolution future du site 130
5.2 Les grands transitoires 131
5.2.1 Le transitoire thermique 131
5.2.2 Le transitoire hydraulique/gaz 132
5.2.3 Le transitoire chimique 133
5.2.4 L'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrain 139

Tableau de traçabilité des principales évolutions 145

Tables des illustrations 147

Références bibliographiques 151

Préambule

L'implantation de l'INB Cigéo dans le milieu naturel (surface et fond, notamment la formation du Callovo-Oxfordien) implique la compréhension de l'évolution des composants naturels et ouvragés qui constituent le système de stockage ainsi que leurs éventuelles interactions avec, pour finalité, la maîtrise des conditions de relâchement puis de transfert des radionucléides et des substances toxiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère.

Comprendre l'évolution du stockage, c'est ainsi appréhender le fonctionnement d'un système qui fait intervenir différents phénomènes physiques, différents composants et nécessite de prendre en considération la spécificité des grandes échelles de temps (le million d'années par convention) en rapport avec la décroissance de la radioactivité des déchets à vie longue concernés et des échelles d'espace multiples (depuis le composant de dimension centimétrique jusqu'à la géosphère qui constitue l'environnement du stockage et ceci en rapport avec l'espace occupé par le stockage).

En visant à appréhender les grands déterminants et les grandes tendances des processus phénoménologiques, la description de l'évolution phénoménologique du stockage repose sur le meilleur état des connaissances scientifiques et technologiques pour l'ensemble des domaines concernés. Elle s'appuie en particulier sur les travaux de reconnaissance et de caractérisation menés sur le site de Meuse/Haute-Marne depuis 1994 (forages, campagne géophysique, etc.), sur les données issues du Laboratoire de recherche souterrain, sur les analyses, expérimentations développées à différentes échelles (échantillons, maquettes, démonstrateurs…), des simulations numériques et des analogues naturels. Enfin, les travaux similaires conduits par les homologues de l'Andra et, de manière plus générale, les connaissances acquises au travers de problématiques autres que celles du stockage, viennent enrichir l'analyse de l'Andra.

La description de l'évolution phénoménologique du système de stockage repose donc sur une base de connaissances scientifiques et techniques solides de part notamment la différence et l'indépendance des arguments justificatifs afin d'apporter une compréhension aussi robuste que possible de l'histoire future du stockage.

Les différentes itérations de sûreté qui ont jalonné le développement du projet ont ainsi conduit à établir des grands principes directeurs et des exigences desquelles ont découlé les dispositions de conception retenues pour les ouvrages objets de la demande d'autorisation de création. Ces principes visent à limiter autant que possible les perturbations physiques et physico-chimiques (ainsi que leurs couplages) induites au sein du stockage ou en interface avec la formation du Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes, rendant la description multiphysiques (temps/espace) plus facile à quantifier.

Cette approche conduit donc à une représentation d'ensemble plus aisément appréhendable permettant de décrire l'évolution du stockage avec un bon niveau de confiance. Néanmoins, la description de l'histoire phénoménologique, étant donné les échelles de temps concernées, ne prétend pas constituer une prédiction. C'est pourquoi l'analyse s'attache à dessiner avec prudence et avec les nuances nécessaires le fonctionnement sous forme d'un domaine des possibles pour préciser les variations envisageables au regard notamment des incertitudes résiduelles.

1

Un site d'implantation et des principes directeurs de conception concourant à une maîtrise des grands traits de l'évolution du système de stockage sur le long terme

1.1 Un environnement géologique simple, à l'écart de grands accidents géologiques et s'inscrivant dans le contexte connu du Bassin parisien 10

1.2 Les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien comme formation d'accueil des ouvrages souterrains 12

1.3 Des formations encaissantes qui prennent le relai de la formation du Callovo-Oxfordien et complètent la performance du système de stockage 18

1.4 Des principes directeurs et des choix de conception préservant les propriétés favorables des composants et facilitant la maîtrise de la description de l'évolution phénoménologique du stockage 18

1.5 Des échelles de temps et d'espace des processus majeurs qui concourent naturellement à une simplification et une maîtrise de l'évolution phénoménologique du stockage et des environnements géologiques 32

La compréhension de l'évolution phénoménologique[1] du système de stockage constitue un des socles de la démonstration de sûreté conformément à la démarche présentée au volume 2 du présent rapport. En effet, même si au regard des échelles de temps considérées, cette évolution ne peut être déterminée avec une précision absolue, elle peut néanmoins être approchée dans son ensemble avec les marges de variation possibles selon un schéma robuste aux incertitudes résiduelles. Cela permet ainsi aux analyses de sureté d'en extraire une représentation plus schématique, en introduisant dans une démarche prudente des degrés de conservatisme supplémentaires.

La conception générale de l'installation souterraine s'appuie sur des fonctions de sûreté. Son fonctionnement fait intervenir des phénomènes physiques et chimiques variés, potentiellement couplés et intervenant :

- sur des échelles de temps contrastées (depuis la phase de construction initiale jusqu'à des temps en rapport avec la décroissance de la radioactivité des déchets une fois l'installation fermée définitivement, soit environ un million d'années) ;
- sur des échelles d'espace multiples.

Les dispositions de conception au sens large (architecture, choix de concepts, choix des matériaux, dimensionnement...) tirent parti de caractéristiques favorables du milieu géologique hôte, le Callovo-Oxfordien, et contribuent à limiter la complexité des phénomènes et les incertitudes sur l'évolution du stockage et du milieu géologique environnant.

La description de l'évolution phénoménologique du stockage repose sur le meilleur état des connaissances scientifiques et technologiques, pour l'ensemble des domaines concernés, acquises depuis près de 30 ans au fur et à mesure des itérations de conception et de sûreté. Elle s'appuie en particulier sur les travaux de reconnaissance et de caractérisation menés sur le site de Meuse/Haute-Marne depuis 1994 (forages, campagne géophysique, etc.), sur les données issues du Laboratoire de recherche souterrain, sur les analyses, expérimentations développées à différentes échelles (échantillons, maquettes, démonstrateurs...) et des simulations numériques. Enfin, les travaux similaires conduits par les homologues de l'Andra et, de manière plus générale, les connaissances acquises dans les domaines autres que celui du stockage géologique, viennent enrichir les résultats des recherches menées par l'Andra.

LES DIFFÉRENTES ÉCHELLES DU SITE

Différents termes sont utilisés pour faire référence à l'échelle du domaine d'étude ou aux extensions géographiques.

Le Bassin de Paris est l'ensemble sédimentaire s'étendant d'est en ouest de la Lorraine à la Normandie et, du sud au nord, du Poitou au nord de la France.

Le secteur de Meuse/Haute-Marne correspondant à une zone d'environ 40 km d'est en ouest et 60 km du nord au sud autour du Laboratoire de recherche souterrain. Le secteur est limité à l'est, au sud et à l'ouest respectivement par le fossé de Gondrecourt et les failles de la Marne.

La zone de transposition (ZT) est définie comme la superficie sur laquelle les propriétés du Callovo-Oxfordien sont similaires à celles déterminées sur le site du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et à l'écart des grands accidents et failles de rejet supérieures à 2-4 mètres reconnus (cf. Fiche 2.2 « Le cadre structural du Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). Elle représente une extension de l'ordre de 250 km^2.

[1] La phénoménologie du système de stockage se définit ici comme l'analyse et la description des phénomènes gouvernant l'évolution de l'installation souterraine. Cette description est basée sur un socle de connaissances capitalisant plus de 25 ans de données brutes, structurées et interprétées et des « modèles conceptuels ». Sur la base de la meilleure connaissance disponible, ce socle rend compte de manière intégrée de l'histoire passée du site hôte et de la projection future de l'évolution du système de stockage.

Pour étudier l'implantation de l'installation souterraine, l'Andra a proposé en 2009 au Gouvernement une zone d'intérêt pour la recherche approfondie (ZIRA) de 30 km² environ située au sein de la zone de transposition (2). Sur le plan technique, les critères techniques pris en compte sont liés à la sûreté et à la géologie (épaisseur de la couche, profondeur, orientations des contraintes mécaniques naturelles…). Des critères liés à l'aménagement du territoire et à l'insertion locale ont également été pris en compte (compatibilité avec une implantation de la descenderie dans la zone limitrophe Meuse/Haute-Marne et avec une implantation potentielle des puits d'accès dans une zone boisée, éviter une implantation sous les zones urbanisées des villages...).

La zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) de l'INB Cigéo est un bloc de roche qui permet d'accueillir ses ouvrages souterrains. Sa surface projetée est d'environ 29 km². Le bloc de roche constitué par la ZIOS englobe tous les ouvrages souterrains, y compris les puits et les descenderies.

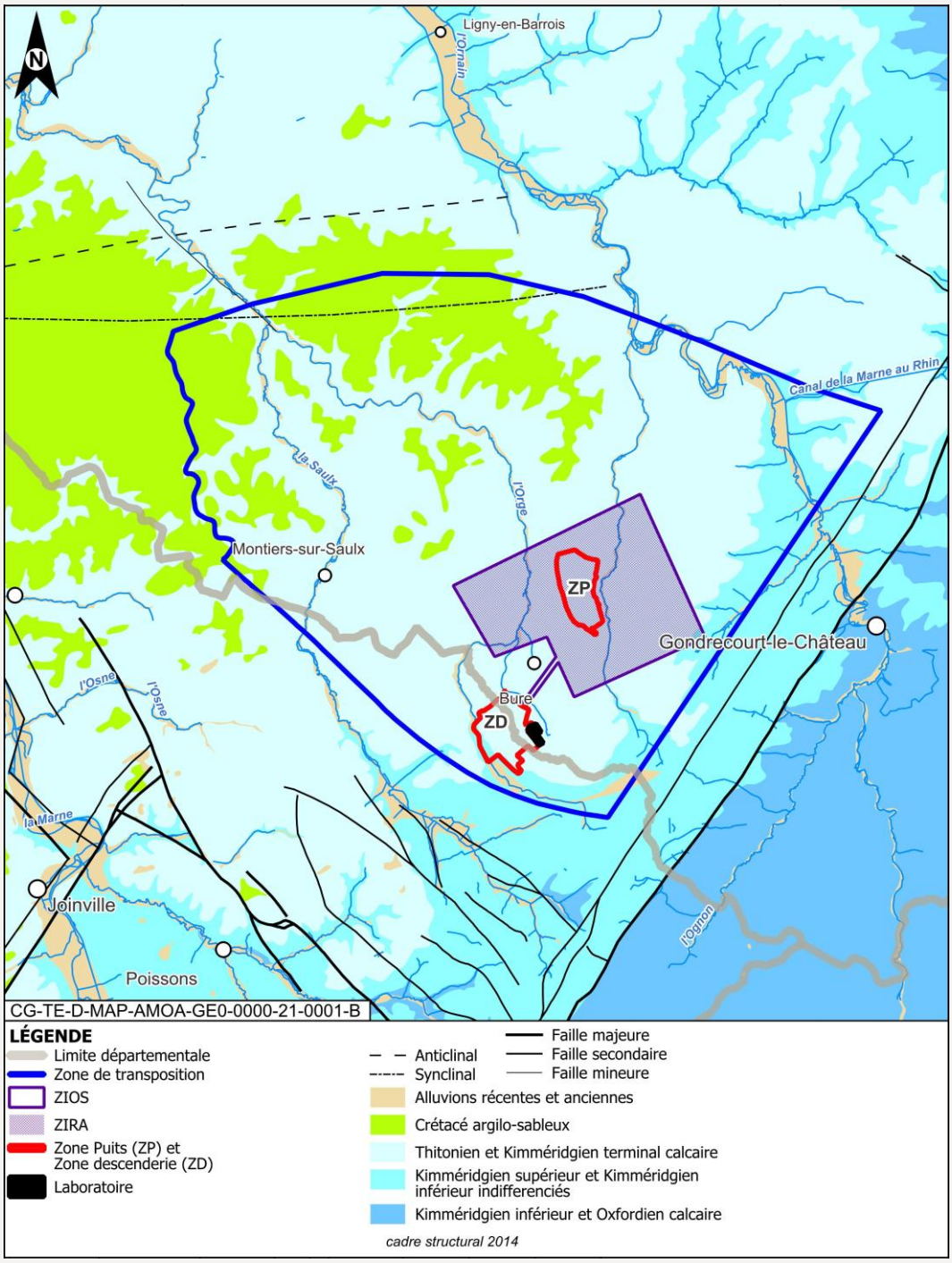


Figure 1-1 Les différentes échelles du site

1.1 Un environnement géologique simple, à l'écart de grands accidents géologiques et s'inscrivant dans le contexte connu du Bassin parisien

Géologiquement, le site de Meuse/Haute-Marne (cf. Volume 4 « Le site et son environnement » du présent rapport) appartient à la bordure orientale du Bassin parisien. Il se compose verticalement d'une succession de couches sédimentaires, déposées entre 250 millions et 135 millions d'années avant l'ère actuelle.

La structure actuelle du Bassin s'est formée progressivement durant l'ère tertiaire (-65 millions d'années) à la suite de différentes phases tectoniques (phase compressive pyrénéenne, phase d'extension de l'Oligocène et phase compressive alpine). Depuis, elle est peu affectée par la tectonique. Il s'agit d'une zone remarquable de la plaque ouest européenne, où la lithosphère présente une épaisseur uniforme, et qui se distingue par son caractère **pratiquement asismique** (cf. Fiche 2.2 « Le cadre structural du Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

La série sédimentaire présente **un pendage régulier** d'environ 1 à 1,5 degré vers le nord-ouest, en direction du centre du Bassin parisien, complétée par une ondulation de faible amplitude orientée est-nord-est/ouest-sud-ouest.

Deux grandes familles de failles encadrent le secteur de Meuse/Haute-Marne (cf. Figure 1-2) :

- les failles délimitant les fossés de Joinville au sud-ouest du secteur et de Gondrecourt au sud-est du secteur : elles ne s'enracinent pas dans le socle hercynien, découpent d'étroits fossés rectilignes dans la couverture sédimentaire jurassique et s'amortissent en profondeur dans les formations de base de la couverture sédimentaire (sel du Trias et argilites du Permien) ;
- les failles de la Marne, correspondant à des accidents de socle[2].

À l'ouest du secteur, ce système de failles régionales est subdivisé en failles de petite dimension et forme une zone dite de fracturation diffuse avant de disparaître vers le sud-est, au-delà du fossé de Gondrecourt (cf. Fiche 2.2 « Le cadre structural du Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

[2] Faille s'enracinant en profondeur créée lors d'épisodes tectoniques très anciens

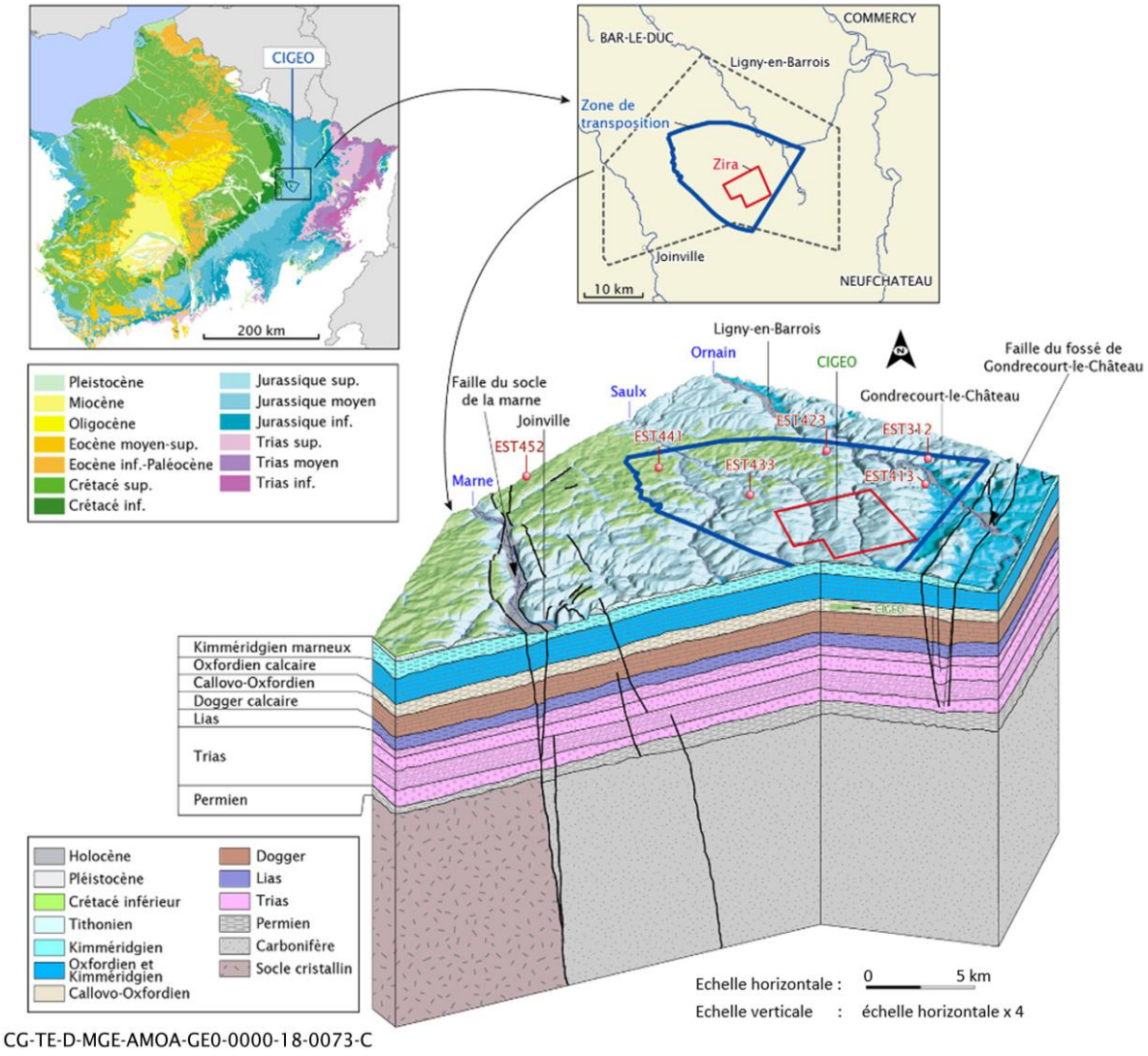


Figure 1-2 Bloc diagramme géologique 3D du site de Meuse/Haute-Marne

1.2 Les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien comme formation d'accueil des ouvrages souterrains

1.2.1 Les propriétés favorables à l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien en grand

1.2.1.1 Une formation d'accueil exempte d'hétérogénéités structurales

L'examen détaillé de 350 km de profils sismiques sur le secteur montre que les déformations tectoniques qui ont affecté la région depuis 150 millions d'années sont faibles et se limitent aux grandes structures présentes en bordure de la zone de transposition[3] (fossé de Gondrecourt et fossé de la Marne). Entre ces structures, le Callovo-Oxfordien est régulier et à faible pendage.

Au regard des résultats des investigations menées par l'Andra (sismiques 2D et 3D, forages, notamment les forages déviés dans le Callovo-Oxfordien aux abords du Laboratoire de recherche souterrain), aucune structure profonde majeure (de rejet supérieur à 20-25 mètres, voire 40 mètres), susceptible de se propager vers la surface, n'a été identifiée au droit de la ZT, et plus particulièrement sous la ZIRA ou secondaire (de rejet supérieur à 2-4 mètres et d'extension plurikilométrique) n'a été observée sur la zone de transposition aussi bien dans le Callovo-Oxfordien que ses encaissants (Dogger, Oxfordien carbonaté et Kimméridgien).

Au niveau du Laboratoire de recherche souterrain, les forages déviés n'ont traversé aucune faille mineure (extension de quelques centaines de mètres maximum et rejet vertical 2 mètres à 4 mètres inférieurs au seuil de détection des méthodes de sismique réflexion 2D et 3D, malgré leur orientation perpendiculaire aux deux directions structurales et leur longueur cumulée subhorizontale de plus de 1 500 mètres). De même, les galeries du Laboratoire de recherche souterrain dont la longueur cumulée est d'environ 2 000 mètres à ce jour, n'ont traversé aucune faille mineure (cf. Fiches 2.2 « Le cadre structural du Callovo-Oxfordien » et 2.18 « L'effet d'un séisme sur le milieu géologique sur le prochain million d'années » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

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

Situées à l'intérieur du bloc délimité par les grandes familles de failles qui encadrent le secteur de Meuse/Haute-Marne, **la zone d'implantation des infrastructures souterraines (ZIOS) constitue un domaine exempt de failles détectables dans la formation du Callovo-Oxfordien et ses encaissants**, comme démontré aussi bien par les travaux de cartographie de surface que par les campagnes de sismique réflexion sur la ZIRA.

[3] Zone au sein de laquelle la couche du Callovo-Oxfordien présente des propriétés physiques et chimiques similaires à celles observées au niveau du Laboratoire de recherche souterrain. Sa superficie est d'environ 250 km^2.

1.2.1.2 Une formation épaisse et sous couverture profonde

Les campagnes de reconnaissance (forages, sismiques 2D et 3D) ont permis d'obtenir une image précise du site en volume. Elles ont confirmé que la formation du Callovo-Oxfordien est régulière et épaisse et une géométrie conforme à l'histoire des dépôts qui se sont succédé au Callovo-Oxfordien. Les limites du Callovo-Oxfordien ont été reconnues précisément grâce aux nombreux forages et lignes sismiques (sismiques 2D et 3D) répartis de manière homogène sur tout le secteur :

- sur la zone de transposition, son épaisseur augmente de 130 mètres à 162 mètres du sud-ouest vers le nord-est selon la principale direction des apports de sédiments ;
- sur la zone d'implantation des ouvrages souterrains, elle est comprise entre 142 mètres à 162 mètres du sud-ouest vers le nord, conformément à la principale direction des apports de sédiments (cf. Fiche 2.1 « La pile sédimentaire » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Le Callovo-Oxfordien est surmonté d'une succession de formations calcaires (Oxfordien, calcaires du Barrois) et argileuse (Kimméridgien) (cf. Chapitre 2 du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). Sa profondeur, supérieure à 400 mètres, est suffisante pour ne pas l'exposer directement à très long terme aux phénomènes d'érosion et, ce dans un contexte géodynamique (interne et externe) peu actif, tout en étant compatible avec la construction (cf. « Dossier de justification des choix d'architecture souterraine » (3)) et le bon fonctionnement d'un stockage à court et à long terme (dimensionnement accessible et raisonnable des ouvrages souterrains) (cf. Chapitre 2 du présent volume).

1.2.1.3 Une formation de grande continuité lithologique latérale

La description des variations de faciès de la formation du Callovo-Oxfordien, très bien connue régionalement et dépendant essentiellement de ses conditions de dépôt, a été établie facilement sur tous les forages réalisés dans la zone de transposition et au-delà, à partir de l'observation des carottes ou des mesures *in situ* en forages.

L'analyse géostatistique quantitative de la variabilité des propriétés physiques mesurées en diagraphies et des données minéralogiques et sédimentologiques observées sur échantillons montre que, latéralement, la formation du Callovo-Oxfordien présente la même organisation de faciès et minéralogique verticale sur une zone de plus de 350 km^2 englobant le site d'implantation de l'INB. Cette organisation est quasi identique dans tous les forages situés dans un rayon de 15 km autour du Laboratoire de recherche souterrain (cf. Fiche 2.4 « Le cadre pétrographique du Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Ces analyses permettent de proposer une représentation verticale du Callovo-Oxfordien en trois grandes unités géologiques reconnues sur l'ensemble des forages réalisés sur la zone de transposition, qui sont de bas en haut (cf. Chapitre 1.6.2 du volume 4 du présent rapport) :

- une unité épaisse à dominante argileuse (UA) : d'une épaisseur variant entre 100 mètres et 120 mètres représentant les 2/3 inférieurs de la formation, l'unité argileuse UA représente l'intervalle le plus homogène (avec des variations minéralogiques et pétrophysiques de faibles amplitudes) et le plus argileux (plus de 40 % en moyenne). Elle intègre le repère inférieur oolithique (RIO) plus carbonaté et peut être scindée en trois sous-unités aux variations ténues et progressives (UA1, U2 et UA3). La sous-unité UA2 correspond au niveau stratigraphique où la teneur en argile est la plus élevée dans laquelle les ouvrages de stockages de l'INB sont à implanter ;
- une unité de transition (UT) : cette unité constitue le terme de passage entre les niveaux principalement argileux caractéristiques de l'unité argileuse et les niveaux plus silto-carbonatés (USC) observées dans la partie supérieure de la formation. Ses propriétés minéralogiques et pétrophysiques sont plus variables latéralement ;

- une unité silto-carbonatée (USC) : d'une épaisseur variant de 20 mètres à 40 mètres d'épaisseur, cette unité se caractérise par des niveaux dont la composition minéralogique est plus contrastée (des évolutions de la teneur en carbonates de 40 % à 90 % très localement) dues aux alternances lithologiques observées (marnes et siltites carbonatées). Elle intègre le RIO et peut être scindée en deux sous-unités (USC 1 et USC 2). L'enrichissement progressif en carbonates dans cette unité marque l'installation de la plateforme carbonatée de l'Oxfordien supérieur (cf. Fiche 2.5 « La profondeur et l'épaisseur du Callovo-Oxfordien sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

1.2.1.4 Des gradients hydrauliques faibles et un mode de transfert dominant par diffusion à travers la formation en grand

Les gradients de charge hydrauliques verticaux dans le Callovo-Oxfordien sont faibles, inférieurs à 0,1 m/m en valeur absolue à l'actuel sur l'ensemble de la zone d'implantation des ouvrages souterrains.

L'analyse des caractéristiques hydrauliques (faibles perméabilités et faibles gradients de charge) et des traceurs isotopiques naturels du Callovo-Oxfordien (faibles coefficients de diffusion) ainsi que la répartition naturelle de certains solutés (ions, gaz dissous et isotopes) dans le Callovo-Oxfordien concourent à conclure que la diffusion est le processus de transfert dominant des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien. Il s'agit d'un transfert très lent du fait des faibles coefficients de diffusion (cf. Fiche 3.14 « Le transfert des radionucléides depuis le stockage jusqu'à la biosphère sur le prochain million d'années » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Ces faibles gradients hydrauliques associés aux épaisseurs importantes de la formation (cf. Chapitre 1.2.1.2 du présent volume) et à ses faibles propriétés diffusives (cf. Chapitre 1.2.2 du présent volume) impliquent des temps de transfert de solutés par diffusion à travers la couche de plusieurs centaines de milliers d'années.

1.2.2 Les propriétés favorables des argilites du Callovo-Oxfordien en tant que matériau vis-à-vis du confinement

Les propriétés des argilites, en tant que matériau, sont la conséquence de sa composition minéralogique et de l'agencement des minéraux. Ces argilites sont principalement constituées :

- **de minéraux argileux** qui sont des cristaux microscopiques composés de feuillets constitués de couches d'atomes d'oxygène et de silicium et aluminium. Ces feuillets, chargés négativement, ont des capacités d'interactions fortes avec les éléments chimiques en solution (notamment certains radionucléides et substances toxiques chimiques que l'on retrouve dans les déchets). Ces derniers peuvent ainsi être retenus à la surface ou à l'intérieur des feuillets ;
- **de carbonates**, essentiellement de la calcite ($CaCO_3$), qui régulent par effet tampon les équilibres acido-basiques et maintiennent un pH proche de la neutralité ;
- **de grains quartz** (SiO_2) qui jouent un rôle important vis-à-vis de la résistance mécanique et la conductivité thermique (cf. Fiche 2.4 « Le cadre pétrographique du Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Enfin, la composition chimique de l'eau interstitielle de la roche (eau présente en faible quantité et piégée dans les pores de dimension nanométrique de la roche) est en équilibre avec les constituants minéralogiques (eau sodique calcique à pH proche de la neutralité et réductrice) (cf. Chapitre 2.12 du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). Dans ces conditions chimiques, de nombreux radionucléides (les actinides) présentent une très faible solubilité dans l'eau, et précipitent sous forme solide au-delà d'une concentration limite ce qui s'oppose à leur transfert dans la roche (cf. Fiche 2.1.4 « Les propriétés de transfert des solutés dans le Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

1.2.2.1 Une très faible perméabilité héritée de leur structure porale

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

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

- la perméabilité du Callovo-Oxfordien en grand de la ZIOS est très faible, ce qui s'explique notamment par les différents matériaux constitutifs des argilites et les très petits diamètres de pores ;
- aucune variabilité verticale ou latérale significative de la perméabilité n'est observée à l'échelle du Callovo-Oxfordien, en regard de l'incertitude de mesure pour les essais *in situ* et sur échantillons, avec la méthode « *pulse test* » ;
- compte tenu des incertitudes expérimentales et de la variabilité, ces mesures *in situ* et sur échantillons fournissent des valeurs locales de la perméabilité horizontale de l'argilite avec une distribution statistique de ces données qui suit une distribution log-normale dans la gamme 10^{-15}-10^{-12} m/s présentant une moyenne géométrique de la perméabilité intrinsèque de l'ordre de 3×10^{-13} m/s ;
- dans l'unité argileuse, l'anisotropie entre la perméabilité horizontale (Kh) et la perméabilité verticale (Kv) est de l'ordre 3. Ces faibles valeurs de perméabilité sont cohérentes avec la mesure d'une surpression dans le Callovo-Oxfordien au niveau du Laboratoire de recherche souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne, qui témoigne d'une très faible perméabilité en grand du Callovo-Oxfordien (cf. Fiche 2.6 « La perméabilité à l'eau du Callovo-Oxfordien en grand » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

1.2.2.2 Des propriétés de rétention élevées

Les minéraux argileux sont fortement réactifs et contribuent fortement à la capacité de rétention des argilites. Ils possèdent plusieurs types de surfaces réactionnelles qui peuvent retenir les lanthanides et les actinides par interactions électrostatiques et par complexation les éléments chimiques, en particulier les éléments de transition.

Les données de rétention de nombreux radionucléides et substances toxiques chimiques ont été acquises pour les argilites du Callovo-Oxfordien : Na, K, Cs, Rb, Be, Ca, Sr, Ra, Cr, Ni, Fe, Se, Rb, Nb, Zr, Mo, Tc, Sn, B, Eu, Pb, Ra, Th, U, Pu I, Cl et Br. Les résultats expérimentaux peuvent, dans la plupart des cas, être interprétés par un modèle d'adsorption linéaire (modèle Kd).

Les niveaux de rétention mesurés dans le Callovo-Oxfordien dépendent essentiellement de la spéciation aqueuse des radionucléides en particulier de leur état d'oxydation. Ils sont peu variables à l'échelle du Callovo-Oxfordien. Des valeurs de rétention très importantes (Kd supérieurs à 1 m^3/kg) ont été mesurées pour la plupart des actinides et lanthanides majeurs. La plupart des métaux de transition ainsi que l'uranium et le césium présentent des valeurs de rétention élevées (Kd de l'ordre de 0,1 m^3/kg ou plus). Seules certaines espèces anioniques ne présentent pas de rétention dans les argilites (en regard des incertitudes expérimentales), il s'agit du chlore (Cl-), de l'iode (I-) et du sélénium (HSe - et $SeO4^{2-}$).

Le comportement en rétention des différents radionucléides et substances toxiques chimiques est en bon accord avec des phénomènes de rétention dominés par les surfaces argileuses, avec un effet combiné (i) des réactions d'échange d'ions avec les surfaces basales et interfoliaires et (ii) des réactions de complexation de surface avec des groupes fonctionnels situés sur les surfaces de bordure.

Pour les quelques radionucléides sans données expérimentales, la détermination de leur coefficient de partage s'appuie, à partir de l'état de l'art, sur (i) des analogies de matrices minérales (argiles à Opalines), (ii) des analogies de comportement entre les différents radionucléides, (iii) le résultat de modélisations géochimiques supportées par un ensemble de données expérimentales (cf. Fiche 2.15 La migration des radionucléides et des toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

1.2.2.3 Un potentiel de gonflement propice à une autocicatrisation des argilites

L'endommagement localisé au pourtour des ouvrages souterrains excavés se traduit par l'apparition de fractures en cisaillement en avant du front de creusement, et des fractures en extension après le passage du front. Cet endommagement mécanique conduit à des perméabilités initiales (*i.e.* À court terme) de la zone endommagée modifiées par rapport à celle des argilites non endommagées, plus particulièrement en champ très proche de la paroi de ces ouvrages. Cependant, les mesures hydrauliques faites dans la zone endommagée autour des ouvrages réalisés dans le Laboratoire de recherche souterrain montrent une diminution progressive des perméabilités dans le temps. Celles-ci peuvent ainsi diminuer de plusieurs ordres de grandeurs et tendent vers celles des argilites saines[4], même dans la zone la plus fracturée en paroi des excavations. Ce phénomène, dit de cicatrisation hydraulique, est aussi observé sur échantillons en laboratoire, y compris pour des fractures d'ouverture millimétrique. Les analyses faites à très petite échelle au niveau des fractures montrent le rôle joué dans la cicatrisation hydraulique par les minéraux smectites contenus dans les argilites, du fait de leur gonflement en présence d'eau qui assure ainsi un effet de colmatage des fractures. À cela peuvent s'ajouter les contraintes mécaniques qui aident à la fermeture mécanique des fractures, et favorisent ainsi leur colmatage (cf. Fiche 3.10 « La cicatrisation hydraulique du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrain » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

[4] Non perturbées par le creusement

1.2.2.4 Les argilites du Callovo-Oxfordien : un matériau naturel tolérant vis-à-vis de perturbations induites par le stockage

Au-delà des propriétés et caractéristiques du Callovo-Oxfordien, tant à l'échelle de la couche en grand sur la ZIOS que des caractéristiques intrinsèques du matériau, les argilites du Callovo-Oxfordien présentent également des propriétés leur permettant de « s'accommoder » des perturbations induites par le stockage. On retient en particulier :

- une résistance aux sollicitations à une pression fluide (eau ou gaz) élevée : les données acquises, notamment en forage *in situ* au niveau du Laboratoire de recherche souterrain, soulignent une capacité à ne pas propager de fracturation cohérente avec les valeurs des contraintes naturelles mineures *in situ ;*
- un matériau peu réactif en température sous l'effet de la charge thermique transitoire et limitée par conception (cf. Chapitre 1.4.4 du présent volume). Les transferts de chaleur dans les argilites n'induisent pas d'effets irréversibles significatifs à l'échelle de la formation sur les transformations minéralogiques des argilites ou les contraintes thermomécaniques, ainsi que sur leurs conséquences sur les propriétés hydrauliques et chimiques ;
- un effet « tampon » vis-à-vis des perturbations géochimiques limitées aux interfaces avec les matériaux ouvragés.

Pour répondre à l'objectif de protéger sur une très grande durée l'homme et l'environnement des risques associés aux déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue en confinant ces déchets dans une formation géologique profonde afin de s'opposer à la dissémination des radionucléides et substances toxiques chimiques qu'ils contiennent, le site présente les caractéristiques appropriées pour assurer différentes fonctions de sûreté.

Tout d'abord, le stockage en profondeur met les déchets à l'abri des phénomènes d'érosion, des aléas climatiques et des activités humaines conventionnelles qui n'affectent, à l'échelle de centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur superficielle de terrain (quelques dizaines de mètres).

Les travaux sur le site et dans le secteur du Laboratoire de recherche souterrain ont permis de recueillir de nombreuses informations scientifiques et d'acquérir une compréhension fine de l'environnement géologique de ce site pour s'assurer que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien présente les propriétés favorables attendues, et pour évaluer son comportement à long terme, notamment l'effet des perturbations que l'implantation d'un stockage de déchets lui ferait subir. Ces travaux mettent en évidence pour le Callovo-Oxfordien sur la ZIOS :

- l'absence d'hétérogénéité structurale (failles) ;
- une grande continuité latérale et un pendage régulier ;
- un contexte géodynamique peu actif et pratiquement asismique ;
- une épaisseur importante, de l'ordre de 140 mètres, à une profondeur importante, de l'ordre de 500 mètres, l'isolant des phénomènes de surface sur le long terme tout en restant compatible avec la construction et le bon fonctionnement d'un stockage à court et à long terme ;
- des propriétés hydrauliques et de rétention concourant à un transfert lent des solutés (faibles gradients hydrauliques, faible perméabilité, faible porosité, propriétés de rétention élevées pour la plupart des radionucléides…) ;
- un matériaux naturel tolérant vis-à-vis des perturbations induites par le stockage des transformations minéralogiques irréversibles en température très faibles, une capacité de la roche hôte à s'auto-cicatriser, un effet tampon chimique et une grande résistance aux sollicitations mécaniques couplées (hydrauliques, gaz, thermo-hydromécanique).

1.3 Des formations encaissantes qui prennent le relai de la formation du Callovo-Oxfordien et complètent la performance du système de stockage

Une fois les limites du Callovo-Oxfordien atteintes, les radionucléides migrent dans les formations encaissantes sus et sous-jacentes du Callovo-Oxfordien vers les exutoires naturels, selon les modalités suivantes (cf. Fiche 3.14 « Le transfert des radionucléides depuis le stockage jusqu'à la biosphère sur le prochain million d'années » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :

- le transfert convectif lent dans l'Oxfordien et le transfert diffusif combiné dans les formations peu perméables de l'Oxfordien (séries grises) et du Kimméridgien, entraîne une atténuation et un retard supplémentaire significatifs jusqu'aux exutoires de surface. Les débits molaires atteignant le Barrois sont atténués d'un facteur 300 après 1 million d'années, avec un retard de plusieurs centaines de milliers d'années ;
- le transfert convectif et diffusif dans les formations du Dogger depuis le mur du Callovo-Oxfordien vers l'exutoire de pompage (zone de fracturation diffuse) permet de bénéficier d'une atténuation d'un facteur d'environ cinq sur les débits molaires, essentiellement par rétrodiffusion des solutés depuis les formations transmissives du Dogger vers les formations moins perméables.

1.4 Des principes directeurs et des choix de conception préservant les propriétés favorables des composants et facilitant la maîtrise de la description de l'évolution phénoménologique du stockage

Les principes de conception reposent sur des choix ayant pour objet une simplification des phénomènes pouvant intervenir dans l'évolution du stockage et ainsi de leur compréhension et de leur modélisation.

L'architecture compartimentée en zones, quartiers (ou sous-quartiers) puis en alvéoles distincts et éloignés concourt à limiter ou empêcher toute interaction phénoménologique entre zones de stockage et entre alvéoles ou sous quartiers d'une même zone, et donc de facto la complexité de leurs évolutions phénoménologiques.

Par ailleurs, la forte épaisseur et les propriétés intrinsèques de la couche de Callovo-Oxfordien et la présence des scellements qui « ferment » hydrauliquement le stockage, ont pour conséquence d'empêcher ou de limiter une organisation spatiale complexe de l'évolution phénoménologique du système de stockage et des milieux encaissants. Les alvéoles et les quartiers de stockage constituent donc autant de motifs élémentaires qui se répètent dans l'espace pour constituer ensemble l'évolution phénoménologique globale d'une zone de stockage et de son milieu géologique environnant.

1.4.1 Une architecture implantée en profondeur et sur un seul niveau

L'architecture implantée en profondeur permet en premier lieu d'isoler les déchets et les composants ouvragés du système de stockage des perturbations affectant la surface (notamment l'érosion) et à les rendre indépendantes des grandes évolutions futures.

Sur la ZIOS, la profondeur du Callovo-Oxfordien, et de l'installation souterraine à environ 500 mètres, bien en deçà des 200 mètres[5], protège le système de stockage sur le long terme des phénomènes d'érosion, de l'effet de surface d'un séisme, ou d'une intrusion humaine involontaire depuis la surface. Cette profondeur garantit la satisfaction de la fonction « *isoler les déchets de l'homme et de la biosphère* » telle que définie dans le guide de sûreté de l'ASN (4).

La géométrie du Callovo-Oxfordien en couche sub-plane (faible pendage) et son épaisseur d'environ 140 mètres à 160 mètres sur la ZIOS permettent d'y accueillir les ouvrages souterrains et, associées à une architecture planaire de cette dernière, et de conserver au-dessus et en-dessous des gardes de Callovo-Oxfordien ayant des épaisseurs importantes, supérieures à 50 mètres[6] (cf. Fiche 2.5 « La profondeur et l'épaisseur du Callovo-Oxfordien sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). Ces épaisseurs font partie intégrante du système de stockage en constituant une barrière à la circulation d'eau[7] et à la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques. Elles contribuent ainsi au confinement des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets sur de longues échelles de temps en constituant une barrière diffusive à la fois vers l'Oxfordien et vers le Dogger et en assurant pour les éléments mobiles des temps de transferts très long à travers le Callovo-Oxfordien.

Les limites géométriques et les profondeurs du Callovo-Oxfordien sont bien définies, identifiées dans la zone d'implantation grâce à la sismique 3D et aux corrélations avec les nombreux forages (cf. Volume 4 du présent rapport).

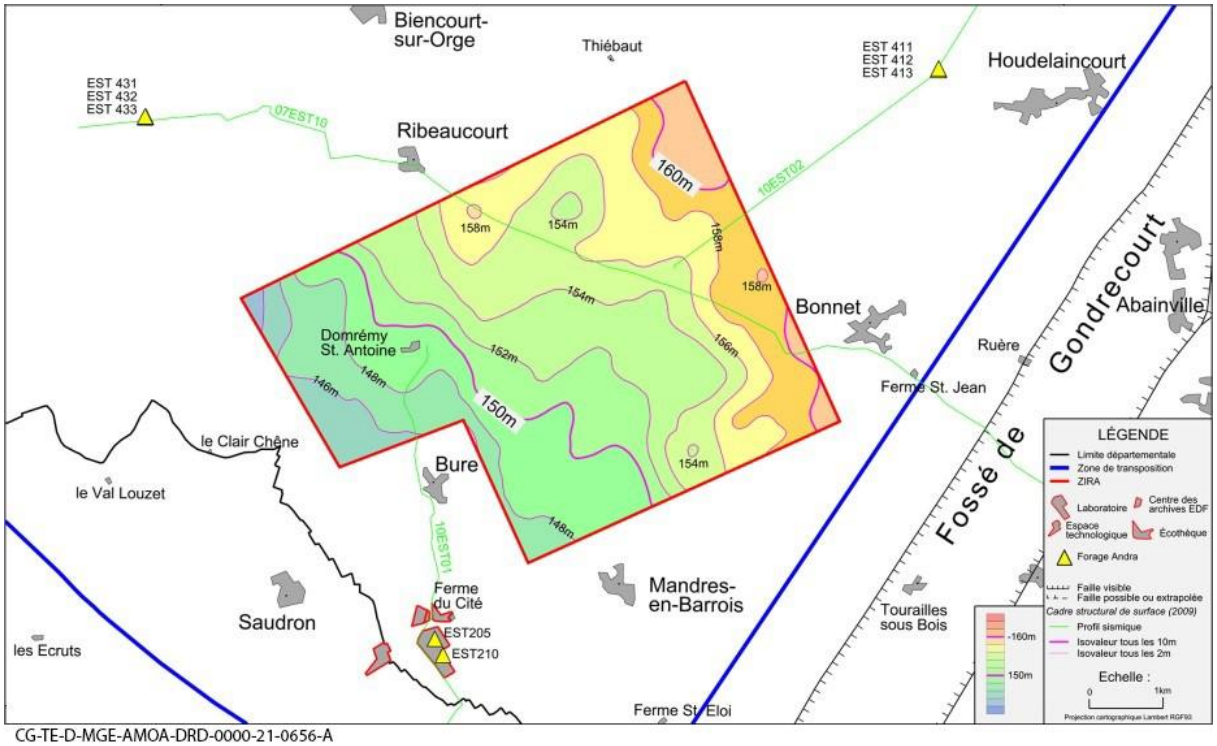
L'extension verticale des ouvrages souterrains, d'ordre décamétrique est faible comparativement à l'épaisseur de la couche de Callovo-Oxfordien, et plus globalement du milieu géologique sus-jacent. En volume, l'installation souterraine de l'INB représente moins du pour-cent du volume de la couche du Callovo-Oxfordien environnante. Par ailleurs, il s'agit d'un objet globalement plan et réparti sur une surface de plus de 10 km^2. En outre, une exigence de conception de ces ouvrages souterrains est de minimiser leurs vides résiduels une fois fermés définitivement. Cela s'entend au niveau des alvéoles de stockage, et dans l'ensemble des galeries et des ouvrages de liaisons surface-fond (puits et descenderies) qui sont remblayés et scellés, de sorte que le volume total de vide résiduel en regard du volume de la couche du Callovo-Oxfordien environnante soit encore plus faible (<0,1 %).

---

[5] Le guide de sûreté de l'ASN de 2008 (4), mentionne que « *l'épaisseur de la zone superficielle pouvant être ainsi perturbée est a priori de l'ordre de 200 mètres* ».

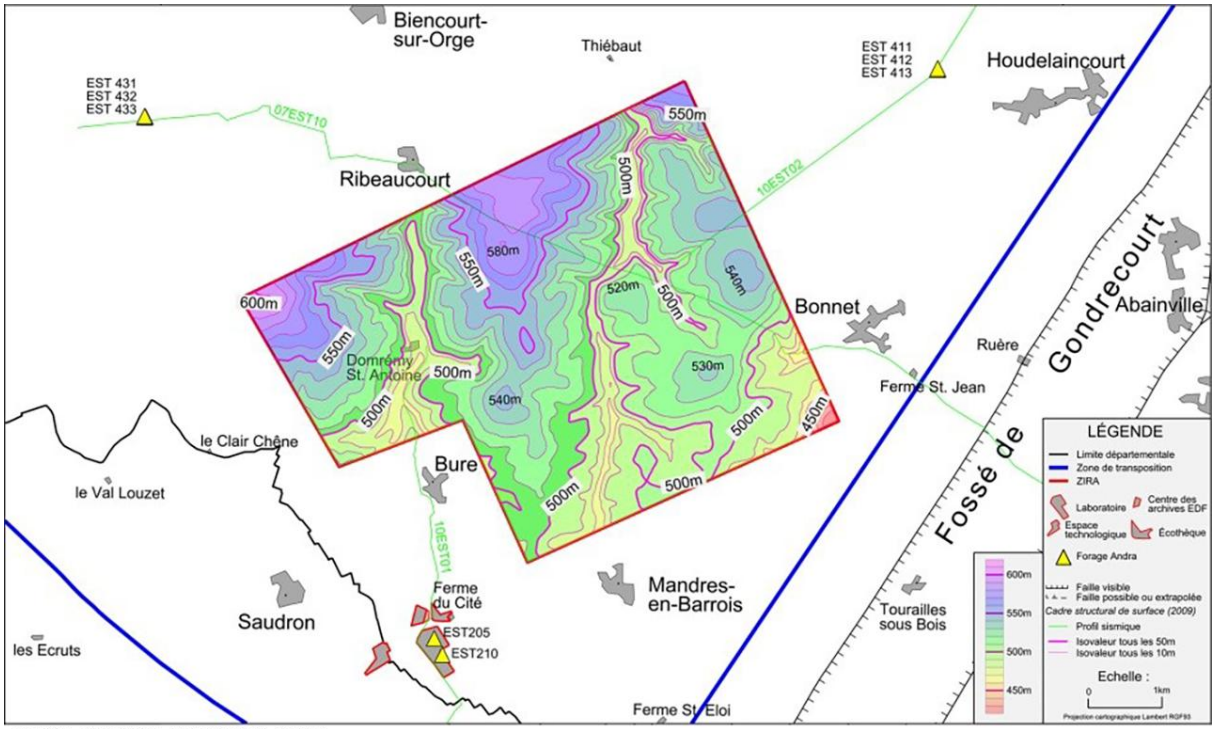
[6] Déduction faire de la zone endommagée par le creusement. On parle alors de garde « saine »

[7] Au regard de ses caractéristiques intrinsèques (faible perméabilité, faire porosité…) et d'un faible moteur hydraulique (gradient de charge).



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0656-A

Figure 1-3 *Épaisseur (mètre) du Callovo-Oxfordien sur la ZIOS (comptée entre les surfaces SNC et LS0) (cf. Fiche 2.5 « La profondeur et l'épaisseur du Callovo-Oxfordien sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1))*



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0657-A

Figure 1-4 *Profondeur (mètre) du milieu géométrique du Callovo-Oxfordien sur la ZIOS (comptée par rapport à la topographie) (cf. Fiche 2.5 « La profondeur et l'épaisseur du Callovo-Oxfordien sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1))*

1.4.2 Une architecture de stockage globalement borgne et élancée

L'architecture souterraine de l'INB permet, dans son organisation générale, de limiter la circulation d'eau dans le stockage et de préserver les épaisseurs de garde sus et sous-jacentes. Plusieurs dispositions y concourent :

- **une architecture de stockage globalement borgne** (alvéoles HA, quartier pilote, quartier (et sous quartiers) de stockage HA, quartier de stockage MA-VL) permet de limiter la circulation d'eau dans le stockage. Dans le cas des alvéoles MA-VL passantes[8], le réseau de galeries qui entoure les alvéoles rétablit une « borgnitude fonctionnelle » (fonctionnement en « cage de Faraday »[9]) en contribuant à égaliser les potentiels hydrauliques aux deux extrémités des alvéoles. Les alvéoles « passants » fonctionnent alors (hors perturbations locales de la charge hydraulique) comme deux demi-alvéoles « borgnes » disposées en opposition ;
- **le regroupement de la base des ouvrages de liaison surface-fond** qui associé à la borgnitude de l'installation souterraine, limite les effets de drain hydraulique des galeries proches des puits et descenderies, et *in fine* le transfert convectif des solutés ;
- par ailleurs, les alvéoles de stockage présentent **un grand élancement**[10] (alvéole MA-VL : de l'ordre de 500 mètres de longueur et 10 mètres environ de hauteur ; alvéoles HA : de l'ordre de 80 mètres à de l'ordre de 150 mètres[11] de longueur et 80 cm environ de diamètre) ce qui permet de limiter la proportion des radionucléides 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 et correspondant au fonctionnement recherché (principe de dominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien).

Ce dispositif est complété par des distances importantes entre les quartiers de stockage et la base des liaisons surface-fond qui permettent d'offrir une surface d'échange supplémentaire avec le Callovo-Oxfordien pour les fractions (très minoritaires) des radionucléides et substances toxiques chimiques susceptibles de migrer hors des alvéoles par la voie ouvrages.

[8] Les alvéoles MA-VL sont passantes pour permettent leur ventilation traversante en pleine section et garantir ainsi la maitrise du risque lié à la production d'hydrogène (le cas échéant) pendant la phase de fonctionnement.
[9] Selon l'analogie électromagnétique
[10] Rapport longueur/diamètre
[11] Sans préjuger des optimisations futures relatives à leur allongement (intégrant le retour d'expérience de l'exploitation du quartier pilote HA et des évolutions technologiques disponibles) qui pourraient être mis en œuvre d'ici sa mise en service envisagée à l'horizon 2080.

1.4.3 La séparation des familles de déchets et des distances de garde importantes entre les zones de stockage qui limitent ou empêchent les interactions physico-chimiques à distance

L'architecture générale présente une compartimentation entre les différentes familles de déchets (HA et MA-VL) au sein de zones de stockages distinctes et physiquement séparées[12] les unes des autres.

Ainsi, l'installation souterraine de l'INB s'organise autour de deux zones de stockages, la zone HA et la zone MA-VL, distantes entre elles de plusieurs centaines de mètres qui leur confèrent une (quasi) indépendance phénoménologique, même sur le long terme.

Au sein de chacune de ces zones, un second niveau de compartimentation est apporté par la segmentation des déchets en sous-quartiers[13] (cas de la zone HA) puis en alvéoles (environ un millier d'alvéoles HA et une vingtaine d'alvéoles MA-VL[14]). En particulier :

- **d'un point de vue thermique**, en raison de la décroissance dans le temps de la chaleur émise par les colis de déchets notamment les colis de verre (déchets les plus exothermiques), et de la forte cinétique de cette décroissance par rapport à la cinétique de propagation de la chaleur, l'influence thermique d'une zone de stockage ne se fait plus ressentir au-delà d'une distance de l'ordre de quelques centaines de mètres, aussi bien suivant la direction verticale que la direction horizontale. Ainsi, compte tenu des distances entre les zones de stockage, l'interaction thermique entre les différentes zones de stockage est limitée à quelques degrés Celsius au maximum (cf. Fiche 3.1 « Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) ;
- **d'un point de vue hydraulique**, les distances entre les zones de stockage HA et MA-VL contribuent (en complément de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et de la présence des scellements de zone qui ferment hydrauliquement les deux zones) à l'absence d'interaction hydraulique entre zones ;
- **d'un point de vue mécanique**, les distances entre ouvrages et entre quartiers de stockage (organisation modulaire) sont suffisantes pour qu'il n'y ait pas d'interaction mécanique entre les différents ouvrages. De plus, à l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien, l'installation souterraine de l'INB est un objet au volume total faible, moins de 1 % du volume de la couche du Callovo-Oxfordien environnante, Ainsi :
  - ✓ chaque zone de stockage suit une évolution mécanique propre indépendamment de celles des autres zones ;
  - ✓ chaque quartier et chaque alvéole de stockage évoluent indépendamment.

  Les perturbations induites par le stockage sont localisées en champ très proche des ouvrages de l'INB, comme l'endommagement mécanique, la redistribution des contraintes mécaniques, alors les alvéoles de stockage (déchets HA, déchets MA-VL), galeries au sens large, scellements et liaison surface-fond peuvent être étudiés indépendamment aussi bien en période de construction et de fonctionnement du stockage qu'après la fermeture à long terme. Plus en détail, certaines spécificités propres à certains ouvrages (comme, par exemple le taux de vide dans les alvéoles MA-VL variable en fonction du mode de stockage[15] et de l'agencement des colis dans la partie utile de l'alvéole) peut conduire à des évolutions différentes mais qui s'inscrivent toutefois dans une tendance globale commune. Par ailleurs, le dimensionnement thermique et le caractère passant au gaz des ouvrages de fermeture permettent de limiter fortement la pression de fluide d'eau et de gaz au sein des ouvrages et ainsi éviter le couplage avec la mécanique du Callovo-Oxfordien en empêchant le risque de propagation d'une fracturation par surpression fluide ;

---

[12] La séparation physique des familles de déchets HA et MA VL en zone distinctes s'accompagne également d'une séparation des galeries qui les dessert ainsi que d'une séparation de leurs réseaux d'utilités (notamment la ventilation).
[13] Les distances entre les quartiers de stockage HA sont de l'ordre de 50 mètres
[14] Les entraxes entre alvéoles MA-VL sont de l'ordre de 50 mètres
[15] Stockage « direct » avec ou sans panier de regroupement ou stockage en conteneurs béton

- **d'un point de vue chimique**, la conception compartimentée du stockage en zones de stockage distinctes par grands types de déchets et en quartier au sein d'une même zone concourt également à des évolutions chimiques (i) indépendantes pour chaque zone et (ii) similaires pour les quartiers et les alvéoles de stockage d'une même zone. Par ailleurs, pour ce qui concerne le quartier de stockage MA-VL, des phénomènes de complexation peuvent modifier la mobilité des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans le système de stockage, en augmentant leur solubilité apparente. Certaines matières organiques, et éventuellement certains sels, contenus dans une partie des colis de déchets MA-VL ou issus de leur dégradation sont susceptibles de former des espèces complexantes de radionucléides et substances toxiques chimiques. Par ailleurs, des sels contenus dans certains déchets MA-VL peuvent modifier les conditions redox dans le Callovo-Oxfordien en champ proche et ainsi de favoriser le transport en solution de certains radionucléides. Aussi, afin de limiter les conséquences des phénomènes précités, l'Andra a défini des dispositions de conception restrictives[16] en matière de costockage : définition des colis de déchets, plus particulièrement MA-VL, susceptibles d'être placés dans un même alvéole et distances minimales entre des alvéoles contenant des types de déchets différents susceptibles d'interagir entre eux (cf. La note « L'évolution chimique des alvéoles MA-VL et du Callovo-Oxfordien en champ proche » (5)).

Cette séparation physique évite ainsi la complexité inhérente aux interactions à distance et à long terme entre déchets de types différents. Cela simplifie ainsi la compréhension des phénomènes et contribue, en particulier, à l'indépendance des différentes zones du stockage, notamment mécanique et chimique et permet d'assurer une quasi-indépendance thermique des zones de stockages HA et MA-VL entre elles.

1.4.4 Des dispositions de conception et des règles de dimensionnement qui concourent à la limitation des perturbations

1.4.4.1 La limitation des niveaux de température (et donc des effets induits) pour préserver les propriétés de confinement de la formation du Callovo-Oxfordien et la durabilité des composants ouvragés

La mise en place des colis de déchets HA (et dans une moindre mesure celle de certains déchets MA-VL faiblement exothermiques), entraîne un transitoire thermique au sein des zones de stockage correspondantes et dans le milieu géologique qui les environne (principalement la couche du Callovo-Oxfordien). Du fait de la décroissance de la chaleur émise par les colis de déchets, cette élévation de température n'est que transitoire : elle augmente avec le remplissage progressif des alvéoles, passe par un maximum, puis décroît jusqu'à ce que le stockage et le milieu géologique environnant retrouvent des températures géothermales naturelles.

La limitation par conception des températures maximales des colis de déchets (et donc corrélativement des effets induits) selon une approche prudente fondée sur l'expérience et tenant compte de la réalité du milieu géologique hôte (variabilité) permet de maintenir le stockage et son environnement géologique dans un domaine de température préservant les qualités naturelles de la couche du Callovo-Oxfordien et aussi de garantir la maîtrise des phénomènes physiques et chimiques (cf. Fiche 3.1 « Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). Elle se traduit concrètement par des espacements entre colis au sein d'une alvéole et entre alvéoles au sein d'un quartier de stockage qui permet de limiter la densité de chargement de manière à garantir le non-dépassement de critères (température, contrainte effective dans le Callovo-Oxfordien) tout en optimisant l'espace occupé par l'installation souterraine.

[16] De telle mesures ne s'appliquent pas aux déchets HA qui sont tous vitrifiés. La nature et la physico-chimie de la matrice vitreuse n'amènent pas à considérer d'interactions physico-chimiques justifiant des dispositions particulières.

1.4.4.1.1 Dans le Callovo-Oxfordien

Pour préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien et maîtriser les effets induits par la chaleur, il convient d'éviter qu'il ne subisse un échauffement trop important. Des processus couplés plus complexes peuvent être générés pour des températures supérieures à 100 °C dans la roche. Il a donc été décidé de retenir une température maximale de 100 °C à respecter pour le Callovo-Oxfordien, avec une marge de 10 °C[17], ce qui conduit à une température cible de dimensionnement de l'installation souterraine de 90 °C, permettant ainsi de prendre en compte les incertitudes sur les propriétés thermiques et les modélisations de l'évolution thermique du stockage et du milieu géologique environnant, notamment le Callovo-Oxfordien.

Par ailleurs la température génère au sein du Callovo-Oxfordien une augmentation de la pression interstitielle[18] qui peut induire des effets mécaniques sur la roche hôte. L'Andra a de fait retenu de dimensionner le quartier pilote HA et les sous-quartiers de stockage HA de manière à éviter un risque de fracturation par surpression hydraulique. Les domaines retenus de manière prudente sont :

- la contrainte effective de Terzaghi[19] (σ_{eff}), avec comme critère σ_{eff} (Terzaghi) < 0 MPa traduisant un fonctionnement de la roche hôte en compression de manière à s'affranchir des phénomènes de rupture en traction ;
- la contrainte de cisaillement suivant un critère de type Hoek et Brown afin de vérifier le risque d'initiation d'un endommagement diffus (seuil d'endommagement) ou de la rupture en cisaillement.

L'approche adoptée par l'Andra consiste en la vérification de l'atteinte ou non de critères de rupture à partir de calculs en thermo-élasticité enveloppe et le choix prudent de valeurs de paramètres thermo-hydro-mécaniques fondée sur des travaux de caractérisation du milieu géologique hôte, aussi bien en vertical qu'en latéral (cf. Fiche 3.2 « Le comportement thermo-hydromécanique du Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Enfin, l'Andra a retenu de vérifier que l'évolution des températures, à l'échelle du Callovo-Oxfordien et jusqu'au million d'années, ne conduit pas à des transformations minéralogiques irréversibles significatives des argilites. En particulier, l'incursion dans un domaine de température supérieur à 70 °C sur une durée limitée (inférieure au millier d'années) permet de limiter les phénomènes d'illitisation (cf. Fiche 3.3 « L'effet du transitoire thermique sur les propriétés physico-chimiques du Callovo-Oxfordien (transformations minéralogiques et équilibres solides-fluides) » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

L'architecture planaire des alvéoles HA est particulièrement favorable à la dissipation de la chaleur des déchets HA dans le Callovo-Oxfordien. Le dimensionnement thermique et thermo-hydromécanique (THM) du quartier pilote et des sous quartiers de stockage HA conduit à espacer les alvéoles et si besoin les colis de déchets stockés dans les alvéoles pour réduire la densité de charge thermique. Cette dernière disposition n'est pas nécessaire pour les colis de stockage HA0 qui sont stockés à « touche-touche » compte tenu de leur puissance thermique moindre (de l'ordre de 35 W/colis) que celle des colis de stockage HA (de l'ordre de 350 W/colis).

---

[17] Sans préjuger des optimisations futures intégrant le retour d'expérience de l'exploitation du quartier pilote HA et les avancées scientifiques qui pourraient être mis en œuvre d'ici la définition du dimensionnement définitif en prévision de la mise en service du quartier HA à l'horizon 2080.

[18] 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 interstitielle et les phases solides des argilites. Suivant les niveaux de pression interstitielle et de contraintes atteints, ainsi que le chemin de chargement thermo-hydro-mécanique suivi (extension, cisaillement…), la combinaison de ces deux augmentations peut conduire à un endommagement des argilites diffus et/ou localisé (fracturation/rupture).

[19] Convention de signe : une contrainte de compression est négative, une contrainte de traction positive

1.4.4.1.2 Dans les bétons

Dans les bétons, les niveaux de température sont également limités par conception. La température doit rester limitée[20] pour préserver les propriétés mécaniques vis-à-vis du risque de réaction sulfatique interne (déjà pris en compte par ailleurs au travers de formulations de béton adaptées). De la même façon, pour tenir compte des incertitudes, une marge est adoptée dans le dimensionnement thermique des ouvrages si bien qu'il est visé, en fonctionnement normal, une température maximale de 65 °C.

1.4.4.2 La limitation des taux de vide pour préserver des épaisseurs importantes de garde saine du Callovo-Oxfordien autour des quartiers de stockage

Les efforts mécaniques dus au comportement différé du Callovo-Oxfordien qui se transmettent au génie civil se traduisent par une convergence du soutènement/revêtement. L'ampleur des déformations du Callovo-Oxfordien en champ proche et des déplacements du soutènement/revêtement est pilotée par le taux de vides des ouvrages et, le cas échéant, par les effets de la température sur le court terme pour les ouvrages concernés (essentiellement le champ proche des alvéoles HA). L'installation souterraine n'est pas susceptible d'entrainer des désordres de grande ampleur à l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien en grand (et du milieu géologique en général, *a fortiori* jusqu'en surface) en raison d'un ensemble de facteurs corrélés propres aux caractéristiques des couches géologiques et aux dispositions de conception tels que :

- l'implantation de l'installation souterraine au sein de la formation du Callovo-Oxfordien à une profondeur d'environ 500 mètres avec des formations sus-jacentes constituées d'une alternance de formations calcaires (Oxfordien carbonaté, Calcaires du Barrois) et de formation argilo-marneuses (Kimméridgien marneux, marnes grises de l'Oxfordien) qui confère des propriétés de résistance mécanique : en particulier, la couche argileuse du Callovo-Oxfordien est constituée d'argilites, une roche sédimentaire indurée à grains fins ayant des caractéristiques mécaniques élevées (résistance à la compression) notamment dans sa partie supérieure plus carbonatée qui présente de ce fait les résistances mécaniques les plus fortes. L'organisation globalement planaire de l'architecture souterraine permet de garantir des distances de garde (saine) importante au droit de l'installation souterraine ;
- l'installation souterraine représente un petit volume par rapport au volume du milieu géologique environnant à son aplomb (inférieure au pour-cent). Par ailleurs, le taux de vide résiduel après fermeture est :
  - ✓ soit limité par conception : dans le cas des alvéoles MA-VL, la limitation des jeux technologiques rendue possible par le béton de forme qui permet d'adapter la géométrie interne de la chambre de stockage à la typologie des déchets qui y sont stockés (dimension des colis de stockage et configuration d'empilement en nombre de colonnes et de rangées) ;
  - ✓ soit limité par les ouvrages de fermeture (remblai ou scellement) des galeries dans le but de limiter les déformations de la formation hôte du Callovo-Oxfordien (et, de ce fait, limiter l'extension des zones endommagées des argilites autour des galeries) lorsque, à long terme, la dégradation du revêtement des ouvrages souterrains ne permet plus de soutenir la roche. Les ouvrages de fermeture assurent ainsi la préservation des propriétés du Callovo-Oxfordien en grand, favorables au confinement des déchets.
- la limitation des niveaux de température dans le stockage comme décrit *supra*. En particulier, les gradients thermiques dans le Callovo-Oxfordien en grand qui en résultent (sur le court terme) sont très faibles et ne sont donc pas de nature à générer des désordres thermomécaniques à cette échelle.

La perturbation locale du Callovo-Oxfordien qui en résulte est peu importante et n'entraîne pas de perturbations supplémentaires de la formation en grand. On notera enfin que le volume du stockage est très faible en rapport du volume du Callovo-Oxfordien.

[20] En pratique, le dimensionnement cible une température maximale de 65 °C dans les composants en béton

1.4.4.3 Des scellements qui reconstituent un milieu à faible perméabilité à l'eau pour limiter les flux d'eau dans l'installation souterraine

Les scellements participent à l'objectif de sûreté après fermeture sur le long terme, en limitant (i) l'apport d'eau susceptible de provenir des formations encaissantes sus-jacentes traversées par les ouvrages de liaison surface-fond et (ii) les flux d'eau drainée par le Callovo-Oxfordien au sein du stockage, après sa saturation complète et un régime hydraulique établi et (iii) tout en contribuant à limiter la pression de gaz dans le stockage. Ces objectifs permettent *In fine* de garantir des transferts de radionucléides et substances toxiques chimiques au sein du système de stockage qui soient très limités (*i.e.* Des temps de transferts convectifs importants), garantissant que la voie de transfert principale des radionucléides est celle par le Callovo-Oxfordien. Par ailleurs, ils contribuent à limiter les échanges de matières par la voie eau concourant ainsi à accroitre le niveau de maîtrise des perturbations associées.

Pour satisfaire ces objectifs de performance hydraulique, il est prévu deux types de scellements :

- des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies), qui apportent la plus grande contribution à la limitation des flux d'eau[21] entre l'installation souterraine et les formations encaissantes *via* les liaisons surface-fond (limitation des quantités d'eau venant des formations sus-jacentes sur le court terme et limitation des quantités d'eau drainées par le stockage sur le long terme à l'équilibre hydraulique) ;
- des scellements de fond (galeries) mis en place dans les galeries de liaison reliant les quartiers de stockage à la base des liaisons surface-fond, qui permettent d'augmenter encore plus la résistance hydraulique[22] au sein des ouvrages souterrains et contribuer à isoler hydrauliquement le système au plus près des déchets. Par leur position centrale au sein de l'installation souterraine, ils contribuent à l'organisation des gradients hydrauliques et des flux d'eau dans l'installation souterraine.

L'atteinte de ces performances hydrauliques en phase après fermeture repose sur un ensemble d'éléments liés :

- aux principes fondamentaux de conception :
  - ✓ une localisation des scellements de fond dans des galeries orientées suivant la direction de la contrainte horizontale principale majeure, afin de minimiser l'extension verticale de la zone mécaniquement endommagée de Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ le choix des argiles gonflantes (bentonites) pour le noyau, additionnées le cas échéant de matériaux destinés à en ajuster les propriétés (densité, pression de gonflement, pression d'entrée de gaz), faciliter sa fabrication (poudre, pellets, briques) ou sa mise en place permet de répondre aux deux fonctions de par leurs propriétés hydrauliques et hydromécaniques remarquables (faible perméabilité à l'eau même pour une densité faible, forte perméabilité au gaz tout en conservant une capacité de gonflement importante, capacité de gonflement importante, « plasticité » élevée, capacité de cicatrisation hydraulique face à des sollicitations diverses, notamment mécaniques et au gaz…) ;
  - ✓ une dépose du revêtement, totale (cas des scellements des liaisons surface-fond) ou partielle (cas des scellements de fond), afin d'assurer un contact direct entre la zone endommagée de Callovo-Oxfordien en champ proche et le noyau argileux, (i) favorisant l'absence de discontinuité à perméabilité élevée entre le noyau et la roche et la cicatrisation hydraulique de la zone endommagée en champ proche sous l'effet de la pression de gonflement et de la resaturation et (ii) limitant la perturbation alcaline des composants en béton (revêtement et éventuels massifs d'appui) sur le noyau en argile gonflante au droit des zones de dépose ;
  - ✓ un confinement[23] de la partie centrale du noyau en argile afin de favoriser une saturation en eau de ce dernier à volume constant et ainsi sa capacité à constituer *a minima* une zone de noyau en contact intime avec la roche au droit des zones de dépose des revêtements (cf. Fiche 6.2 « La réalisation des ouvrages de fermeture de l'installation souterraine » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

---

21 La performance hydraulique visée est une perméabilité inférieure à 10^{-11} $m.s^{-1}$ sur une longueur pluridécamétrique
22 La performance hydraulique visée est une perméabilité inférieure à 10^{-9} $m.s^{-1}$ sur une longueur plurimétrique
23 Le confinement de la partie centrale du noyau est obtenu soit *via* des massifs d'appui en béton qui encadrent le noyau, soit par la mise en place d'une longueur de noyau sacrificielle destinée à éloigner la zone en décharge à l'interface avec le remblai de la partie centrale gonflante.

- aux caractéristiques hydromécaniques du Callovo-Oxfordien, et plus particulièrement celles de la zone endommagée : (i) la zone endommagée dans l'unité argileuse, qui présente une capacité d'autocicatrisation, permettant de reconstituer une interface de faible perméabilité à l'eau en champ proche des ouvrages (ii) la zone endommagée dans l'USC, qui présente une teneur en carbonates plus importante : il s'agit d'un endommagement hétérogène, non continu longitudinalement, de sorte que les perméabilités globales sont faibles, de l'ordre de 10^{-11} $m.s^{-1}$.

1.4.4.4 Des matériaux des composants ouvragés simples, durables et au comportement prédictible et compatible avec un dimensionnement

La conception des ouvrages de fermeture s'appuie sur l'utilisation de matériaux simples, robustes, durables et dont les propriétés sont façonnables au regard d'une performance recherchée.

1.4.4.4.1 Les matériaux argileux

Des matériaux à base de bentonite et/ou d'argilites remaniées sont envisagés pour constituer les ouvrages de fermeture de la partie souterraine de l'INB. Ces matériaux sont choisis pour leurs propriétés hydromécaniques compatibles avec les fonctions attendues.

Les bentonites pures ou en mélange ont été largement étudiées depuis plus de 30 ans par l'Andra (cf. Le référentiel « Les matériaux argileux remaniés » (6)) et par ses homologues étrangers, pour les projets de stockage géologique profond de déchets radioactifs. Elles ont aussi été étudiées pour d'autres domaines d'application : travaux souterrains, boues de forages, agronomie… Les matériaux à base de bentonites sont caractérisés par :

- une faible perméabilité à l'eau ;
- un potentiel de gonflement et des pressions de gonflement élevés suivant le niveau de densité sèche ;
- un comportement plastique à l'état saturé ;
- une capacité de cicatrisation permettant d'accommoder des sollicitations hydromécaniques externes ;
- des caractéristiques de comportement au gaz modulables par l'ajout d'additifs (type sable) ;
- une capacité de sorption des radionucléides ;
- une tolérance aux sollicitations hydraulique, mécanique et gaz.

Les travaux de caractérisation des comportements hydromécanique et gaz, à l'état saturé et partiellement saturé en eau, ont été menés à plusieurs échelles spatiales (feuillet, centimétrique, démonstrateurs pluri-métriques - *in situ*) sur différents types de bentonites (cf. Le référentiel « Les matériaux argileux remaniés » (6)). Ces travaux ont permis de dégager des grandes lignes de comportement communes à l'ensemble de ces matériaux purs ou en mélanges avec des additifs (par exemple le sable). Par ailleurs, différents modes de mise en forme ont été étudiés (pièces compactées, mélanges de pellets et compactage en place), afin d'évaluer des éventuels effets sur ces comportements.

Les matériaux à base d'argilite du Callovo-Oxfordien remaniée pure ou en mélange (bentonite, chaux et sable) ont fait l'objet de travaux spécifiques dans l'optique de leur utilisation pour le remblayage des galeries. Les résultats disponibles montrent que les argilites remaniées ont des comportements hydromécaniques similaires à ceux classiques des matériaux argileux. La présence de smectites dans les argilites leur confère un potentiel de gonflement, néanmoins plus faible que celui des bentonites. Des méthodes de compaction classique de type Proctor permettent d'obtenir des propriétés hydromécaniques compatibles avec les performances attendues notamment en termes de module de déformation ou de perméabilité à l'eau (cf. Le référentiel « Les matériaux argileux remaniés » (6)).

1.4.4.4.2 Les matériaux cimentaires

Des matériaux cimentaires sont envisagés pour le génie civil des ouvrages, des conteneurs de stockage MA-VL et le cas échéant les massifs d'appui des scellements. Ces matériaux sont choisis pour leurs propriétés mécaniques compatibles avec les fonctions attendues. Les matériaux cimentaires présentent de nombreux avantages pour une utilisation dans le cadre du stockage de déchets radioactifs. Il s'agit de matériaux fabriqués avec des gammes de constituants variées et facilement disponibles, dont la mise en œuvre est simple et robuste et pour lesquels un retour d'expérience important est disponible dans le domaine du génie civil, conventionnel ou nucléaire.

Les choix de formulation permettent d'ajuster l'ensemble des propriétés du matériau, qu'il s'agisse de ses propriétés chimiques ou physiques, afin de répondre aux exigences spécifiées pour l'ouvrage considéré. Il est ainsi possible d'obtenir des propriétés mécaniques élevées et une réactivité chimique limitée permettant de garantir des performances élevées dans le temps, notamment en termes de durabilité.

Les choix de formulation permettent également de contrôler les propriétés du matériau à l'état frais. Il est ainsi possible d'obtenir des propriétés assurant la maîtrise de la durée pratique d'utilisation et de la rhéologie, ce qui permet une mise en œuvre du matériau adapté aux conditions du chantier, notamment pour la mise en œuvre de volumes importants, en surface ou en souterrain. La maîtrise de la chaleur d'hydratation du béton au travers du choix du ciment et des additions minérales permet de s'affranchir des risques d'endommagement mécanique liés aux gradients thermiques.

Les processus de dégradation chimiques (hydrolyse, carbonatation, attaques sulfatiques…) sont connus et gérés au travers des choix des constituants et de leur dosage dans la formulation. Il est ainsi possible d'adapter les formulations aux conditions imposées par la chimie de l'eau du milieu et par les déchets. Ceci permet de disposer de matériaux présentant une faible réactivité chimique et d'assurer une durabilité des performances dans le temps.

Il est également possible d'adapter les formulations afin de limiter la quantité d'alcalins et d'ajuster leur pH (plus ou moins basique). Cette solution permet de limiter les effets d'une attaque alcaline sur les matériaux argileux environnants.

1.4.4.4.3 Les aciers

Au-delà de l'utilisation classique des aciers dans les composants en béton du génie civil (armatures), les aciers sont également envisagés pour les chemisages des alvéoles HA et le conteneur de stockage HA. En effet, l'acier résiste mieux à la température[24] que les bétons et peut ainsi, en l'absence d'oxygène, assurer avec fiabilité une étanchéité totale à l'eau sur de longues durées.

Le recours à des aciers non alliés, matériaux simples, soudables, permet de s'affranchir des phénomènes de corrosion localisés (fragilisation par l'hydrogène, corrosion sous contrainte, corrosion radiolytique[25]…). Dès lors, dans les conditions d'environnement de l'installation souterrain (et en particulier des alvéoles) (cf. Fiche 4.1 « La conception et la réalisation d'un alvéole HA » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)), ce type de matériaux est uniquement soumis aux phénomènes de corrosion généralisée, phénomène lent[26], facilement caractérisable, prédictible et donc compatible avec un dimensionnement.

En effet, vis-à-vis de la corrosion aqueuse anoxique, les résultats expérimentaux et les modélisations montrent que la corrosion généralisée est le mécanisme dominant à moyen et long terme, et que sa vitesse peut être quantifiée sur la base de modèles validés expérimentalement. Les analogues archéologiques en fer datant de plus de 2 000 ans soutiennent l'évaluation des processus de corrosion et fournissent un repère temporel par rapport à la durabilité des aciers sur une échelle de temps significative. Par ailleurs, les modèles de corrosion des aciers non alliés sont peu sensibles à la chimie des eaux, de sorte qu'ils exigent une précision moindre sur les conditions d'environnement chimique (ils sont en particulier compatibles avec les incertitudes sur la composition des eaux interstitielles du Callovo-Oxfordien), sur la composition du métal et son état structural et surfacique.

---

[24] Il est classiquement recommandé de limiter la température des bétons en dessous de 65 °C à 85 °C environ (selon les classes d'exposition) pour s'affranchir des désordres susceptibles d'endommager assez sévèrement des ouvrages en béton là où des aciers peuvent être qualifiés pour des températures de plusieurs centaines de °C.

[25] En association avec une limitation par conception du débit de dose à 10 Gy/h en peau de conteneur de stockage

[26] En environnement anoxique après consommation de l'oxygène résiduel occlus

Leur mise en œuvre (métallurgie, soudabilité, contrôle) s'appuie sur des technologies industriellement éprouvées. Les essais de corrosion sous contrainte ont permis d'orienter le choix des aciers : API5L X65 pour le chemisage et P285NH pour le colis de stockage. Les aciers retenus ne montrent pas de propagation de la fissuration sous contrainte pour le corps du conteneur et le chemisage en milieu argileux, du fait de la composition et la structure des matériaux retenus. La soudure et sa zone affectée thermiquement (ZAT) étant généralement plus sensibles à ces processus, l'Andra a retenu un traitement de détensionnement pour éliminer les contraintes résiduelles internes à l'acier après soudage du couvercle du conteneur de stockage.

1.4.4.5 Un conteneur de stockage HA étanche jusqu'au retour à un domaine de température où les processus de relâchement et de migration des radionucléides sont maîtrisés et prédictibles

Les principes directeurs de la conception de l'alvéole de stockage visent à maintenir dans l'alvéole des conditions physico chimiques conférant une durée d'étanchéité minimale au colis de stockage résultant :

- d'une exigence du guide de sûreté de l'ASN (4), visant à immobiliser dans le colis de stockage les radionucléides et substances toxiques chimiques jusqu'à ce que l'activité des radionucléides à vie courte et moyenne ait suffisamment décru au moment de l'arrivée de l'eau sur la matrice vitreuse ;
- du besoin d'attendre que la température de la matrice vitreuse ait suffisamment décru (au moment de l'arrivée de l'eau) pour :
  - ✓ limiter sa vitesse d'altération dans un domaine connu pour les calculs de sûreté à long terme relatifs à la durée d'altération de la matrice vitreuse et pour permettre de décrire de façon robuste le comportement des radionucléides ;
  - ✓ empêcher le relâchement des radionucléides aussi longtemps que la température dans les déchets et leur environnement est supérieure à 70 °C (50 °C pour HA0) afin que la mobilité, dans le milieu géologique, des radionucléides et des substances toxiques chimiques restent dans un domaine connu.

Pour interdire l'arrivée d'eau sur les déchets pendant la phase thermique, chaque colis primaire est placé dans un conteneur étanche en acier non allié, dont l'épaisseur est dimensionnée vis-à-vis des différents phénomènes de corrosion auxquels il est soumis (cf. Chapitre 2 du volume 3 du présent rapport). Sa durée de vie est estimée à plusieurs centaines d'années.

L'Andra a choisi en conséquence d'interdire l'arrivée d'eau sur le verre, sur une durée minimale de plusieurs centaines d'années[27], par l'ajout d'un conteneur au colis primaire de déchets HA pour :

- éviter le risque d'un percement par corrosion localisée (piqûration, caverneuse…) au contact de l'eau du conteneur primaire en acier inoxydable, qui pourrait intervenir à l'échelle de quelques dizaines d'années, et d'une dissémination de radionucléides qui rendraient plus délicate une récupération des colis (gestion réversible) ;
- empêcher une altération précoce du verre, accélérée par la température, qui serait accompagnée d'un relâchement de radionucléides également plus précoce. La durée d'étanchéité du conteneur, couvre la phase thermique des déchets HA, c'est-à-dire la période suivant la mise en stockage des déchets pendant laquelle la température au cœur du verre est supérieure à 50 °C (HA0) ou à 70 °C (HA1/HA2) estimée autour de quelques centaines d'années tout au plus.

[27] En pratique, au regard des marges considérées, la durée d'étanchéité du conteneur de stockage plus grandes, de l'ordre de plusieurs milliers d'années.

1.4.4.6 Des ouvrages de fermeture passants au gaz pour préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien

La fonction première des scellements de galeries et des liaisons surface-fond est de limiter les flux d'eau au sein du stockage. Par ailleurs, les scellements doivent aussi faciliter le transfert de l'hydrogène qui sera produit après fermeture afin de contribuer à limiter sa pression maximale au sein du stockage durant la période transitoire de resaturation totale. Le choix des argiles gonflantes (bentonites) pour le noyau, additionné le cas échéant de matériaux destinés à en ajuster les propriétés (densité, pression de gonflement, pression d'entrée de gaz), faciliter sa fabrication (poudre, pellets, briques) ou sa mise en place permet de répondre aux deux fonctions de par leurs propriétés hydrauliques et hydromécaniques remarquables (faible perméabilité même pour une densité faible, capacité de gonflement importante, « plasticité » élevée, capacité de cicatrisation hydraulique face à des sollicitations diverses, notamment mécaniques et au gaz…).

Pour répondre à l'objectif de protéger sur une très grande durée l'homme et l'environnement des risques associés aux déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue en confinant ces déchets dans une formation géologique profonde afin de s'opposer à la dissémination des radionucléides et substances toxiques chimiques qu'ils contiennent, on confère au site et particulièrement à la formation hôte du Callovo-Oxfordien des fonctions multiples de sûreté.

En complément de ces caractéristiques favorables qui confèrent déjà une certaine inertie vis-à-vis de la dynamique des phénomènes (notamment la limitation des flux d'eau et le transfert lent essentiellement diffusif des éléments dissous), des dispositions de conceptions et d'architecture complémentaires visent à garantir sur le long terme et à valoriser encore plus les capacités de confinement apportées par la couche du Callovo-Oxfordien. Il s'agit en particulier :

- de disposition d'architecture en grand des installations de stockage souterraines :
  - ✓ un regroupement des ouvrages de liaison surface-fond pour limiter les flux d'eau circulant dans les ouvrages ;
  - ✓ une architecture planaire maximisant les épaisseurs de garde sus et sous-jacentes ;
  - ✓ une architecture globalement borgne et élancée pour limiter le court-circuit de la barrière géologique, le Callovo-Oxfordien ;
  - ✓ la séparation physique des familles de déchets en zones distinctes éloignées entre elles de plusieurs centaines de mètres et des gardes physico-chimiques de l'ordre de 50 mètres entre les alvéoles contenant des déchets complexants.
- de disposition de conception :
  - ✓ la limitation des niveaux de température dans le stockage (100 °C dans le Callovo-Oxfordien, 65 °C dans les bétons, 50 °C à 70 °C au moment du relâchement des radionucléides) afin de limiter les effets induits (notamment en termes de couplages) et rendre leur description robuste et accessible à la connaissance ;
  - ✓ le comblement et le scellement des galeries pour limiter les déformations des ouvrages à long terme et éviter l'endommagement en champ proche susceptible de constituer une voie de transfert privilégiée pour les radionucléides ;
  - ✓ le choix de matériaux simples, durables dont le comportement est robuste, caractérisable et compatible avec un dimensionnement pour les performances recherchées ;
  - ✓ des ouvrages de fermeture passants au gaz.

1.5 Des échelles de temps et d'espace des processus majeurs qui concourent naturellement à une simplification et une maîtrise de l'évolution phénoménologique du stockage et des environnements géologiques

Les processus phénoménologiques majeurs affectant le système de stockage (milieu géologique en grand, ouvrages, colis de stockage) se développent sur des périodes et des échelles d'espace qui leur sont propres avant, pour la plupart, de tendre vers un nouvel état d'équilibre ou vers une évolution très lente.

Les échelles de temps et d'espace des processus majeurs concourent naturellement à une simplification de l'évolution du système de stockage et la maîtrise de cette dernière. À titre d'exemple :

- les processus géodynamiques s'inscrivent sur une échelle de temps couvrant le million d'années et au-delà. Ils renvoient à des échelles d'espace correspondant à celles des plaques continentales, voire du globe terrestre en grand pour ce qui concerne les grandes évolutions climatiques (cf. Fiche 2.17 « La géodynamique interne du site de Meuse/Haute-Marne à l'Actuel et sur le prochain million d'années » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). L'emprise de l'installation souterraine du stockage (de l'ordre de quelques dizaines de km^2) et les temps caractéristiques de son évolution sont donc très petits par rapport aux caractéristiques des grandes évolutions géodynamiques internes et externes, ce qui permet de pouvoir appréhender l'évolution du milieu géologique en grand et l'évolution du stockage de manière indépendante ;
- les processus internes au stockage sont pilotés en premier lieu par les caractéristiques et les propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 1.2 du présent volume), en particulier à l'échelle de la ZIOS en complément des dispositions de conception (cf. Chapitre 1.4 du présent volume) du stockage qui visent également à tirer parti des propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien, en limitant les sollicitations thermiques, hydrauliques, mécaniques et chimiques susceptibles d'être générées par le stockage. Les processus résiduels renvoient à des échelles de temps et d'espace qui parfois permettent de les découpler spatialement et/ou temporellement simplifiant ainsi les processus d'interaction ou de couplage. Par exemple :
  - ✓ la charge thermique concerne pour l'essentiel une échelle de temps de plusieurs milliers d'années, mais les paroxysmes sont atteints dans le stockage en quelques dizaines d'années et sont limités en intensités par dimensionnement (cf. Fiche 3.1 Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). À ces échelles de temps, les distances de transfert de la chaleur par diffusion dans le milieu géologique sont de l'ordre de la centaine de mètres. Or, les distances de plusieurs centaines de mètres entre, d'une part, le quartier pilote HA, le quartier de stockage HA, et, d'autre part, le quartier de stockage MA-VL permet ainsi de les découpler thermiquement. Par ailleurs, les niveaux de température atteints n'induisent pas d'effets irréversibles significatifs à l'échelle de la formation sur les (transformations minéralogiques) ;

- ✓ les processus hydrauliques (couplés à la production de gaz) dans le stockage s'inscrivent sur une échelle de temps de quelques centaines de milliers d'années environ (hors scellements), avant l'atteinte de la saturation totale du stockage le retour vers un nouvel état d'équilibre hydraulique (cf. Fiche 3.6 « Le transitoire hydraulique-gaz du stockage en après-fermeture » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). Ces temps caractéristiques sont très longs par rapport aux temps caractéristiques des évolutions géomécaniques (quelques milliers d'années) des grands ouvrages en béton. Dans un premier temps (jusqu'à la rupture), les processus de resaturation (et donc les processus chimiques, qui dépendent pour une grande part des processus hydrauliques des composants du stockage, et s'étendent sur des échelles de temps comparables à celles de ces processus) influent peu sur l'évolution mécanique des ouvrages. Ce n'est que sur de très grandes durées (typiquement quelques centaines de milliers d'années) que les phénomènes chimiques ne s'expriment (en champ proche des ouvrages) de manière congruente avec la resaturation complète et ne conduisent à des évolutions mécaniques résiduelles jusqu'au retour à un état d'équilibre ;
- ✓ l'extension de la perturbation mécanique dans les argilites est d'ordre plurimétrique au maximum et les conséquences sur la perméabilité du Callovo-Oxfordien en champ proche s'estompent très rapidement par cicatrisation hydraulique et auto-colmatage ;
- ✓ hormis le transitoire redox qui apparaît comme un phénomène éphémère à l'échelle du million d'années, les processus chimiques se développent pour l'essentiel au-delà de la dizaine de milliers d'années sur quelques centaines de milliers d'années, voire le million d'années. Ainsi, les perturbations alcalines engendrées par les eaux cimentaires sur les argilites, ou le relâchement de complexants organiques par la dégradation de certains colis de déchets MA-VL (cf. La note « L'évolution chimique des alvéoles MA-VL et du Callovo-Oxfordien en champ proche » (5)), peuvent se dérouler sur plusieurs centaines de milliers d'années. Cependant, ils présentent globalement une faible extension et sont limités au champ proche du stockage, aux premiers mètres d'argilites. Par exemple, l'extension de la perturbation alcaline est au maximum de grandeur d'ordre pluri-métrique ; celle de la perturbation engendrée par le fer des composants métalliques des alvéoles de déchets HA est d'ordre décimétrique, et celle par les complexants organiques au plus de la dizaine de mètres et quelques mètres pour la perturbation saline. Bien que ces perturbations puissent localement conduire à altérer le transfert et la rétention de certains radionucléides, ces perturbations du fait de leur faible extension, restent négligeables sur les conditions de transfert des solutés dans la couche du Callovo-Oxfordien et dans les ouvrages de stockage.

Pour répondre à l'objectif de protéger sur une très grande durée l'homme et l'environnement des risques associés aux déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue en confinant ces déchets dans une formation géologique profonde afin de s'opposer à la dissémination des radionucléides et substances toxiques chimiques qu'ils contiennent, on confère au site et particulièrement à la formation hôte du Callovo-Oxfordien des fonctions multiples de sûreté.

En complément de ces caractéristiques favorables qui confèrent déjà une certaine inertie vis-à-vis de la dynamique des phénomènes (notamment la limitation des flux d'eau et le transfert lent essentiellement diffusif des éléments dissous), les processus phénoménologiques majeurs affectant le système de stockage (milieu géologique en grand, ouvrages, colis de stockage) se développent sur des périodes de temps et des échelles d'espace qui leur sont propres avant, pour la plupart, de tendre vers un nouvel état d'équilibre ou vers une évolution très lente.

L'ensemble de ces éléments concourt à rendre intrinsèquement le fonctionnement et l'évolution du système de stockage très lents et prévisibles au sein d'un environnement naturel très inerte avec une capacité tampon et des caractéristiques hydrauliques qui lui confère une faible réactivité et des transferts globalement limités, localisés pour l'essentiel au champ proche des ouvrages.

Dès lors, un schéma d'évolution suffisamment représentatif peut être défini pour modéliser le fonctionnement du système de stockage et en démontrer la sûreté.

2

L'évolution du milieu géologique sur le site d'implantation de l'installation souterraine au cours du prochain million d'années

2.1 Un site géologique d'implantation de l'installation nucléaire peu affecté par la présence du stockage 36
2.2 Une évolution en grand du milieu géologique sur le site d'implantation de l'INB pilotée par les phénomènes géodynamiques 39
2.3 Une évolution des écoulements hydrogéologiques du fait de l'évolution géodynamique du site 46

2.1 Un site géologique d'implantation de l'installation nucléaire peu affecté par la présence du stockage

L'évolution du site (surface et fond, en particulier la formation du Callovo-Oxfordien en grand) peut être considérée comme indépendante de l'installation souterraine[28] qu'il accueille.

2.1.1 La formation du Callovo-Oxfordien

Dans la couche du Callovo-Oxfordien :

- d'un point de vue **thermique** (cf. Chapitre 3.1 du présent volume), l'état initial de la formation est déterminé par le flux de chaleur d'origine crustale et les propriétés thermiques de la couche. Les variations de température de surface passées ont peu d'influence sur l'état actuel. Les perturbations thermique et thermo-hydraulique liées au stockage sont transitoires. Elles s'inscrivent sur des durées courtes[29] de quelques centaines à quelques milliers d'années pour l'essentiel avec une amplitude volontairement contrôlée et limitée par la conception et le dimensionnement de l'installation souterraine (cf. Chapitre 1.4.4 du présent volume) de sorte qu'elles restent sans conséquences irréversibles ;
- d'un point de vue **hydraulique** (cf. Chapitre 3.2 du présent volume), la décharge hydraulique associée à la création des ouvrages souterrains et leur ventilation durant toute la phase de fonctionnement engendrent une baisse de pression qui se propage des parois des excavations vers le Callovo-Oxfordien. L'extension du front de décharge est de l'ordre quelques dizaines de mètres sur une durée séculaire. Après fermeture, la production de gaz dans le stockage a pour effet de maintenir un état partiellement insaturé de l'installation souterraine sur de très grandes durées (quelques 10^4 à 10^5 ans). L'existence d'une phase gazeuse se limite aux seuls ouvrages. Dans le Callovo-Oxfordien en grand, l'hydrogène s'exprime sous forme dissoute et migre par diffusion (cf. Chapitre 3.2.2 du présent volume) ;
- d'un point de vue **mécanique** (cf. Chapitre 3.3 du présent volume), à l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien, l'installation souterraine de l'INB est un objet au volume total faible, moins de 1 % du volume de la couche du Callovo-Oxfordien environnante. Le stockage est globalement plan et réparti sur une surface de plus de 10 km^2. En outre, une exigence de conception de la partie souterraine de l'INB est de minimiser les vides résiduels dans tous les ouvrages lors de la fermeture. Cela s'entend au niveau des alvéoles de stockage et dans l'ensemble des galeries et des ouvrages d'accès (puits et descenderies) qui seront remblayés et scellés, de sorte que le volume total de vide résiduel en regard du volume de la couche du Callovo-Oxfordien environnante est encore plus faible (<<0,1 %). Par ailleurs, du fait des propres caractéristiques physico-chimiques intrinsèques du Callovo-Oxfordien :
  - ✓ soit les perturbations induites par le stockage sont localisées en champ très proche des ouvrages de l'installation souterraine, comme l'endommagement mécanique lié au creusement, la redistribution des contraintes mécaniques ou les perturbations chimiques (perturbation alcaline…) et n'affectent pas la formation en grand ;
  - ✓ soit si ces perturbations concernent la couche de Callovo-Oxfordien à grande échelle, elles n'affectent cette dernière que de manière transitoire et à des niveaux sans conséquences irréversibles par le caractéristiques propres (cf. Chapitre 1.2 du présent volume) ou en raison des dispositions de conception qui visent à limiter l'ampleur des phénomènes (cf. Chapitre 1.4 du présent volume).

[28] En dehors du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrain
[29] Comparativement aux temps géologiques dont l'unité est conventionnellement le million d'années

- d'un point de vue **chimique** (cf. Chapitre 3.3 du présent volume), l'état de la couche, en quasi-équilibre, est contrôlé par les phases minérales de cette dernière. Les différents phénomènes d'altération (corrosion des composants métalliques, perturbation alcaline des composants argileux naturels ou ouvragés, carbonatation atmosphérique et hydrolyse des bétons…) concernent essentiellement les ouvrages et les déchets et ne sont pas susceptibles de générer des vides résiduels supplémentaires significatifs au sein des ouvrages pouvant affecter significativement le Callovo-Oxfordien en grand. Les phénomènes chimiques restent des phénomènes de champ (très) proche localisés aux interfaces entre les composants ouvragés et le milieu naturel.

L'ensemble de ces considérations conduisent à conforter l'idée que :

- le comportement du Callovo-Oxfordien en grand autour des ouvrages souterrains est principalement piloté à long terme par les phénomènes géodynamiques interne (surrection) et externe (évolution climatique) affectant la géomorphologie de surface et, par voie de conséquence le champ de contrainte (vertical) et les écoulements hydrogéologiques comme décrit *infra* ;
- la diffusion dans la couche de Callovo-Oxfordien est, et demeure dans le temps, le mode de transfert dominant[30] des solutés.

2.1.2 Les formations encaissantes

Les formations encaissantes sont très peu affectées par le stockage compte tenu de leur éloignement et des propriétés du Callovo-Oxfordien qui tamponne l'essentiel des perturbations. En particulier, la perturbation thermique n'affecte les encaissants directs du Callovo-Oxfordien que de quelques degrés. Seule la perturbation hydraulique au droit des ouvrages de liaison surface-fond affecte le milieu encaissant avec des spécificités selon les couches en fonction de leur transmissivité hydraulique (perméabilité, épaisseur) :

- au niveau de la formation des **Calcaires du Barrois** : la formation du Barrois est une couche géologique de surface constituée de calcaires fracturés localement et de conduits karstiques. Pour pallier les venues d'eau éventuelles, les parois des ouvrages de liaison surface-fond sont étanchées sur toute cette épaisseur empêchant ainsi toute perturbation hydraulique de se propager dans le milieu, en dehors du court transitoire hydraulique (diminution de quelques mètres de la charge sur une extension de l'ordre de quelques dizaines de mètres) lié au et à l'équipement de ces ouvrages avant un rapide retour à l'équilibre. Cette disposition de conception permet de s'affranchir des interactions directes entre le stockage et les eaux de surface lors de son exploitation ;
- au niveau du **Kimméridgien marneux** : le revêtement des liaisons surface-fond est drainant. La décharge hydraulique peut se développer librement. Néanmoins, au regard de la faible perméabilité du Kimméridgien (de l'ordre de 10^{-12} m/s), les débits d'eau drainés en paroi sont très faibles comme le soulignent les observations des puits au Laboratoire de recherche souterrain où les seules venues d'eau observées proviennent essentiellement du marinage et de la zone endommagée autour du puits. Aucune venue d'eau significative n'a été observée dans le puits au droit de la formation du Kimméridgien. Au-delà de quelques rayons à partir de la paroi de puits, l'impact hydraulique direct du puits est quasi nul ;
- au niveau de **l'Oxfordien carbonaté :** le revêtement des liaisons surface-fond est drainant. L'Oxfordien carbonaté peut être considéré comme un aquifère en charge très peu productif, la production d'eau (quelques dizaines à quelques centaines de litres par heure) est fournie par les horizons poreux (Hp) dont la perméabilité est de l'ordre de 10^{-8} m/s. La perturbation hydraulique se propage en quelques années sur des distances kilométriques. Après fermeture du stockage, la remise en charge de l'oxfordien est rapide et les venues d'eau contribuent à la resaturation des scellements des ouvrages de liaison surface-fond ayant pour effet de fermer hydrauliquement le système de stockage ;
- au niveau du Dogger sous-jacent, il n'y a pas de perturbation hydraulique liée au stockage.

[30] Par rapport aux autres modes possibles : convection (écoulement) ou phénomènes non diagonaux

Au final, les formations sus et sous-jacentes à la formation hôte du Callovo-Oxfordien ne sont pas ou peu affectées par le stockage :

- soit par conception au regard de dispositions de conceptions considérées (notamment l'étanchéification lors de la traversée des aquifères de surface) ;
- soit intrinsèquement de la part la nature des perturbations mises en jeu ;
- soit compte tenu de l'effet tampon apportées par le Callovo-Oxfordien (retard, amortissement, temps et longueurs inférieures aux gardes verticales…).

L'évolution du milieu géologique sur le site d'implantation de l'INB est par conséquent pilotée par les phénomènes naturels liés à la géodynamique interne et externe comme décrit *infra* (cf. La note conceptuelle « L'évolution du site de Cigéo sur le prochain million d'années du fait des évolutions géodynamiques et des effets en grand du stockage » (7)).

Le Bassin parisien est actuellement l'une des zones les plus stables de la plateforme ouest-européenne à l'écart des effets de la compression alpine. L'échelle de temps d'un million d'années[31] est une durée « courte » par rapport aux constantes de temps de l'évolution tectonique (qui s'exprime en dizaines de millions d'années).

À l'actuel :

- l'aquifère de l'Oxfordien est structuré hydrogéologiquement au nord-est du secteur en deux nappes (Oxfordien moyen et Oxfordien supérieur) incluant les horizons poreux et séparées par les marnes de la série grise. Au sud-ouest de la zone de transposition, à la faveur de la disparition du semi-perméable des marnes de la série grise, l'Oxfordien carbonaté ne forme qu'une seule nappe. Les écoulements sont globalement dirigés vers le nord-ouest avec un gradient de l'ordre de 0,4 % ;
- l'aquifère encaissant sous-jacent du Dogger est constitué de formations hétérogènes du Bathonien moyen et supérieur d'une centaine de mètres d'épaisseur. Les écoulements y sont globalement orientés vers le nord-ouest avec un faible gradient hydraulique (0,1 %) dans la zone de transposition.

Considérant cet état initial, le milieu géologique au droit du site d'implantation de l'INB est très peu affecté par la présence du stockage. La plupart des perturbations induites par le stockage sont limitées en amplitude, en extension et/ou en durée :

- soit intrinsèquement par les propriétés du Callovo-Oxfordien (faible perméabilité, faible coefficient de diffusion, grande épaisseur…) qui lui confère une grande inertie et en effet tampon vis-à-vis de ces perturbations. C'est en particulier le cas de la plupart des interactions chimiques ou de la décharge mécanique initiale qui restent limitées au champ proche des ouvrages ;
- soit par des dispositions de conception qui visent à les limiter *de facto*. Il s'agit par exemple de la limitation de densité de chargement thermique des colis au sein du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA pour limiter la température (et les effets induits, notamment les transformations minéralogiques et la réponse thermo-hydro-mécanique du Callovo-Oxfordien) ou encore les ouvrages de fermetures qui limitent à long terme les déformations pour préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien (remblais) ou limitent les flux d'eau drainés par le stockage (scellements).

Dans ce contexte, l'évolution du milieu géologique sur le site d'implantation de l'INB est pilotée par les phénomènes naturels liés à la géodynamique interne et externe.

[31] Choisie conventionnement pour le stockage en rapport avec la durée de décroissance de la radioactivité des déchets.

2.2 Une évolution en grand du milieu géologique sur le site d'implantation de l'INB pilotée par les phénomènes géodynamiques

Le paysage géomorphologique (surface et sous-sol) est le résultat de la combinaison des phénomènes géodynamiques internes (tels que les phénomènes de surrection ou d'affaissement pilotés par la tectonique des plaques, elle-même liée à la dynamique mantellique ou les possibles effets de l'isostasie glaciaire qui affecte l'Europe du nord en conséquence des avancées et reculs des calottes glaciaires) et géodynamiques externes (tels que les phénomènes d'érosion, d'altération, ou de dépôt pilotés par le climat).

2.2.1 Une géodynamique interne du site d'implantation lente et de faible ampleur

Concernant la **géodynamique interne**, le site d'implantation des installations de l'INB se situe en partie orientale du Bassin parisien dans la région Grand Est de la France qui a été très particulièrement peu affectée par les mouvements tectoniques au cours des derniers 25 millions d'années et où il n'existe aucun indice d'activité tectonique récente. Les très lents déplacements affectant l'ensemble du domaine continental ouest européen dépendent de causes lointaines, en particulier la convergence continue entre les plaques africaine et eurasienne amorcée il y a près de 100 millions d'années (Ma). Leur entrée en collision il y a environ 60 Ma se traduit par des déformations combinant un mouvement de surrection et des glissements épisodiques sur les failles préexistantes à l'origine de la formation de la chaîne alpine et du Bassin méditerranéen au sens large, ce dernier absorbant à l'heure actuelle la majorité de cette convergence (cf. Fiche 2.17 « La géodynamique interne du site de Meuse/Haute-Marne à l'Actuel et sur le prochain million d'années » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Au droit du Bassin parisien en grand, la convergence entre les plaques africaine et eurasienne est de l'ordre de 4 à 5 $mm.an^{-1}$. Elle est majoritairement absorbée pour 95 % environ au niveau des chaînes montagneuses du pourtour méditerranéen occidental.

Les déplacements résiduels (≤0,3 $mm.an^{-1}$) sont quant à eux distribués et absorbés préférentiellement sur les grands systèmes de failles des zones dites « de faible activité » que sont l'Arc alpin, le graben du Rhin supérieur et son épaulement vosgien, les Pyrénées et de façon moindre dans les Ardennes et le massif armoricain. Ces cinq grands systèmes de failles sont localisés au pourtour de la plateforme ouest européenne, sur laquelle repose le Bassin parisien et qui de fait absorbe les « résidus des résidus » de la collision Afrique-Eurasie.

Le Bassin parisien se présente donc comme un Bassin sédimentaire intracontinental à l'écart des régions tectoniquement actives. Il repose sur une croûte épaisse (35 km) constituant de fait un bloc rigide et stable bien caractérisé par les analyses des données GPS. Ce dernier est resté particulièrement peu à pas affecté par la tectonique au cours des derniers 65 millions d'années, l'essentiel des déformations étant majoritairement absorbé et distribué à son pourtour, dans les cinq grands systèmes de failles susmentionnés et formant des zones de plus faible résistance.

Au sein de ce bâti structural, nombre de structures tectoniques se sont formées et ont évolué au cours de ces derniers 250 millions d'années en réponse aux différentes phases tectoniques qui se sont succédé sur la région. L'ensemble de ces structures autour du site d'implantation de l'INB ont été reconnues et ont fait l'objet d'études approfondies menées par l'Andra depuis les années 90. La robustesse et le croisement de l'ensemble des études et techniques employées et/ou développées montrent, d'une part, que l'ensemble de ces structures reconnues sont toutes inactives et, d'autre part, qu'aucune structure d'importance pouvant affecter la continuité et la géométrie des couches (plus particulièrement celles du Callovo-Oxfordien) n'a été observée sur le site d'implantation de l'INB et à ses alentours (cf. Référentiel, tome I « L'histoire géologique et état actuel » (8)).

Les seuls mouvements tectoniques observés à l'échelle du Bassin parisien sont limités aux effets de la déformation très lente qui affecte l'ensemble du domaine continental ouest-européen. Ils se traduisent par des mouvements de surrection relatifs, de type flambage lithosphérique, qui déforment l'ensemble de la lithosphère de façon lente et continue sur de grandes longueurs d'onde et sur des durées qui se comptent en millions d'années. La surrection tectonique sur le site d'implantation de l'INB est de l'ordre de 25 mètres par million d'années sans toutefois pouvoir dépasser 65 $m.Ma^{-1}$ en considérant les hypothèses les plus conservatives.

L'inactivité des failles va de pair avec une activité sismique historique et instrumentale très faible, voire inexistante, conférant à la région du site d'implantation de l'INB un caractère pratiquement asismique[32 33]. Les taux de déformation attendus, tant par la géodésie (<1 nanostrain.an) que par la sismicité ($<10^{2}$ $nanostrain.an^{-1}$), cohérents avec ceux obtenus par extrapolation logarithmique ($<10^{-2}$ $nanostrain.an^{-1}$), confirment bien que le Bassin parisien oriental est soumis à un taux de déformation négligeable[34], voire quasi nul d'autant que la tendance générale actuelle est au ralentissement.

2.2.2 Des évolutions possibles du climat encadrant le domaine d'évolution géodynamique externe

Le moteur principal la **géodynamique externe** est piloté par les évolutions climatiques, qui, en lien avec les phénomènes d'érosion, conditionnent l'évolution géomorphologique. Combiné à la tectonique (**géodynamique interne**), il détermine notamment (cf. Fiche 2.16 « Les scénarios climatiques envisagés pour le site de Meuse/Haute-Marne sur le prochain million d'années » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :

- les processus d'érosion et de dépôt ;
- les processus d'altération qui affectent les formations géologiques situées à l'affleurement et à faible profondeur ;
- les conditions thermiques et hydrologiques en surface, ainsi que les écoulements souterrains ;
- l'évolution des écosystèmes naturels et anthropiques, conditionnant en particulier les caractéristiques du couvert végétal, facteur majeur intervenant pour l'érosion.

Le climat de la Terre est caractérisé par sa variabilité à toutes les échelles de temps régie par la conjonction interactive de paramètres qui déterminent la répartition sur le globe de l'énergie reçue du soleil, et par là de la répartition spatiale des zones climatiques, en fonction notamment de la latitude en lien avec :

- les paramètres astronomiques (variations de l'orbite terrestre) qui déterminent l'activité solaire et donc l'énergie entrant dans le système et ses variations cycliques au cours du temps ;
- les paramètres terrestres correspondant à des interactions sous forme d'échanges (chaleur, eau, gaz…) au sein du système Terre entre les océans, l'atmosphère et le milieu terrestre (en lien avec les teneurs en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la disposition des océans et des reliefs continentaux, la présence et l'extension de calottes glaciaires aux hautes latitudes, la répartition de la végétation sur les continents, courants marins…) régissent la redistribution de l'énergie sur le globe terrestre, à l'origine de la répartition spatiale des climats sur la Terre.

---

32 Par comparaison avec le domaine orogénique des Alpes ou le domaine de rifts cénozoïques et plio-quaternaires du graben du Rhin.

33 Le réseau de stations d'enregistrement spécifique au site installé par l'Andra (réseau RES) et couplé aux réseaux d'écoute nationaux en place (RSN, RéNaSS) confirme l'absence de sismicité naturelle dans un rayon de 30 km - 35 km autour du Laboratoire de recherche souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne sur les 65 dernières années.

34 Les vitesses de glissement potentiel obtenu par extrapolation logarithmique pour les failles unitaires d'extension régionale sur le Bassin parisien étant très faibles, de l'ordre de 5×10^{-4} à 8×10^{-3} $mm.an^{-1}$.

Ainsi, au niveau du site d'implantation de l'INB, située à moyenne latitude (≈48,5°N) et à relative distance des mers qui entourent la pointe du continent Eurasiatique, le climat a présenté, au cours du dernier million d'années, des fluctuations caractérisées par des alternances entre périodes de climat glaciaire et de climat tempéré océanique (comme actuellement), et une variabilité à toutes les échelles de temps (des variations séculaires aux cycles emboités de 20 000 ans à 400 000 ans).

Dans le futur, aux causes naturelles qui ont régi l'évolution du climat au cours du passé, s'ajoutent les conséquences possibles des activités anthropiques à l'échelle du globe terrestre, notamment les rejets de gaz à effet de serre issus de combustibles fossiles, susceptibles de perturber l'évolution naturelle du climat, et par là l'évolution climatique dans la région et sur le site d'implantation de l'INB. Les émissions de CO_2 et les concentrations associées sont en effet le facteur anthropique le plus important et impactant en termes de forçage radiatif à l'échelle des prochains siècles.

En effet, selon les différentes hypothèses formulées en termes de rejet de CO_2 et pCO_2 associées ainsi que sur la dynamique du cycle du carbone atmosphérique, les évolutions prévues à l'échelle du globe terrestre, et plus particulièrement sur le site de Meuse/Haute-Marne, peuvent être très différentes. Elles varient entre (i) une poursuite des cycles glaciaires-interglaciaires de 100 000 ans tels qu'ils se sont mis en place il y a environ 850 000 ans ou (ii) un réchauffement global du climat de la Terre, avec un retour à des conditions naturelles repoussé plus ou moins loin dans le futur selon les hypothèses prises en compte.

Cette incertitude est traitée avec la prise en compte de deux scénarios climatiques envisageables sur le prochain million d'années (cf. Figure 2-1) et conçus pour encadrer le domaine de conséquences possibles vis-à-vis des conditions hydrogéologiques qui sous-tendent les modalités de transfert des radionucléides (vitesse, direction).

Quel que soit le scénario climatique envisagé sur le prochain million d'années, son application sur le site d'implantation de l'installation nucléaire entrainera des modifications géomorphologiques liées au développement des processus d'érosion-sédimentation et d'altération qui se déroulent sous l'action conjuguée de la tectonique (mouvements verticaux) et du climat.

L'étude des modifications du modelé topographique sur les deux derniers millions d'années sur la région de Meuse/Haute-Marne, couplée aux estimations faites à partir d'analogues naturels passés et présents, et les simulations numériques, permettent de bien appréhender ces modifications en fonction du scénario climatique considéré en proposant des domaines pour les taux d'érosion (ablation des plateaux et incision des vallées).

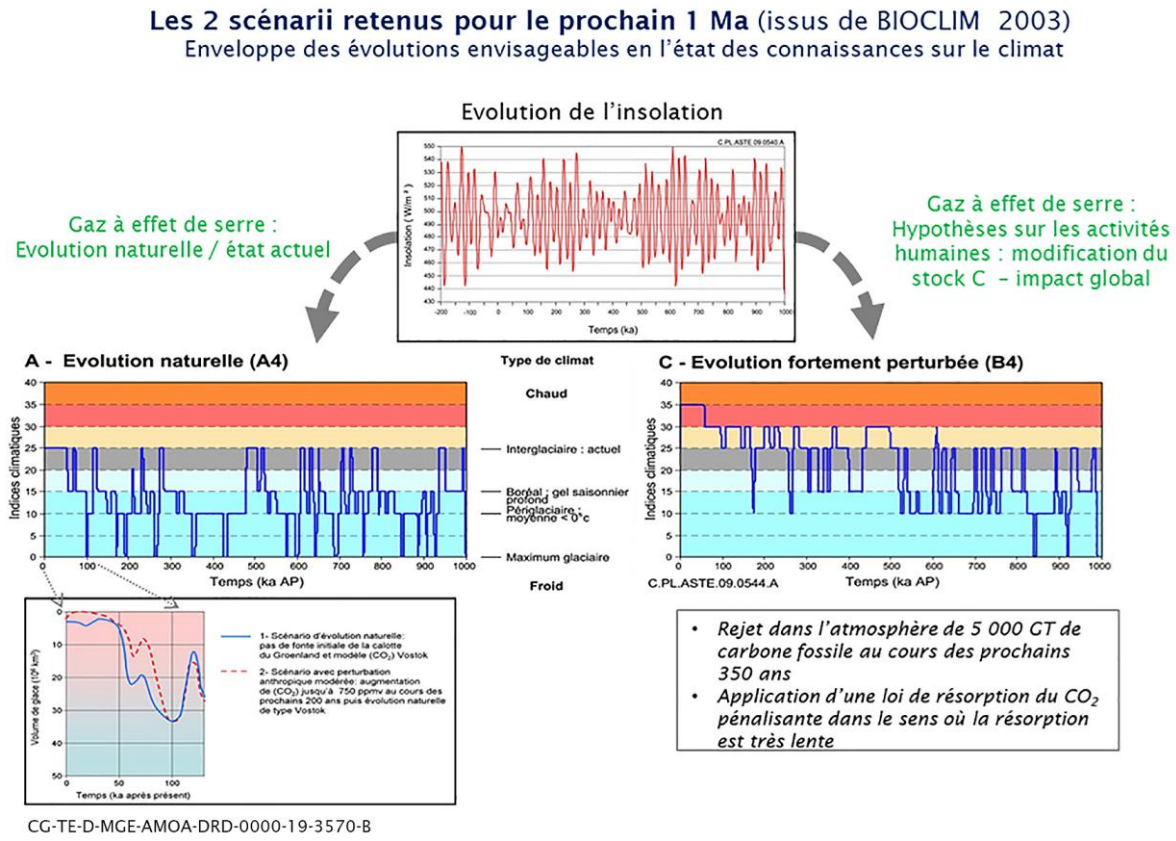


Figure 2-1 *Scénarios « enveloppes » des évolutions possibles du climat suivant les hypothèses sur les activités anthropiques*

2.2.2.1 L'érosion dans le contexte de l'évolution naturelle du climat

Dans le contexte d'une évolution naturelle du climat, les conditions actuelles d'un paysage stable en période de climat tempéré à tendance océanique qui prédominent sur le site d'implantation de l'INB vont perdurer pendant encore 50 000 ans[35]. Au-delà, l'évolution géomorphologique sera marquée différemment selon les différents composants du paysage.

[35] Le climat s'inscrit dans la continuité du refroidissement général naturel de la Terre amorcé il a plus de 50 Ma, avec la poursuite dans le futur des cycles climatiques glaciaire-interglaciaire de 100 000 mis en place depuis 850 000 ans environ. Toutefois, la prise en compte de la teneur actuelle en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, due aux rejets de CO_2, entrainerait la poursuite de l'actuelle période interglaciaire durant encore 50 000 ans. Le retour progressif aux cycles de 100 000 ans ne s'amorcerait que dans quelques 70 000 ans- 80 000 ans, avec l'entrée dans la prochaine période glaciaire qui commencerait par un épisode de climat boréal centré sur 70 000 ans environ et un maximum glaciaire centré sur 100 000 ans. Ce dernier précèderait le retour à un climat tempéré vers 110 000 qui amorcerait le début du cycle suivant.

2.2.2.1.1 L'évolution des plateaux

Les plateaux sont soumis à une ablation progressive et un recul des fronts de côtes, qui se déroulent de façon quasi continue au cours du temps, avec seulement quelques modulations dans les vitesses en fonction du climat. Les taux moyens d'ablation des plateaux calcaires du paysage sont, sur la durée du prochain million d'années, de l'ordre de 10 mètres pour les Calcaires massifs de l'Oxfordien et du Dogger, et de 20 mètres pour les Calcaires du Barrois.

Sur le site d'implantation de l'INB, au terme du million d'années, la ligne de côte des Calcaires du Barrois reculera vers le nord-ouest d'un à quelques kilomètres.

La zone des puits sera progressivement isolée du reste du plateau en raison de l'incision des marnes du Kimméridgien par les vallées de l'Orge et de l'Ormançon. Cette évolution accentue le découpage du plateau des Calcaires du Barrois, et détermine le développement de sources karstiques (exutoires de l'aquifère des Calcaires du Barrois) sur les versants de ces vallées.

Au niveau de la zone des descenderies, Il ne subsistera plus qu'une langue de calcaire, voire quelques buttes-témoins faisant relief à l'emplacement du site. Les têtes de descenderies, recoupées par la surface topographique, émergeront des marnes du Kimméridgien.

2.2.2.1.2 L'évolution des vallées

Les vallées vont évoluer de la même façon qu'au cours du dernier million d'années résultant de la succession de périodes de climat tempéré, boréal, périglaciaire et maximum glaciaire.

- les vallées sont soumises à un enfoncement discontinu et séquencé, marqué par l'évacuation des nappes alluviales et une succession d'épisodes d'incision dans le substratum rythmé par les cycles de 100 000 ans ;
- s'ensuit une érosion des versants avec dépôts de colluvions et mise en place en fond de vallées de nappes de cailloutis conduisant à un exhaussement par alluvionnement pendant le reste de la période de climat froid (périglaciaire et maximum glaciaire) ;
- s'opère ensuite une stabilisation des versants et la mise en place de plaines alluviales limoneuses en début des périodes de climat tempéré comme actuellement (périodes interglaciaires).

Des vitesses d'incisions moyennes[36] de l'ordre de 12 m - 15 m/100 000 ans sont attendues sur les cours d'eau de la Marne, l'Ornain et la Saulx. Au terme du million d'années sur le secteur, la répétition des épisodes d'incision des vallées dans le substratum jurassique au fil des cycles climatiques aura pour conséquences :

- d'accentuer le découpage du plateau des Calcaires du Barrois par les vallées entaillées dans les marnes du Kimméridgien, isolant progressivement la partie à l'est de la vallée de l'Ormançon ;
- d'étendre les affleurements des marnes du Kimméridgien vers l'aval des vallées de la Marne, de la Saulx et de l'Ornain, et de les faire apparaître dans les tronçons amonts des vallées de l'Orge, de la Bureau et de l'Ormançon ;
- de mettre à l'affleurement le sommet des Calcaires de l'Oxfordien dans la vallée de l'Ornain dans 450 000 ans, mais uniquement dans le cas où le cas enveloppe où les taux d'érosion et de surrection sont à l'équilibre. Cet affleurement est localisé au nord du secteur où l'Oxfordien aujourd'hui sous couverture.

[36] Les vitesses d'incision proposées n'ont de sens qu'en terme de bilan à l'échelle d'un cycle climatique de 100 000 ans mais peuvent être extrapolées sur le million d'années.

2.2.2.1.3 L'évolution des versants

L'évolution des versants qui relient les domaines de plateaux et de vallées est caractérisée par une dynamique moins bien réglée. Les processus intervenants dépendent de la lithologie (formations calcaire, argileuse ou argilo-calcaire) et pour une même lithologie leur efficacité varie :

- au cours du temps en fonction des conditions climatiques et des processus d'auto-engorgement des pentes par les produits de l'érosion, ainsi que des phases d'incisions des cours d'eau ;
- selon les lieux, en fonction de l'exposition, de la pente en surface et de la présence ou non d'un cours d'eau en contrebas permettant l'évacuation des produits d'altération.

Globalement, dans les dépressions et plaines argileuses d'avant-côtes, les taux d'érosion attendus sont très proches des taux d'incision des vallées qui les traversent.

2.2.2.2 L'érosion dans le contexte d'un climat perturbé par les activités anthropiques

Un climat perturbé par les activités anthropiques conduit à l'apparition de climats beaucoup plus chauds et humides qui ne s'amortissent que très lentement sur les prochains 600 000 ans à 800 000 ans avec le retour progressif au climat naturel actuel.

2.2.2.2.1 L'évolution des plateaux

Le plateau des Calcaires du Barrois est soumis à une ablation de l'ordre de 35 mètres au terme des prochains 500 000 ans, avec création de ravinements et creusement des vallons accidentant les versants des vallées. L'ensemble des altérites et la tranche des calcaires intensément fracturée par gélifraction seront évacués du plateau vers les vallées. Il est attendu pour la seule période initiale de 50 000 ans, caractérisée par un climat subtropical à pluies d'hiver, une ablation du plateau de Bure qui pourrait être de l'ordre de 10 mètres en moyenne.

Un recul de la limite du plateau des Calcaires du Barrois est attendu. Celle-ci pourrait se situer près de la limite sud-est de la ZIOS au terme des prochains 500 000 ans. À cette date, le site formant actuellement un relief de front de côte où seront implantées les têtes des descenderies et l'arrivée de l'installation terminale embranchée (ITE) aura été totalement érodé. Les têtes de descenderies émergeront plus au nord, dans une large dépression argileuse des marnes du Kimméridgien formant le Bassin amont de la vallée de l'Orge.

2.2.2.2.2 L'évolution des vallées

Au niveau des vallées, un exhaussement des fonds de vallées se produit en raison d'une capacité érosive des cours d'eau insuffisante au regard de la quantité des apports solides produits depuis les plateaux. Les vallées sont alors le siège d'un épandage massif d'alluvions. Elles sont occupées par des cours d'eau en tresse lors de la saison humide et à sec en été avec un régime de type oued. L'exhaussement maximal des fonds de vallées est atteint dans 350 000 ans à 400 000 ans environ, avant le retour plus fréquent des épisodes de climat boréal. Cet exhaussement pourrait alors atteindre les 20 mètres pour la vallée de la Marne à Joinville, et plusieurs mètres pour les vallées qui traversent la ZIRA (l'Orge et de l'Ormançon).

Un approfondissement des vallées se fera de nouveau à chaque entrée en période glaciaire, avec d'abord l'évacuation des masses alluviales, accumulées en périodes de climats chauds, puis l'entaille du substratum. Mais, sur l'ensemble du million d'années, l'incision des vallées restera moins importante que dans le cas du scénario d'évolution climatique naturelle. La différence d'incision pour la Marne à Joinville au terme du prochain million d'années pourrait être de l'ordre de 25 mètres. *A priori,* ce « retard » dans l'approfondissement des fonds de vallées reportera très largement au-delà du million d'années la date d'apparition d'affleurements des Calcaires oxfordiens dans la vallée de l'Ornain au nord de la zone de transposition. Sur toute cette durée, l'enfoncement des vallées permettra de nouveau l'approfondissement des réseaux karstiques, organisés et diffus, sur la partie nord-ouest de la ZIRA.

Le Bassin parisien est actuellement l'une des zones les plus stables de la plateforme ouest-européenne à l'écart des effets de la compression alpine. L'échelle de temps d'un million d'années[37] est une durée « courte » par rapport aux constantes de temps de l'évolution tectonique (qui s'exprime en dizaines de millions d'années).

L'évolution du milieu géologique sur le site d'implantation de l'INB est pilotée par les phénomènes naturels liés à la géodynamique interne et externe :

- **concernant la géodynamique interne**, compte tenu du continuum de la convergence entre les plaques africaine et eurasienne et de l'ouverture de l'Atlantique, on peut considérer que le contexte tectonique régional n'est pas modifié de façon significative sur le million d'années. On peut donc raisonnablement considérer un prolongement de l'évolution de la phase alpine en cours, en admettant le maintien sans grand changement sur cette durée du régime des contraintes tectoniques transmises par la lithosphère dans le bloc stable et asismique où se situe le site d'implantation de l'INB. Sur la durée du prochain million d'années, il y aura persistance du régime de déformation extrêmement lent qui caractérise le domaine dans lequel se situe le site de Meuse/Haute-Marne, situé hors des zones où se font les déformations absorbant le rapprochement des plaques. Ce domaine a été très peu déformé au cours de derniers 20 Ma, alors que se formaient les Alpes. Il n'est affecté que par un mouvement général de surrection caractérisé par une variabilité spatiale créant des ondulations de faible amplitude qui déforment l'ensemble de la lithosphère, de façon très lente et continue.

  Pour l'évolution du site d'implantation de l'INB, intervient ainsi la remontée relative qui se produit en direction du nord-ouest (de l'ordre de 100 m/Ma sur une distance de 90 km) mouvement qui va peu à peu réduire le plongement des couches en direction du nord-ouest ;
- **concernant la géodynamique externe**, les changements climatiques, combinés au soulèvement des terrains, déterminent deux schémas d'évolution géomorphologique possibles qui modifient i) la topographie (en conséquence des processus d'érosion et d'altération qui affectent les formations géologiques affleurant), ii) les écoulements en surface et dans les Calcaires du Barrois, et iii) la biosphère :
  - ✓ dans le cas de l'évolution naturelle du climat, les conditions actuelles de paysage stable vont perdurer encore pendant 50 000 ans. Au-delà, l'évolution géomorphologique sera marquée par l'incision des vallées lors de chaque entrée en période glaciaire, et une lente ablation des plateaux, combinées au développement périodique d'un pergélisol qui affectera toutes les couches aux affleurements et atteindra les Calcaires de l'Oxfordien en profondeur sur le site de Meuse/Haute-Marne. De nouveaux affleurements des calcaires oxfordiens pourront apparaitre en fond de vallée de l'Ornain, au nord/nord-ouest de la ZIRA, où cette couche est actuellement sous couverture, vers 400 000 ans à 500 000 ans en considérant des vitesses d'érosion et des taux de surrection enveloppe, et à l'équilibre ;
  - ✓ dans le cas d'une évolution climatique perturbée, au cours des premiers 500 000 ans durant lesquels le climat sera globalement chaud, le paysage du secteur de Meuse/Haute-Marne va se modifier d'une façon très différente du scénario précédent, du fait de l'érosion affectant le plateau des Calcaires du Barrois, tandis que les vallées seront le siège d'alluvionnements. Ce n'est qu'au-delà de 500 000 ans que l'incision des vallées va de nouveau se faire sentir. En termes de bilan, on aboutit à un paysage aplani avec un abaissement du relief de l'ordre de 35 mètres au terme des prochains 500 000 ans et de 45 mètres dans 1 Ma, (contre respectivement 10 mètres et 20 mètres dans le cas de l'évolution climatique naturelle) combinée au recul du relief de côte qui arrivera en limite sud-est de la ZIRA dans 500 000 ans. Dans ce scénario, la mise à l'affleurement du toit des Calcaires oxfordiens en fond de vallée de l'Ornain au nord du site se produirait largement au-delà du prochain million d'années.

[37] Choisie conventionnement en rapport avec la durée de décroissance de la radioactivité des déchets

2.3 Une évolution des écoulements hydrogéologiques du fait de l'évolution géodynamique du site

À l'état naturel, la formation hôte du Callovo-Oxfordien est saturée en eau. L'eau peut s'y déplacer verticalement, par drainance, selon le sens du gradient[38] imposé par la différence de charge hydraulique entre les formations géologiques sus et sous-jacentes plus perméables que le Callovo-Oxfordien, mais à une vitesse très lente due à la très faible perméabilité de l'argilite (de l'ordre de quelques centimètres par centaine de milliers d'années) (cf. Chapitre 3 du volume 4 du présent rapport).

Dans l'Oxfordien carbonaté et le Dogger, les écoulements d'eau sont horizontaux et globalement orientés vers l'ouest.

Ces conditions hydrauliques ne sont modifiées par le stockage que :

- durant la phase construction puis de fonctionnement, car la création et la ventilation des ouvrages provoquent une désaturation de l'argilite à leur voisinage ;
- et durant une période transitoire, après la fermeture de l'installation souterraine, marquée par le retour progressif à saturation du milieu géologique et des matériaux du stockage, où les écoulements convergent globalement vers les ouvrages. La durée de cette période de resaturation, estimée entre quelques dizaines de milliers et quelques centaines de milliers d'années dépend de la perméabilité du milieu (très faible pour les argilites du Callovo-Oxfordien) et des ouvrages (conception, dimensions, matériaux…), de l'effet des gaz (hydrogène essentiellement) qui retardent la fin de la resaturation.

Une fois les ouvrages resaturés, les pressions hydrauliques se rééquilibrent. Les scellements faiblement perméables s'opposent à la circulation d'eau dans le stockage et l'isolent hydrauliquement des formations géologiques sus-jacentes. Les écoulements dans les argilites du Callovo-Oxfordien s'organisent à nouveau en un régime unidirectionnel et vertical. Au cours de cette période, les évolutions géodynamiques et leurs conséquences en surface sont les principaux facteurs influant sur l'environnement géologique.

2.3.1 Les écoulements à l'actuel

S'inscrivant dans le contexte géologique du Bassin parisien, la structure générale se présente comme une succession de couches sédimentaires organisée en forme de cuvette résultat des conditions établies lors du dépôt des sédiments et au cours de leur évolution (diagenèse) jusqu'à l'actuel.

Le système hydraulique peut être vu comme un système multicouches constitué (cf. Chapitre 3 du volume 4 du présent rapport) :

- de couches à faible perméabilité dites « semi-perméable » : la formation hôte du Callovo-Oxfordien et les marnes du Kimméridgien ;
- des formations aquifères encaissantes du Dogger et de l'Oxfordien encadrant le Callovo-Oxfordien et l'aquifère karstique superficiel des Calcaires du Barrois qui repose sur les marnes du Kimméridgien.

[38] Par abus de langage, on parle de « gradient ascendant » pour désigner le moteur d'un écoulement vertical orienté vers la couche sus-jacente (vers le haut) et « gradient descendant » pour désigner celui d'un écoulement vertical orientés vers la couche sous-jacente (vers le bas).

Le système aquifère multicouche est affecté par les failles drainantes orientées sud-est/nord-ouest (direction de la contrainte tectonique majeure) de la Marne, de Poissons et de Brouthières ainsi que par les failles, peu perméables orientées sud-ouest/nord-est (perpendiculaires à la contrainte tectonique majeure), de Gondrecourt et de Joinville. Une zone dite « de fracturation diffuse » affectée par la fracturation mineure se trouve au sud de la zone de transposition et de la vallée de la Saulx (cf. La note « Le modèle hydrogéologique à l'Actuel et son évolution sur le prochain million d'années » (9)).

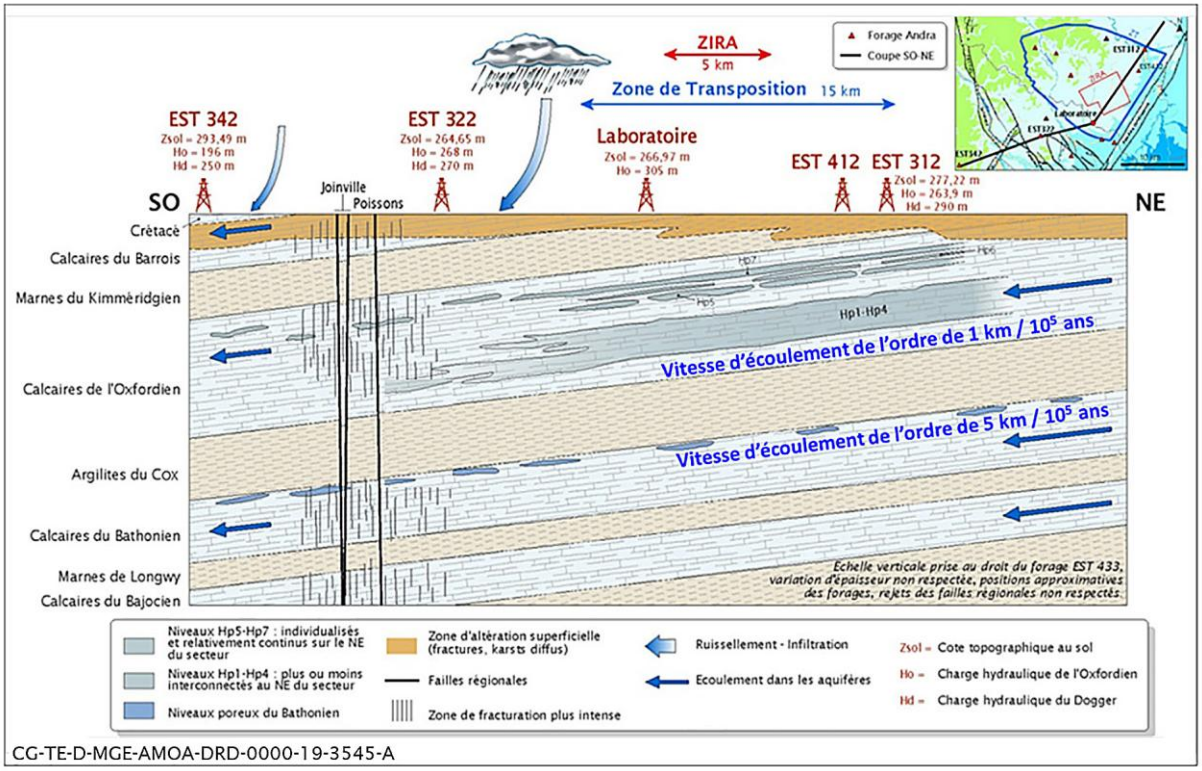


Figure 2-2 *Fonctionnement hydrogéologique du système aquifère multicouche à l'échelle du secteur de Meuse/Haute-Marne*

Les caractéristiques hydrogéologiques des principales formations aquifères du système telles qu'observées sont les suivantes (cf. Figure 2-3) :

- **l'aquifère superficiel des Calcaires du Barrois** est représenté par un système multicouche de trois formations aquifères (Calcaires sublithographiques, Calcaires du Dommartin et calcaires cariés) affectées par la fracturation et par la karstification et de deux formations semi-perméables (Pierre Châline et l'oolithe de Bure). Les écoulements souterrains sont aussi globalement dirigés vers le nord-ouest ;
- **l'aquifère de l'Oxfordien** est structuré hydrogéologiquement au nord-est du secteur en deux nappes (Oxfordien moyen et Oxfordien supérieur) incluant les horizons poreux et séparées par les marnes de la série grise. Au sud-ouest de la zone de transposition, à la faveur de la disparition du semi-perméable des marnes de la série grise, l'Oxfordien carbonaté ne forme qu'une seule nappe. Les écoulements sont globalement dirigés vers le nord-ouest avec un gradient de l'ordre de 0,4 % ;
- **l'aquifère encaissant sous-jacent du Dogger** est constitué de formations hétérogènes du Bathonien moyen et supérieur d'une centaine de mètres d'épaisseur. Les écoulements y sont globalement orientés vers le nord-ouest avec un faible gradient hydraulique (de l'ordre de 0,1 %) dans la zone de transposition.

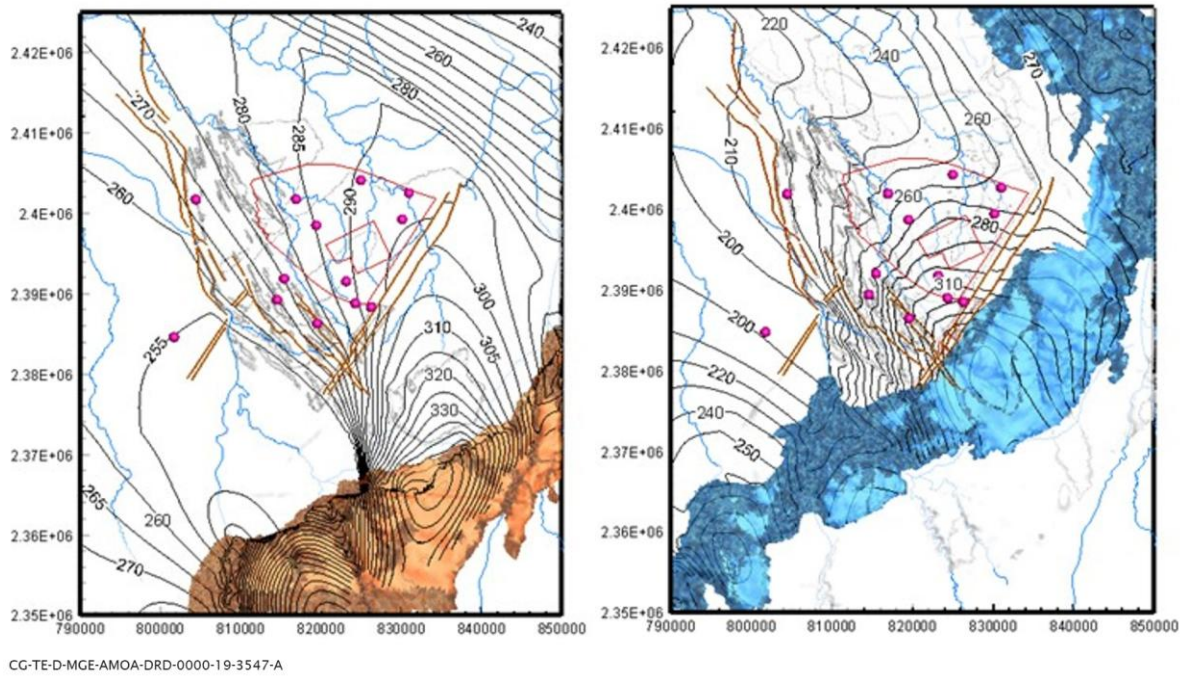


Figure 2-3 *Champs des écoulements observés dans les formations du Dogger (à gauche) et de l'Oxfordien carbonaté (à droite)*

LES FONDEMENTS DU MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE ACTUEL

La quantification des écoulements sur le site de l'INB est effectuée au moyen d'un modèle hydrogéologique à l'actuel calé sur les données des campagnes de reconnaissance (1994-2010). Il repose sur un ensemble de travaux relatifs à l'acquisition, au traitement et à l'analyse des données de terrain de toutes natures (géologiques, hydrologiques, hydrogéochimiques et isotopiques), complétés par des études phénoménologiques (transferts de traceurs naturels, effet des glaciations, etc.), et numériques (traitement des couplages et des échelles de représentation spatio-temporelle…). Les différentes phases de développement du modèle hydrogéologique ont été jalonnées par des campagnes de reconnaissance des formations géologiques et des études supports de caractérisation/conceptualisation géologique.

La description du système aquifère multicouche et des écoulements à l'actuel au moyen de la modélisation numérique vise à représenter la structure hydrogéologique multicouche ainsi que les directions et les vitesses d'écoulement observés. Cette représentation constitue l'état initial du site sur lequel se fondent notamment (i) l'évolution des écoulements dans le milieu géologique sur le prochain million d'années, support aux évaluations de performance et de sûreté long-terme, et (ii) l'influence du creusement, et de l'exploitation des ouvrages de liaison surface-fond de l'installation de stockage de l'INB sur les écoulements dans les formations encaissantes sus-jacentes, support aux études d'ingénierie, aux études d'impact et à la surveillance du milieu naturel.

Le modèle hydrogéologique à l'actuel intègre l'ensemble des données et des connaissances acquises notamment par l'ensemble des campagnes de reconnaissance réalisées durant les 25 dernières années. Les géométries des couches géologiques incluses dans la description hydrogéologique régionale et locale sont construites sur la base de différentes investigations et analyses du site (levés géophysiques et modélisation des géométries d'objets géologiques). Les valeurs de conductivité hydraulique et de porosité de ces couches résultent de plusieurs campagnes d'étude et d'analyse des données et d'études de modélisation numérique approfondies. L'extension latérale du domaine régional est cohérente avec les limites hydrogéologiques naturelles du Bassin parisien. La recharge du système aquifère se fait à partir des affleurements des couches géologiques et génère des écoulements dans les formations aquifères globalement orientés vers l'ouest et le nord-ouest (littoral de la Manche).

Le modèle d'écoulement à l'actuel de référence reproduit en régime permanent : (i) les écoulements régionaux observés dans les aquifères de l'Albien et du Néocomien et (ii) les écoulements, à l'échelle du secteur de Meuse/Haute-Marne, dans les encaissants de l'Oxfordien carbonaté et du Dogger, calés par rapport aux charges mesurées au droit des forages (cf. Figure 2-3) et dont la qualité est indiquée à la Figure 2-4. Le calage prend en compte les rôles hydrogéologiques des failles et de la fracturation.

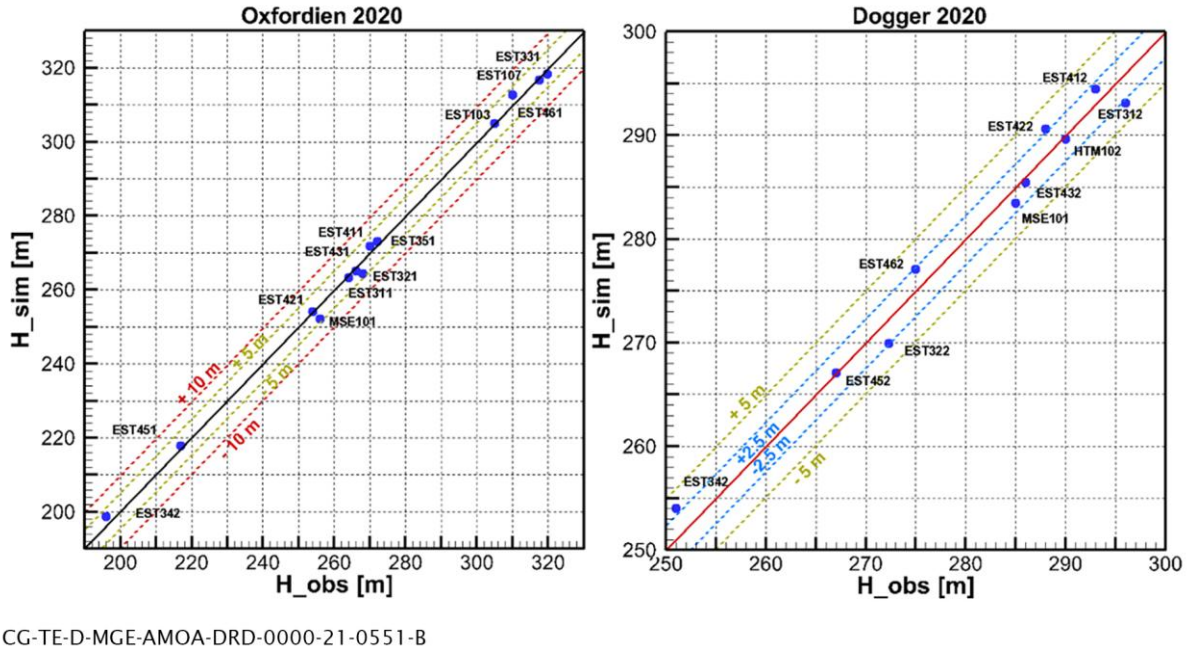


Figure 2-4 *Modèle hydrogéologique actualisé : comparaison entre les charges hydrauliques mesurées et celles simulées pour l'Oxfordien et le Dogger*

Ce modèle d'écoulement à l'actuel de référence constitue l'état initial pour la prédiction de l'évolution hydrogéologique au cours du prochain million d'années.

2.3.2 L'évolution des écoulements sur le prochain million d'années

Le fonctionnement du système aquifère multicouches actuel est affecté au cours du temps par les phénomènes géodynamiques internes et externes en modifiant le pendage des couches, en réduisant l'épaisseurs des couches (jusqu'à potentiellement disparition locale de couches superficielles) et en modifiant des aires d'affleurement et de la surface topographique sous les actions conjuguées de la surrection tectonique et de l'érosion/sédimentation.

L'évolution des écoulements sur le prochain million d'années selon une évolution perturbée du climat, telle qu'indiquée au chapitre 2.2.2 du présent volume, peut être évaluée vis-à-vis de la géodynamique externe. Les profondeurs d'érosion par incision des vallées sont réduites par rapport à une évolution naturelle du climat, du fait de l'occurrence du prochain maximum glaciaire au-delà de 500 000 ans, la mise à l'affleurement de l'Oxfordien surviendrait donc plus tard que pour une évolution naturelle du climat.

Dans ces conditions, l'évolution enveloppe des écoulements sur le prochain million d'années est liée à une évolution climatique naturelle notamment vis-à-vis de l'apparition possible d'exutoires naturels (cf. La note conceptuelle « Le modèle hydrogéologique à l'Actuel et son évolution sur le prochain million d'années » (9)).

LES FONDEMENTS DU MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE SUR LE PROCHAIN MILLION D'ANNEES

Les données de l'évolution climatique et leur utilisation dans les processus géodynamiques sont basées sur plusieurs études et travaux menés au niveau local (secteur Meuse/Haute-Marne) (cf. Le référentiel, tome I « L'histoire géologique et état actuel » (8)), régional (Bassin parisien) ou suprarégional qui couvre une grande partie de l'Europe occidentale. La construction de l'évolution 3D du système aquifère multicouche repose sur les résultats de plusieurs études et projets de recherche menés au cours des deux dernières décennies. Ces études couvrent l'évolution morphologique ainsi que l'évolution de la géométrie 3D qui est régie par les processus de surrection tectonique, d'érosion et de sédimentation. L'évolution géodynamique future à l'échelle du Bassin parisien est estimée sur la base de modèles de mouvements tectoniques pour les derniers millions d'années. Afin d'encadrer le domaine possible en termes de trajectoires hydrauliques dans l'Oxfordien et le Dogger (direction, temps) et d'exutoires naturels afférents, deux modèles d'évolution géodynamique sont considérés (cf. Chapitre 2.2 du présent volume) :

- un modèle géodynamique réaliste dit « phénoménologique » qui repose : (i) sur le principe de non-équilibre entre l'amplitude de la surrection tectonique et la profondeur d'érosion par incision des vallées et (ii) 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 parisien. Le taux de soulèvement tectonique est d'environ 25 $m.Ma^{-1}$ dans la zone du secteur et de moins de 40 $m.Ma^{-1}$ dans la partie la plus active du Bassin ;
- 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 d'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 $m.Ma^{-1}$ sur le secteur et dépasse 180 $m.Ma^{-1}$ au centre de la zone la plus active, située 90 km au NNO, dont le soulèvement relatif détermine l'évolution des pendages sur le secteur.

Le modèle d'érosion intègre (i) l'érosion mécanique (incision) des vallées qui se produit pendant les périodes de climat boréal suivi de période glaciaire, (ii) l'érosion chimique des reliefs entre les vallées (plateaux) par altération et dissolution des formations calcaires.

L'érosion mécanique, la sédimentation et l'altération chimique (érosion chimique) au cours des prochains millions d'années, selon un scénario d'évolution climatique naturelle et des modèles de surrection tectonique, ont été évaluées au moyen de modélisations numérique et analytique.

L'incision des vallées dans le substrat jurassique au cours des cycles climatiques : (i) augmente les calcaires des plaques de coupe du Barrois et isole progressivement la partie à l'est de la vallée de l'Ormançon et (ii) étend les affleurements de marnes kimméridgiens en aval des vallées de la Marne et de la Saulx jusqu'au sommet de l'affleurement Calcaire de l'Oxfordien dans la vallée de l'Ornain. Les taux moyens d'enlèvement du plateau calcaire, estimés sur la durée du prochain million d'années, sont de l'ordre de 10 mètres pour les Calcaires massifs de l'Oxfordien et du Dogger, et de 20 mètres pour le Calcaire du Barrois. Le modèle reflète le lent déplacement spatial des affleurements des formations géologiques, dû à l'ablation des plateaux (démantèlement de la karstification par le gel et le transport par gravité et par l'eau). Les simulations d'érosion/sédimentation produisent une estimation de l'élévation future de la surface topographique et des affleurements associés, pour le prochain million d'années selon les scénarios de climat et de surrection utilisés. L'incision maximale prévue le long des vallées fluviales du Bassin de la Seine est d'environ 60 mètres (modèle phénoménologique) et dépasse la centaine de mètres (modèle conservatif) au cours du prochain million d'années.

Au nord du secteur, l'érosion le long de la rivière Ornain (un affluent du Bassin de la Seine) conduit à ce qu'une partie significative de la couche de marnes d'âge kimméridgien est érodée après un million d'années :

- dans le cas d'une évolution géodynamique « phénoménologique », l'aquifère de l'Oxfordien sous-jacent reste confiné avec une couche de marne d'épaisseur, qui pourrait être localement d'environ 10 mètres, mais suffisante pour ne pas constituer d'affleurement de l'Oxfordien supérieur, et d'exutoire naturel possible des radionucléides sur le prochain million d'années ;
- dans le cas d'une évolution géodynamique maximaliste, à l'est du secteur, dans la vallée de la Meuse, la sédimentation est le processus dominant et la vallée de la Meuse est couverte de dépôts d'alluvions d'une épaisseur estimée à environ 15 mètres (cf. Figure 2-5). Loin des vallées fluviales, le mouvement de la topographie suit de près le soulèvement tectonique, et on observe la mise à l'affleurement dans la vallée de l'Ornain à partir de 450 000 ans environ à une dizaine de kilomètres environ au nord de la ZIRA (zone ovale pointillée de la figure 2-6), puis de manière plus continue ensuite le long de la vallée de l'Ornain.

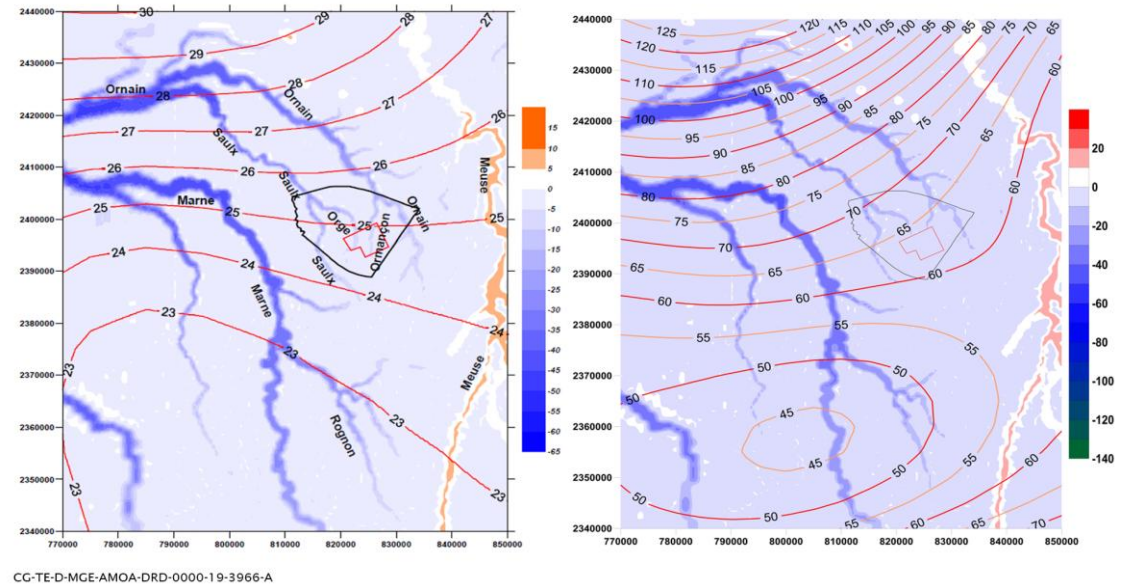


Figure 2-5 *Taux de surrection tectonique et amplitude de l'érosion et de la sédimentation à 1 Ma (scénario géodynamique « phénoménologique » à gauche et scénario géodynamique « maximaliste » à droite)*

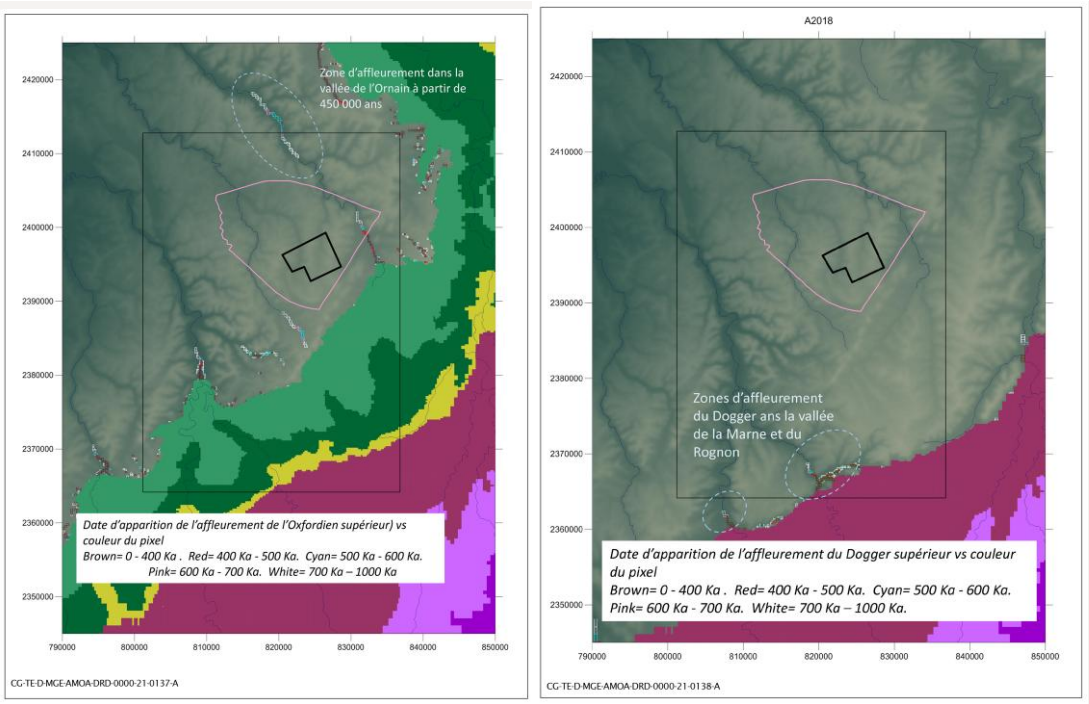


Figure 2-6 *Dates et points (pixel) d'apparition de l'affleurement de l'Oxfordien supérieur (à gauche) et du Dogger supérieur (à droite) dans le cas du scénario d'évolution géodynamique maximaliste*

2.3.2.1.1 Évolution des écoulements dans les encaissants du Dogger et de l'Oxfordien

L'évolution des écoulements dans les formations encaissantes de l'Oxfordien (horizons poreux) et du Dogger est analysée à l'échelle du secteur vis-à-vis de la localisation de l'installation souterraine de l'INB, et donc de la ZIOS dans la mesure où les ouvrages de liaison surface-fond ne constituent pas une voie de transfert privilégiée des radionucléides en solution. Ainsi, les caractéristiques des écoulements sur le futur (trajectoires, vitesses, temps de transfert…) prennent en compte de manière dynamique les deux scénarios d'évolution géodynamiques et les éventuels exutoires naturels réels et/ou potentiels du système hydrogéologique, y compris ceux pouvant apparaître sur le prochain million d'années.

Le régime de transfert des solutés issus du stockage au sein du Callovo-Oxfordien est essentiellement diffusif en raison de la faible conductivité hydraulique de la couche et des faibles gradients de charge associés. Lorsque les solutés atteignent l'aquifère de l'Oxfordien sus-jacent (Rauracien) et l'aquifère Dogger sous-jacent (Bathonien), le mode de transport dominant est convectif, régi par l'écoulement des eaux souterraines. L'évolution transitoire des voies d'écoulement résultant des processus de la surrection tectonique et de l'érosion est étudiée sur la base des résultats des simulations du transport de particules selon une approche lagrangienne. Les particules sont émises dans les aquifères de l'Oxfordien et du Dogger au droit des installations fond de l'INB à cinq temps caractéristiques du Callovo-Oxfordien : (i) à l'actuel et jusqu'à 500 000 ans par tranche de 100 000 ans. Pour chacune de ces situations temporelles, des trajectoires d'écoulements transitoires ont été simulées pour une période d'un million d'années correspondant à la période d'évolution géodynamique. Pour les particules libérées à l'actuel, le temps de transfert étudié est donc d'un million d'années et pour les autres temps caractéristiques, les temps de transfert étudiés dans les formations encaissantes vont de 900 000 ans à 500 000 ans.

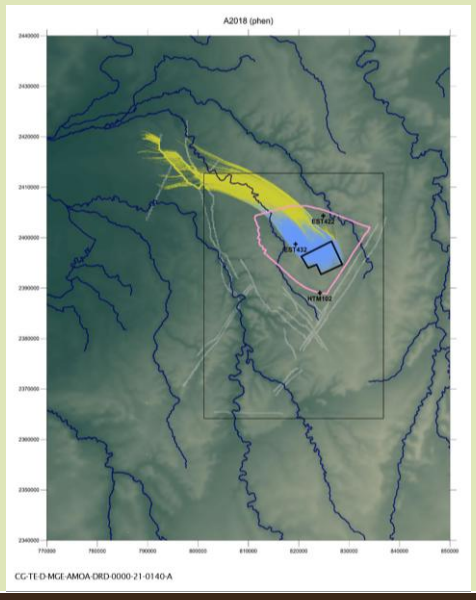
Pour la formation de l'Oxfordien, quel que soit le scénario d'évolution géodynamique (phénoménologique ou maximaliste), et les instants de relâchement dans l'aquifère au droit de la ZIRA, les trajectoires hydrauliques (résultant des panaches des particules émises à différents temps dans l'Oxfordien) sont dirigées vers le nord-ouest, avec des vitesses médianes de l'ordre de 1 km à 4 km tous les 100 000 ans, respectivement pour les valeurs hautes et basses de porosité cinématique. Les vitesses moyennes de transfert sont assez peu influencées par l'évolution géodynamique interne et externe, et dans les deux cas, avec des vitesses diminuent en fonction du temps de relâchement (de l'ordre de 20 % et 30 % par rapport à l'actuel respectivement pour les particules relâchées à 200 000 ans et 400 000 ans) :

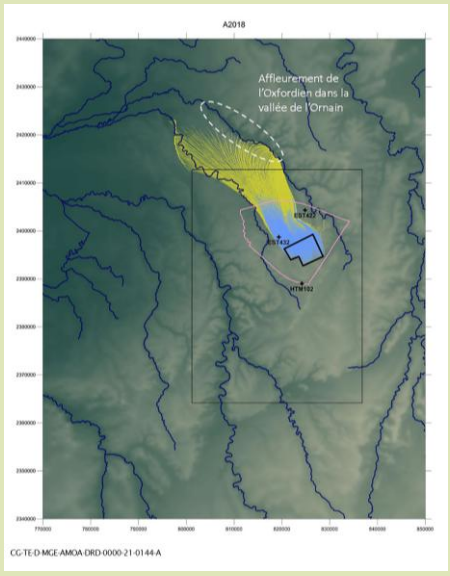
- dans le cas du scénario d'évolution géodynamique « phénoménologique », les particules émises à l'aplomb de la ZIOS n'atteignent pas, sur le prochain million d'années, la faille de la Marne lorsqu'elles sont relâchées au-delà de 200 000 ans pour des valeurs hautes de porosité cinématique et de 600 000 ans (plutôt représentatifs des temps caractéristiques de transfert dans le Callovo-Oxfordien) pour des valeurs basses de porosité cinématique. Toutes les trajectoires hydrauliques issues de la ZIOS restent régionales, dans la mesure où l'évolution géodynamique ne fait pas apparaître d'exutoire local ;
- dans le cas du scénario d'évolution géodynamique « maximaliste », les caractéristiques sont globalement identiques pour les trajectoires régionales ; cependant, la mise à l'affleurement de l'Oxfordien carbonaté initialement sous couverture dans la vallée de l'Ornain au nord de la ZIRA vers 400 000 ans à 500 000 ans conduit à « drainer » une partie des particules dans l'Oxfordien et 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 particules à l'Ornain sont de 500 000 ans à 600 000 ans pour des taux de particules atteignant l'exutoire de 10 % à 50 % selon la date de relâchement des particules.

Pour la formation du Dogger, quel que soit le scénario d'évolution géodynamique (phénoménologique ou maximaliste), et les instants de relâchement dans l'aquifère au droit de la ZIRA (cf. Figure 2-7), les panaches de particules du Dogger sont d'abord dirigés vers le nord-ouest, puis déviés vers le sud lorsqu'ils atteignent la faille de la Marne. Ils indiquent deux exutoires naturels localisés au sud de la ZIRA : la vallée de la Marne et celle du Rognon. Les vitesses moyennes varient entre 9 km et 16 km tous les 100 000 ans selon l'instant de relâchement, dans le cas d'une porosité cinématique basse (cf. La note conceptuelle « Le modèle hydrogéologique à l'Actuel et son évolution sur le prochain million d'années » (9)).

Trajectoires dans l'Oxfordien	
Scénario d'évolution géodynamique phénoménologique	Scénario d'évolution géodynamique maximaliste

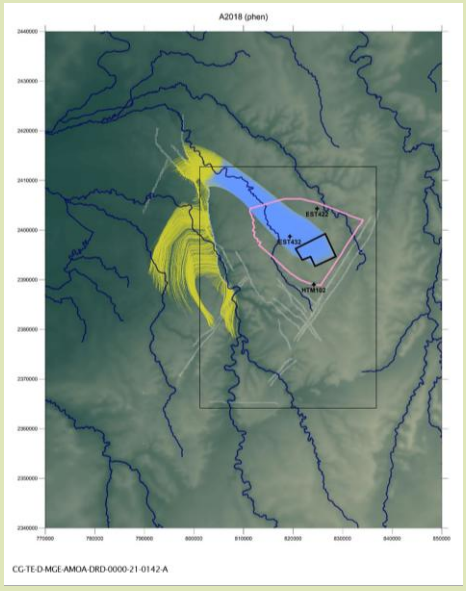
Particules relâchées à t = 400 000 ans





Trajectoires dans le Dogger	
Scénario d'évolution géodynamique phénoménologique	Scénario d'évolution géodynamique maximaliste

Particules relâchées à t = 400 000 ans



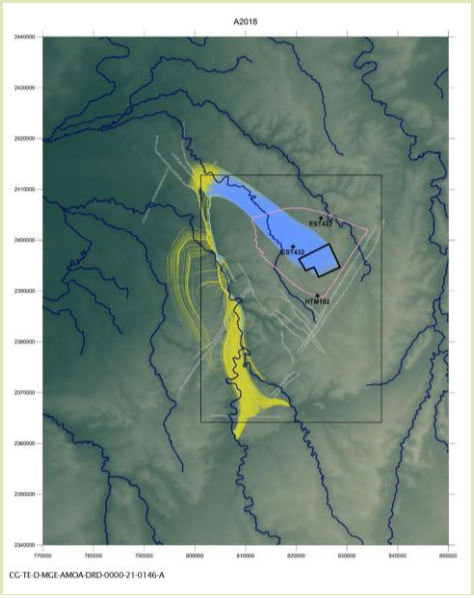


Figure 2-7 *Trajectoires hydrauliques dans l'Oxfordien moyen et le Dogger selon un scénario d'évolution géodynamique phénoménologique et maximalistes – particules relâchées à t = 400 000 ans – en jaune valeurs basses de porosité cinématique, en bleu, valeurs hautes de porosité cinématique*

2.3.2.1.2 Dans le Callovo-Oxfordien

L'évolution des charges hydrauliques dans l'Oxfordien et le Dogger conduisent à faire évoluer le gradient de charge hydraulique ascendant vertical dans le Callovo-Oxfordien, moteur du transfert convectif au sein des composants de l'installation souterraine de l'INB. L'évaluation de ce gradient est effectuée, sans tenir compte de la surpression naturelle. Le gradient est ainsi déterminé par les charges des encaissants supérieurs et inférieurs, et de l'épaisseur de Callovo-Oxfordien. Les évolutions des écoulements dans les formations encaissantes, l'Oxfordien carbonaté et le Dogger, induites par l'évolution géodynamique, selon un scénario maximaliste, au cours du prochain million d'années influencent leurs échanges hydrauliques à travers le semi-perméable de la formation du Callovo-Oxfordien.

À l'actuel, le tiers sud-est de la ZIRA se trouve avec un gradient hydraulique descendant (cf. Figure 2-8).

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 phénoménologique est caractérisé par un déplacement de la ligne d'inversion du gradient hydraulique naturel de quelques centaines de mètres en direction du nord-ouest, jusqu'à environ 400 000 ans, puis revenant vers la position à l'actuel au-delà, pour retrouver la position initiale (actuel) à un million d'années. 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 ;
- le scénario d'évolution maximaliste 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 un peu le gradient de charge ascendant vertical dans le 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 ZIRA est avec un écoulement ascendant au sein du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 2-8).

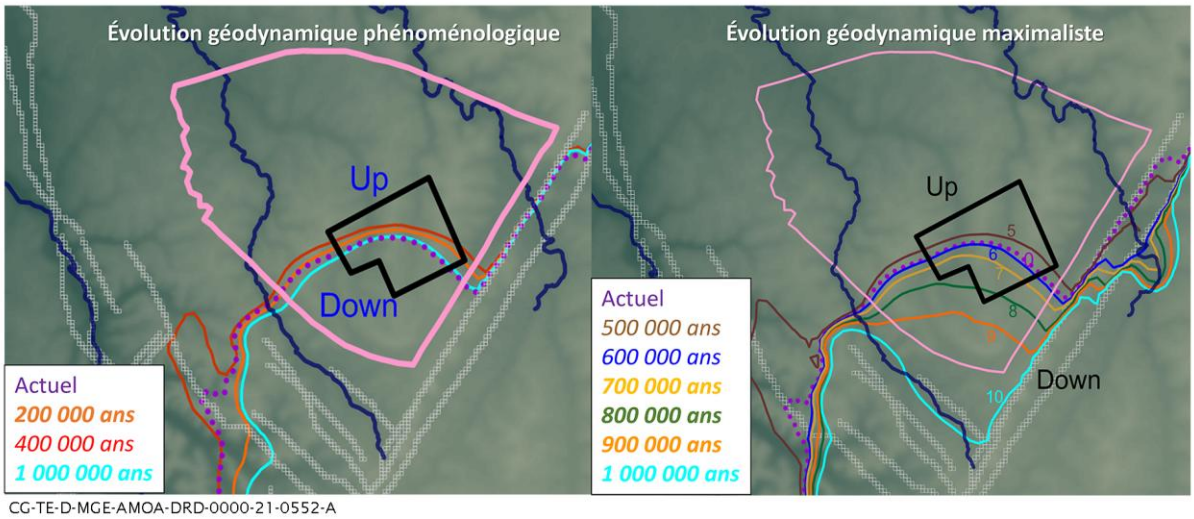


Figure 2-8 *Évolution de la ligne d'iso-gradient de charge vertical zéro à travers la formation du Callovo-Oxfordien selon un scénario d'évolution géodynamique « phénoménologique » (à gauche) et un scénario d'évolution « maximaliste » (à droite)*

Le Bassin parisien est actuellement l'une des zones les plus stables de la plateforme ouest-européenne à l'écart des effets de la compression alpine. L'échelle de temps d'un million d'années[39] est une durée « courte » par rapport aux constantes de temps de l'évolution tectonique (qui s'exprime en dizaines de millions d'années).

À l'actuel :

- l'aquifère de l'Oxfordien est structuré hydrogéologiquement au nord-est du secteur en deux nappes (Oxfordien moyen et Oxfordien supérieur) incluant les horizons poreux et séparées par les marnes de la série grise. Au sud-ouest de la zone de transposition, à la faveur de la disparition du semi-perméable des marnes de la série grise, l'Oxfordien carbonaté ne forme qu'une seule nappe. Les écoulements sont globalement dirigés vers le nord-ouest avec un gradient de l'ordre de 0,4 % ;
- l'aquifère encaissant sous-jacent du Dogger est constitué de formations hétérogènes du Bathonien moyen et supérieur d'une centaine de mètres d'épaisseur. Les écoulements y sont globalement orientés vers le nord-ouest avec un faible gradient hydraulique (0,1 %) dans la zone de transposition.

L'évolution tectonique possible au cours du prochain million d'années a été estimée au mieux des connaissances, en visant à encadrer *in fine* les conséquences en termes d'écoulements des eaux dans le système multicouche du secteur de Meuse/Haute Marne par :

- un modèle d'évolution géodynamique « maximaliste » (taux d'incision des vallées assimilés aux taux de surrection), dans lequel la surrection est de l'ordre de 80 $m.Ma^{-1}$ sur le secteur de Meuse/Haute-Marne et dépasse 180 $m.Ma^{-1}$ au centre de la zone plus active située au nord-nord-ouest du secteur. Ce modèle, qui fournit une estimation haute des modifications possibles du système hydrogéologique au cours du prochain million d'années, conduit à l'apparition d'un exutoire naturel de l'Ornain, par affleurement de l'Oxfordien, entre 400 000 ans et 500 000 ans au nord/nord-ouest de la ZIRA ;
- un modèle de surrection dit « phénoménologique », car plus en accord avec le contexte géodynamique et la très faible activité sismotectonique de la région, établi en différenciant les taux d'incision des vallées des taux de surrection. Le taux de surrection est de de l'ordre de 40-50 $m.Ma^{-1}$ sur le secteur et inférieur à 80 $m.Ma^{-1}$ au centre de la zone plus active située au nord-nord-ouest du secteur. La mise à l'affleurement des calcaires de l'Oxfordien dans la vallée de l'Ornain, au nord-nord-ouest de la ZIRA se produira au-delà du million d'années.

Corrélativement :

- dans la formation de l'Oxfordien Carbonaté, Selon le schéma d'évolution phénoménologique, les trajectoires hydrauliques issues de la ZIOS restent régionales et orientées nord-ouest (l'évolution géodynamique ne fait pas apparaître d'exutoire local) : l'exutoire de la faille de la Marne n'est pas atteint sur le million d'années en considérant préalablement les temps caractéristiques de transfert à travers la formation du Callovo-Oxfordien ;
- dans la formation du Dogger, les panaches de particules du Dogger sont d'abord dirigés vers le nord-ouest, puis déviés vers le sud lorsqu'ils atteignent la faille de la Marne. Ils indiquent deux exutoires naturels localisés au sud de la ZIRA : la vallée de la Marne et celle du Rognon.

[39] Choisie conventionnement pour le stockage en rapport avec la durée de décroissance de la radioactivité des déchets.

3

L'évolution du système de stockage

3.1 Le transitoire thermique dans les ouvrages souterrains et le Callovo-Oxfordien 58
3.2 Le transitoire hydraulique/gaz dans l'installation souterraine 67
3.3 L'évolution chimique des ouvrages et du milieu géologique environnant 78
3.4 L'évolution mécanique des ouvrages et du milieu géologique environnant 86

3.1 Le transitoire thermique dans les ouvrages souterrains et le Callovo-Oxfordien

3.1.1 Un état thermique initial du site d'implantation déterminé par le flux géothermique et les propriétés thermiques des formations sédimentaires

L'état thermique initial du milieu géologique au droit du site d'implantation des ouvrages souterrains est déterminé par le flux géothermique naturel (que l'on peut considérer comme constant) et les propriétés thermiques des couches, acquises au cours de leur formation.

Condition limite du système, les variations de température en surface diminuent avec la profondeur de manière exponentielle. L'effet d'une variation de température en surface sur le sous-sol est d'autant plus faible que la durée de cette variation est courte et que la profondeur est grande. Ainsi, les variations météorologiques de courte période (cycles journaliers, saisonniers…) ressenties en surface sont amorties en profondeur et les variations temporelles liées à ces cycles se lissent en quelques mètres au cours de leur pénétration. Les cycles climatiques et notamment les cycles d'une période de 100 000 ans culminant par une situation de maximum glaciaire ont une incidence qui se propage plus en profondeur sur des centaines voire des milliers de mètres mais à des niveaux très faibles. L'héritage des cycles passés, notamment du dernier maximum glaciaire, correspond aujourd'hui à quelques degrés à plus de 500 mètres.

Ainsi, la série sédimentaire montre actuellement, au niveau du site d'implantation de l'INB une température moyenne de 10 °C environ à proximité de la surface augmentant jusqu'à 22 °C environ dans le Callovo-Oxfordien à 500 mètres de profondeur.

3.1.2 Le cadre général du transitoire thermique

Le dégagement thermique des colis de déchets HA (et dans une moindre mesure de certains colis de déchets MA-VL) entraine une élévation transitoire de température dans les ouvrages souterrains et dans la formation du Callovo-Oxfordien.

À grande échelle, le processus de transfert de la chaleur au sein de la formation du Callovo-Oxfordien est la conduction thermique (loi de Fourier) et n'est pratiquement pas influencé par les autres processus physiques : il n'y a pas de thermoconvection à grande échelle compte tenu de la très faible perméabilité du milieu et des faibles gradients de température comme le souligne l'analyse des nombres adimensionnels de Peclet et de Rayleigh (cf. Fiche 3.1 « Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

LES FONDEMENTS DE LA PRÉDICTION DE LA DIFFUSION DE LA CHALEUR

Les connaissances sur la conductivité thermique reposent sur (i) des données sismiques 3D obtenues à l'échelle de la ZIOS, (ii) des mesures effectuées sur de nombreux échantillons prélevés au Laboratoire de recherche souterrain et (iii) les résultats d'une analyse inverse effectuée dans le cadre d'une expérimentation de chauffe *in situ* en forages (TER[40]-TED[41])(10). Les données sismiques mettent en évidence une variabilité spatiale limitée de ce paramètre, mais néanmoins prise en compte dans le dimensionnement thermique des ouvrages souterrains. Au sein de la formation du Callovo-Oxfordien, la conductivité thermique est de l'ordre de 1,3 $W.m^{-1}.K^{-1}$ à 2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ (cf. Figure 3-1) avec une anisotropie dans les unités argileuses (la composante horizontale de ce paramètre étant plus élevée que sa composante verticale). La conductivité thermique dépend de la saturation, mais cette dépendance influence très peu le transitoire thermique compte tenu de sa variation qui affecte uniquement le champ proche des ouvrages ventilés (cf. Fiche 3.1 « Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

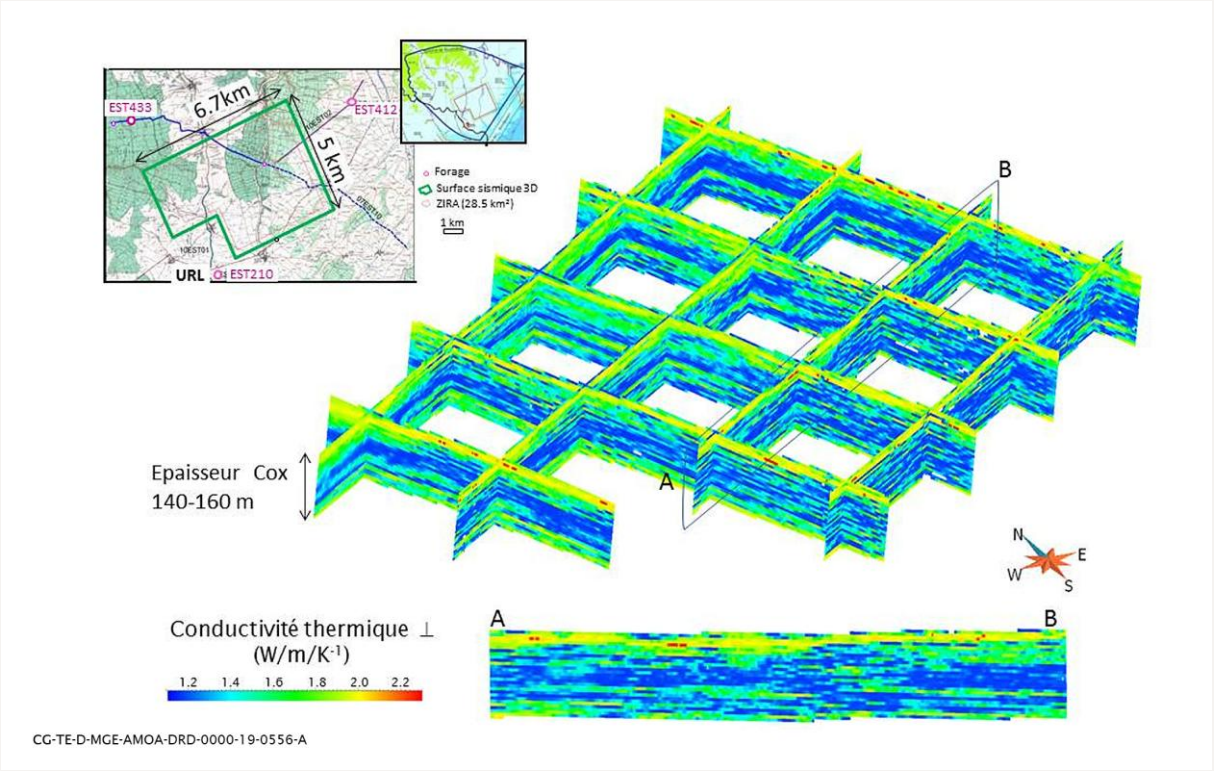


Figure 3-1 *Distribution spatiale de la conductivité thermique moyenne perpendiculaire à la stratification à l'échelle de la ZIOS*

Les autres paramètres thermiques intervenant dans le processus de conduction (densité, chaleur spécifique) sont également connus précisément dans le Callovo-Oxfordien et présentent une faible variabilité spatiale (quelques %).

[40] TER : Réponse de l'argilite à une réponse thermique : premier essai *in situ* (essai avec un forage de chauffe) pour caractériser le comportement thermo-hydromécanique du Callovo-Oxfordien et comparer les paramètres THM à ceux mesurés sur échantillon.

[41] TED : Expérimentation « thermique deux » : deuxième essai *in situ* pour caractériser comportement thermo-hydromécanique du Cox. La configuration de l'essai est similaire à celle des alvéoles HA à petite échelle ; ici avec trois forages chauffants de 16 mètres de profondeur pour regarder l'impact de la superposition des champs thermiques.

La dépendance à la température de tous ces paramètres est faible dans le domaine de températures affectant la formation. En particulier, la conductivité thermique est quasi-indépendante de la température.

En outre, les connaissances bien établies sur les processus réactionnels des milieux argileux en température montrent que l'effet du transitoire thermique à l'échelle du Callovo-Oxfordien en grand n'est pas de nature à entrainer des transformations minéralogiques significatives et à une évolution de l'équilibre eau porale-solides après retour aux conditions géothermales naturelles (cf. Chapitre 3.3 « L'effet du transitoire thermique sur les propriétés physico-chimiques du Callovo-Oxfordien (transformations minéralogiques et équilibres solides-fluides) » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques (1)).

L'ensemble de ces éléments, associés à la limitation par conception des domaines de température, contribue à une bonne maitrise des phénomènes de transfert thermique dans le milieu comme l'ont soulignées les expérimentations thermiques TER et TED menées au Laboratoire de recherche souterrain et plus globalement à l'échelle de la formation.

Le transitoire thermique est caractérisé (cf. Fiche 3.1 « Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :

- d'abord par une phase d'élévation progressive de la température dans les alvéoles et le milieu géologique environnant jusqu'à l'atteinte d'un paroxysme : elle résulte de la puissance thermique dégagée par les déchets et de leurs interactions à distance (interactions entre colis au sein d'un même alvéole et interactions entre alvéoles). Le paroxysme thermique est limité en intensité par conception au regard de la **limite admissible de 100 °C**[42] (cf. Chapitre 1.4.4.1.1 du présent volume) ;
- puis décline avec la décroissance radioactive des déchets (en lien avec leur inventaire radiologique) jusqu'au retour à une température géothermique naturelle.

L'intensité du paroxysme thermique est d'autant plus faible et atteinte d'autant plus tardivement à mesure que l'on s'éloigne de la source de chaleur ce qui amène à appréhender l'évolution thermique du stockage à différentes échelles :

- au niveau des alvéoles de stockage et des premiers mètres de Callovo-Oxfordien, à leur pourtour, là où la perturbation thermique est la plus marquée ;
- de façon plus globale, à l'échelle des formations géologiques (champ lointain).

La distance entre, d'une part, le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA et, d'autre part, le quartier de stockage MA-VL, de l'ordre de plusieurs centaines de mètres, empêche les interactions thermiques, ce qui permet de séparer l'analyse du transitoire thermique entre ces grandes familles de déchets (cf. Chapitre 1.4.3 du présent volume).

[42] L'Andra se fixe une limite admissible de 100 °C au contact des argilites afin de rester dans un domaine de température couvert par l'état des connaissances et compatible avec la capacité à rendre compte des phénomènes et de leurs couplages. Le dimensionnement thermique des ouvrages est déterminé en considérant un critère de 90 °C incluant donc une marge de 10°C afin de garantir le non-dépassement de la limite de 100 °C, même en tenant compte des incertitudes résiduelles.

3.1.3 À l'échelle du milieu géologique et du Callovo-Oxfordien en grand

La charge thermique liée à la production de chaleur par les déchets radioactifs (essentiellement les déchets HA et dans une moindre mesure quelques familles de déchets MA-VL) se propage par conduction dans le Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes.

La quasi-intégralité du transfert de chaleur en grand se fait verticalement : du fait de la condition limite thermique de la surface topographique, la majeure partie de la chaleur se dissipe en direction de la surface. La durée du transitoire thermique (*i.e.* Le temps caractéristique de retour à la température géothermale à 5 °C près) est de l'ordre de de quelques milliers d'années pour le quartier de stockage HA et quelques centaines d'années pour le quartier de stockage MA-VL.

Les cinétiques d'élévation de température sont lentes : au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, l'élévation maximale de température et son temps d'atteinte sont respectivement de l'ordre de 15 °C et 1 000 ans au droit des quartiers de stockage HA. Dans les formations encaissantes, l'élévation de température est maximale à environ 2 000 ans et de l'ordre de 7 °C à la limite entre l'Oxfordien et le Kimméridgien.

Au-delà d'une distance de quelques mètres des alvéoles HA, les gradients thermiques sont inférieurs au °C/m. À l'échelle du milieu géologique, la charge thermique est donc relativement homogène.

3.1.4 À l'échelle du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA

La quantité totale de chaleur dégagée dans la zone de stockage HA représente plus de 85 % de la puissance thermique dégagée par l'ensemble de l'inventaire de l'INB (1 % pour les déchets HA0 du quartier pilote HA).

À l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien au droit de la zone HA, le transitoire thermique s'inscrit sur une durée millénaire (de l'ordre de 15 ans en champ proche des alvéoles et de l'ordre de 1 000 ans aux frontières sus et sous-jacentes). Les niveaux de températures sont respectivement de l'ordre de 80 °C à 40-50 °C environ et les gradients limités à quelques dixièmes de $°C.m^{-1}$ du fait de l'homogénéisation thermique.

Le flux de chaleur traversant les frontières haute et basse du Callovo-Oxfordien au droit du quartier pilote et du quartier de stockage HA est dissymétrique en raison du gradient géothermal naturel (cf. Figure 3-2). Compte tenu de l'élévation de température avec la profondeur, la chaleur dégagée par les colis de déchets se dissipe vers la surface. Du fait du profil vertical de température « en cloche » au cours du transitoire thermique, une partie de la chaleur des colis se diffuse temporairement vers le Dogger, avant d'être progressivement évacuée vers la surface à long terme. Le flux traversant le toit du Callovo-Oxfordien atteint un pic d'amplitude correspondant à environ six fois le flux géothermal ventilés (cf. Fiche 3.1 « Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

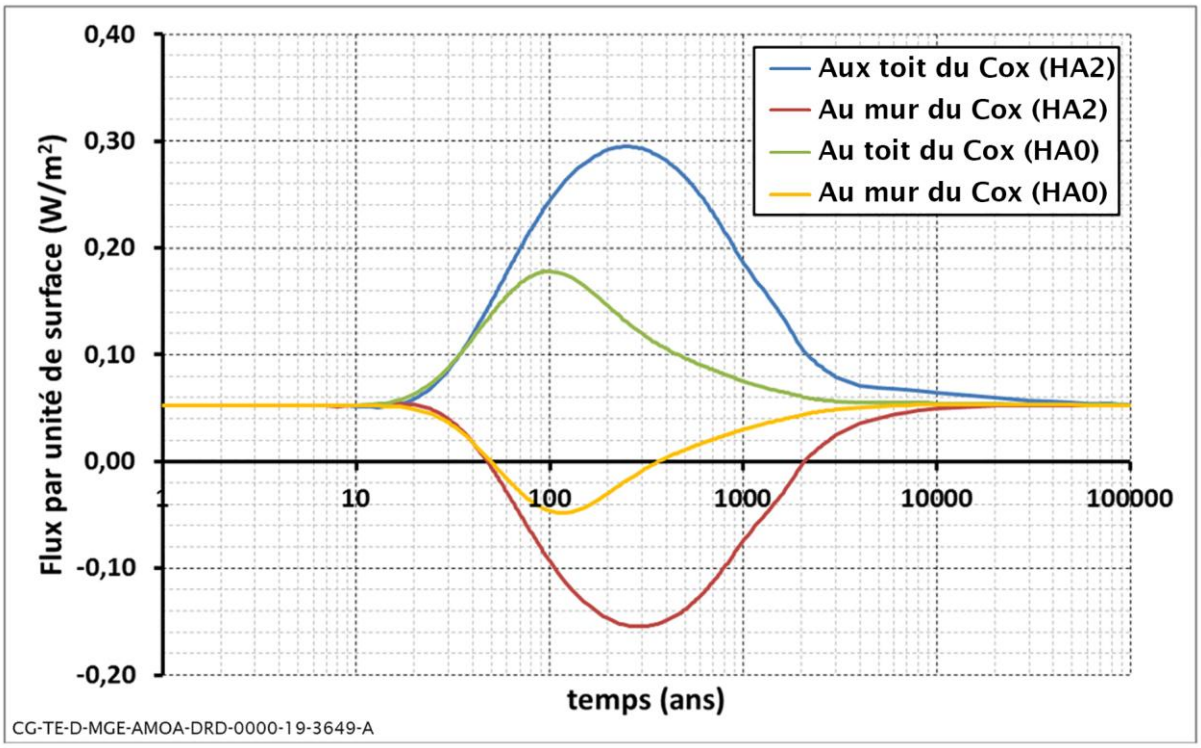


Figure 3-2 *Évolutions temporelles des flux de chaleur traversant le toit et le mur du Callovo-Oxfordien au droit d'un quartier de stockage de colis HA et du quartier pilote HA*

Du fait de la distribution de puissance relativement homogène dans les quartiers de stockage HA, les évolutions de température sont comparables au sein des quartiers contenant les différentes familles de colis (hormis le quartier pilote HA). La diffusion de la chaleur des colis dans le Callovo-Oxfordien s'effectue essentiellement suivant la direction radiale compte tenu du rapport élevé entre la longueur des alvéoles (respectivement 80 mètres pour les alvéoles du quartier pilote HA à 150 mètres pour les alvéoles des quartiers de stockage HA) et leur diamètre (environ 80 cm). La durée du transitoire thermique (*e.g.* Le temps caractéristique de retour à la température géothermale à 5 °C près) est de l'ordre de 10 000 ans pour les quartiers de stockage HA et de l'ordre de 500 ans pour le quartier pilote HA.

3.1.4.1 Au niveau des alvéoles du quartier pilote HA

La faible puissance thermique des colis HA0 stockés dans le quartier pilote HA conduit à des niveaux de température modérée, notamment en champ proche de l'alvéole (et *a fortiori* à plus grande distance). En tout point de la formation, la température ne dépasse jamais 50 °C : les paroxysmes sont de l'ordre de 45 °C et 40 °C respectivement en paroi d'alvéole et au demi-entraxe entre alvéoles, et sont atteints respectivement entre 20 ans et 30 ans après la mise en place des colis. Dans le plan du quartier, la température devient relativement homogène au-delà d'un siècle après la mise en place des colis. Au droit du quartier, les élévations de température au toit et au mur de la formation sont (très) faibles, d'au plus quelques °C à quelques centaines d'années.

3.1.4.2 Au niveau des alvéoles des quartiers de stockage HA

Au sein des quartiers de stockage HA, la température augmente très rapidement en champ proche de l'alvéole : en paroi d'alvéole, elle atteint un maximum de l'ordre de 80 °C entre 10 ans et 15 ans après la mise en place des colis (cf. Figure 3-3). L'amplitude de ce pic est limitée par dimensionnement (dimensionnement à 90 °C maximum en peau de colis) et du fait de la faible conductivité équivalente de l'air dans le jeu chemisage/colis. Par la suite, la température en paroi d'alvéole décroît rapidement jusqu'à un siècle puis plus lentement au-delà.

En champ lointain, les pics de température sont moins élevés et plus tardifs. Au demi-entraxe entre alvéoles, soit à une distance d'environ 25 mètres des alvéoles, le pic est atteint entre 400 ans et 500 ans ; il est de l'ordre de 40 °C à 50 °C suivant la famille de colis et leur emplacement dans les quartiers de stockage HA. Au droit des quartiers de stockage HA, le pic de température au toit et au mur de la formation du Callovo-Oxfordien est atteint autour du millier d'années et s'élève à environ 40 °C (cf. Fiche 3.1 « Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

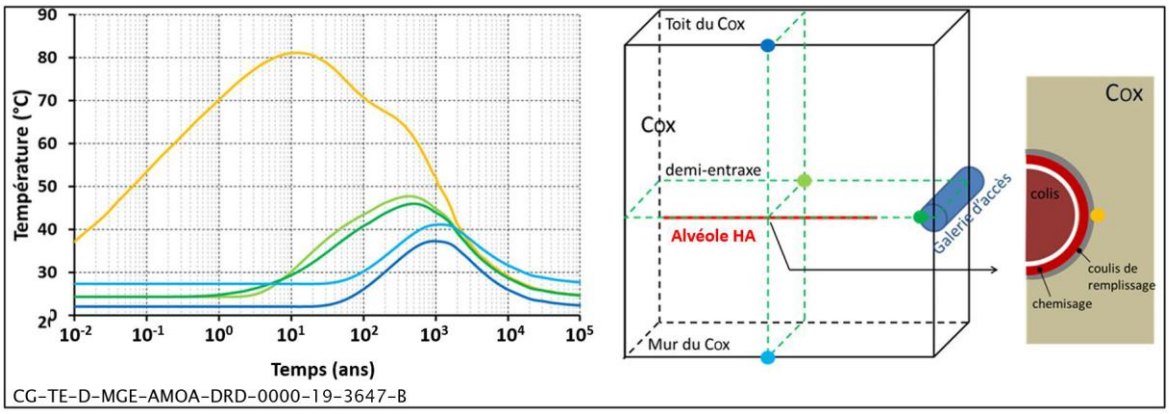


Figure 3-3 *Évolutions temporelles de la température en différents points autour d'un alvéole de stockage de colis HA2*

3.1.5 À l'échelle du quartier de stockage MA-VL

La quantité totale de chaleur dégagée par le quartier de stockage MA-VL représente environ 2 % de la chaleur dégagée par l'ensemble de l'inventaire de l'INB sur toute la durée du stockage. À l'échelle du quartier de stockage MA-VL, la distribution de puissance thermique est inégale du fait de la diversité des colis : les alvéoles contenant des déchets athermiques évoluent en conditions isothermes (aux effets près de la température de l'air de ventilation limitée à la période d'exploitation) tandis que les alvéoles contenant des déchets faiblement exothermiques (essentiellement les alvéoles de déchets conditionnés en colis CSD-C[43], C1PG^{SP} et Pivic[44]) sont le siège d'un transitoire thermique d'élévation de température puis de décroissance thermique. La diffusion de la chaleur des colis dans le Callovo-Oxfordien s'effectue essentiellement suivant la direction radiale compte tenu du rapport élevé entre la longueur des alvéoles (500 mètres) et leur diamètre (~10 mètres). Les niveaux de température dans le Callovo-Oxfordien n'atteignent jamais 65 °C en raison du critère thermique imposé aux composants intra-alvéole en béton. De ce fait, les gradients de température sont limités 2 à 3 °C.m^{-1} à court terme et en champ proche alvéole. En champ lointain, les gradients de température sont inférieurs au °C.m^{-1} ventilés (cf. Fiche 3.1 « Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

[43] Les déchets de structure sont répartis dans des étuis. Ces derniers sont ensuite compactés. Les galettes ainsi obtenues sont empilées dans un conteneur standard de déchets compactés (CSD-C) en acier inoxydable, à raison d'environ huit par colis.

[44] Le colis PIVIC est le colis résultant du traitement thermique des déchets α N3S par le procédé PIVIC (procédé d'incinération vitrification in can).

3.1.5.1 Au niveau des alvéoles de déchets CSD-C

En champ proche de l'alvéole, la température dans le Callovo-Oxfordien atteint un maximum de l'ordre de 50 °C à 55 °C en paroi d'alvéole en quelques dizaines d'années. Au-demi-entraxe entre alvéoles, la température atteint 40 °C à 45 °C autour de la centaine d'années. Au-delà, la décroissance des températures est relativement lente et la distribution de température s'homogénéise progressivement.

Au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, au droit des alvéoles de colis CSD-C, la température atteint un pic de l'ordre de 30 à 35 °C vers 1 000 ans.

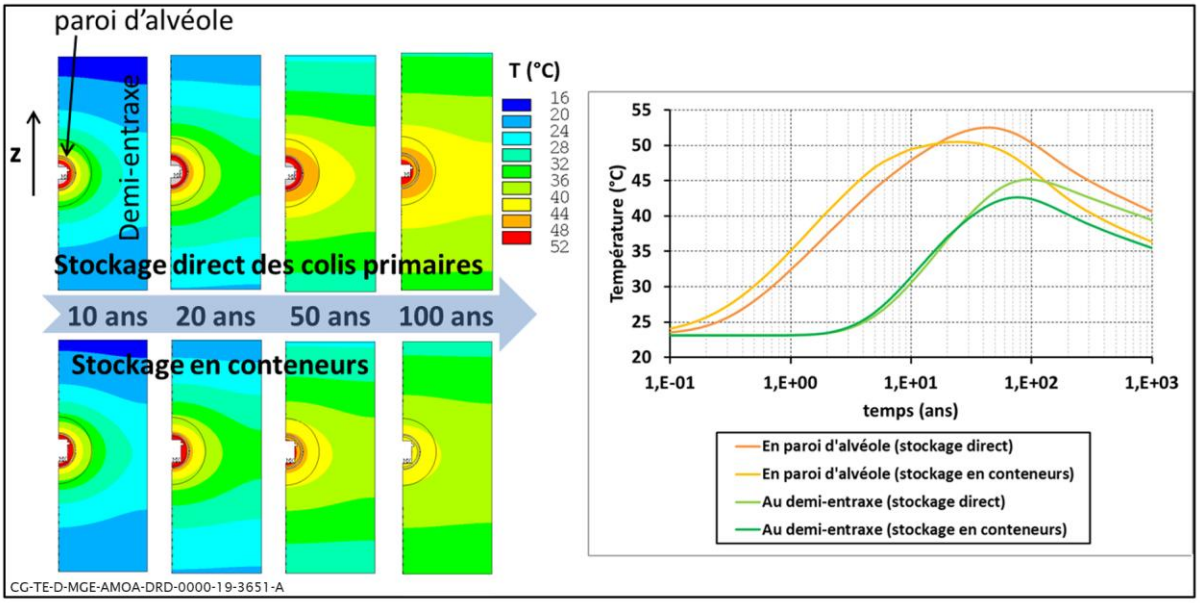


Figure 3-4 *Distribution et évolution temporelle des températures autour d'alvéoles de colis CSD-C*

3.1.5.2 Au niveau des alvéoles de déchets Pivic et C1PG^{SP}

En champ proche de l'alvéole, la température dans la formation augmente lentement après la mise en place des colis et atteint un maximum de l'ordre de 50 °C à 55 °C en paroi d'alvéole entre 50 ans et 100 ans après mise en stockage (cf. Figure 3-5). Au-demi-entraxe entre alvéoles, la température augmente plus tardivement et atteint 35 °C à 40 °C entre 150 ans et 200 ans. Au-delà, la vitesse de décroissance des températures dépend de la proximité d'alvéoles contenant ou non d'autres colis exothermiques et la distribution de température dans le plan du quartier s'homogénéise progressivement ventilés (cf. Fiche 3.1 « Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

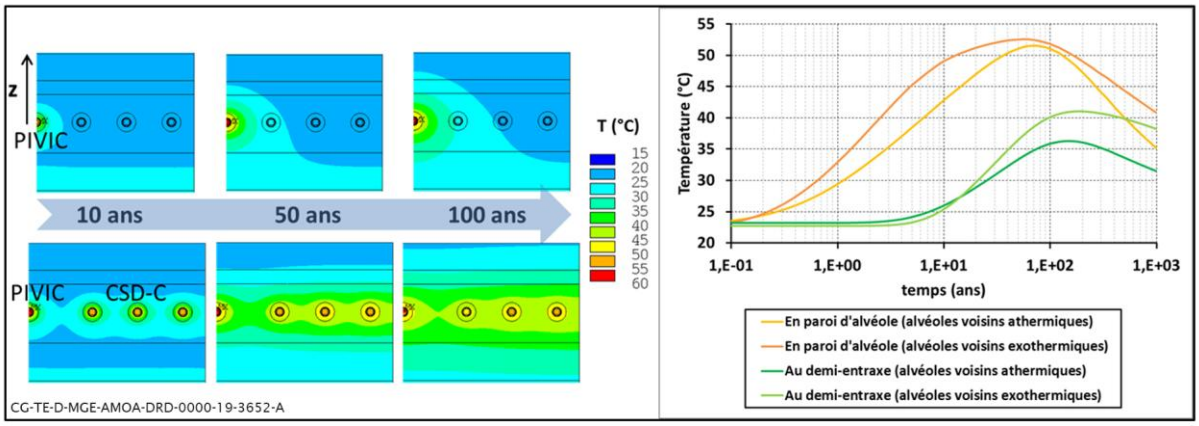


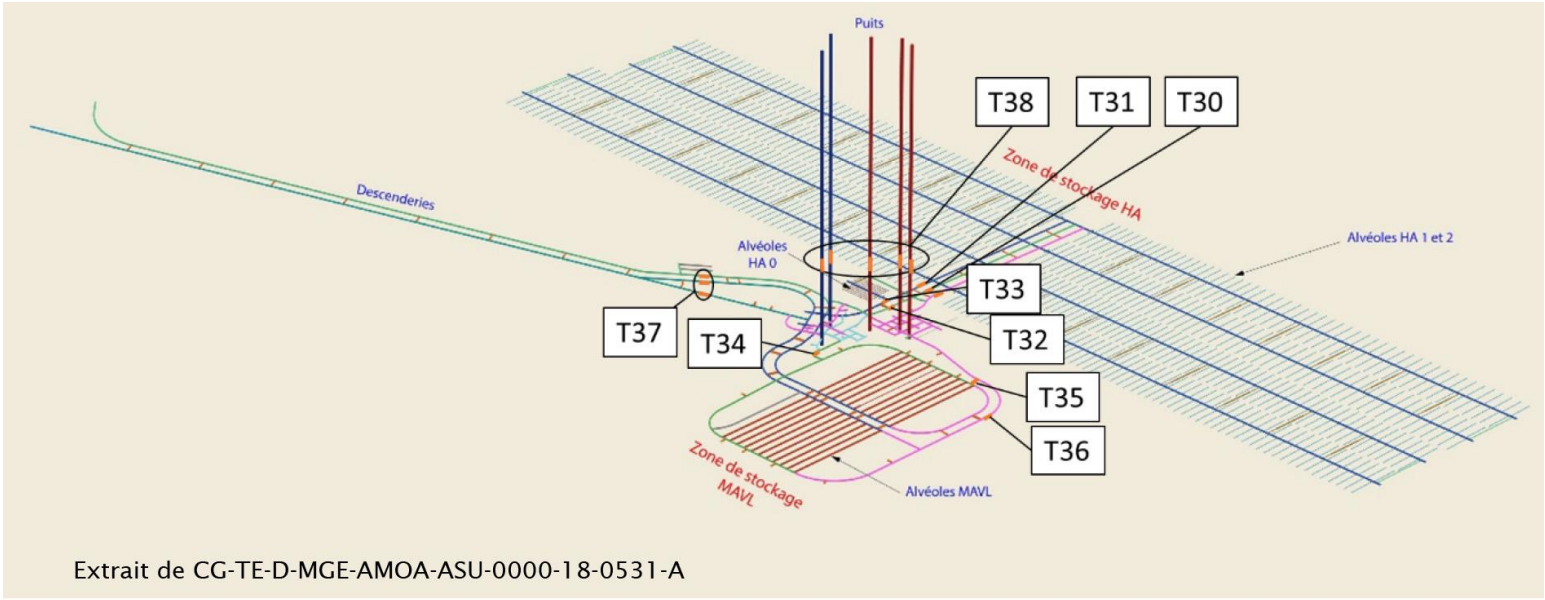
Figure 3-5 *Distribution et évolution temporelle des températures autour de l'alvéole de stockage de colis PIVIC en fonction de la présence ou non d'autres colis exothermiques dans les alvéoles voisins*

3.1.6 Dans le reste du stockage

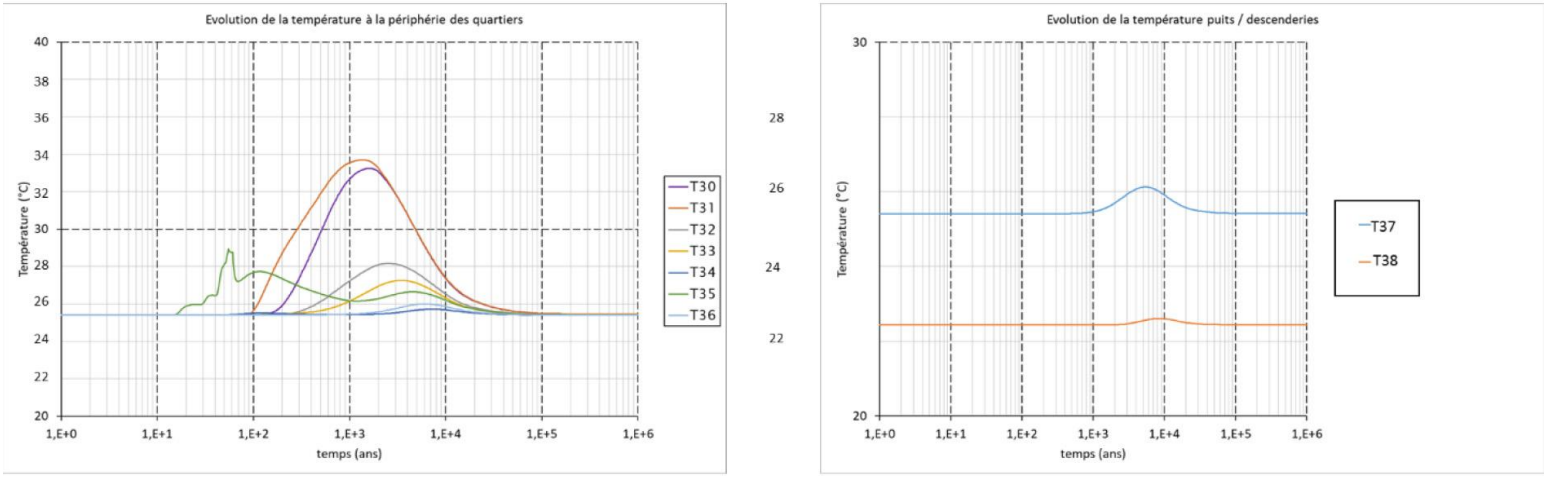
Au-delà de quelques centaines de mètres des alvéoles contenant des colis exothermiques, les élévations de température maximales sont de l'ordre de quelques °C. Au-delà de 500 mètres de distance, elles ne dépassent pas 1 °C. En particulier, les ouvrages de fermeture (remblais, scellements) situés en dehors des quartiers de stockage ne sont quasiment pas affectés par la charge thermique des déchets et évoluent par conséquent en conditions isothermes à quelques degrés près pour ce qui concerne les scellements les plus proches des quartiers de stockage HA.

Dans le cas particulier des galeries d'accès aux alvéoles HA (et dans une moindre mesure, les galeries de liaison de la zone HA), la charge thermique produite par les déchets affecte de manière limitée, par effet de bord, la température des remblais : élévation de 10 °C au maximum avec un paroxysme atteint après un millier d'années et transitoire de retour à l'équilibre géothermal en quelques milliers d'années.

Cette perturbation thermique, nulle à limitée, ne modifie pas les propriétés minéralogiques des matériaux argileux (remblai, Callovo-Oxfordien) comme le souligne la fiche bilan « L'effet du transitoire thermique sur les propriétés physico-chimiques du Callovo-Oxfordien (transformations minéralogiques et équilibre solides-fluide poral) » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).



Extrait de CG-TE-D-MGE-AMOA-ASU-0000-18-0531-A



CG-TE-D-MGE-AMOA-FER-0000-19-0017-A

Figure 3-6 *Évolution de la température dans les scellements en fonction de leur position au sein de l'architecture de l'installation souterraine*

La limitation par conception des températures maximales des colis de déchets (et donc corrélativement des effets induits) par conception/dimensionnement permet de maintenir le stockage et son environnement géologique dans un domaine de température préservant les qualités naturelles de la couche du Callovo-Oxfordien et aussi de garantir la maîtrise des phénomènes physiques et chimiques.

Elle se traduit concrètement par des espacements entre colis au sein d'une alvéole et entre alvéoles au sein d'un quartier de stockage qui permet de préserver les propriétés favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et de limiter la densité de chargement de manière à garantir le non-dépassement de critères (température, contrainte effective dans le Callovo-Oxfordien) tout en optimisant l'espace occupé par l'installation souterraine.

Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers de déchets exothermiques se traduit par une phase élévation de température dans les composants ouvragés et la formation du Callovo-Oxfordien (au droit des quartiers) puis une dissipation de cette chaleur essentiellement par diffusion et décroissance.

Par conception, les interactions thermiques entre les quartiers de stockage HA et MA-VL sont très faibles, de sorte qu'ils peuvent être considérés comme indépendants d'un point de vue thermique.

Les niveaux de température atteints dans la formation sont donc limités par les critères de dimensionnement thermique. De ce fait, les températures dans la formation du Callovo-Oxfordien atteignent au plus 100 °C en champ proche des alvéoles HA à court terme (quelques dizaines d'années après la mise en place des colis), et de l'ordre de 40 °C à 50 °C en champ lointain (quelques dizaines de mètres de part et d'autre de l'installation souterraine), et à plus long terme (quelques centaines d'années en général).

Le retour à la température géothermale (à quelques degrés près) s'effectue en 10 000 ans environ.

3.2 Le transitoire hydraulique/gaz dans l'installation souterraine

3.2.1 Le transitoire hydrique et gazeux au sein des ouvrages pendant la phase de fonctionnement

3.2.1.1 La décharge hydraulique initiale

Lors du creusement des ouvrages, les parois de l'excavation sont mises à la pression atmosphérique, pression nettement inférieure à la pression initiale de l'eau dans les roches (de l'ordre de quelques dizaines de mètres de colonne d'eau dans les marnes du Kimméridgien et d'environ 500 mètres de colonne d'eau pour les argilites du Callovo-Oxfordien). Le gradient de pression hydraulique est par conséquent un des moteurs des écoulements convergents radialement de la roche vers les excavations (cf. Figure 3-7). Dans les roches, cette perte d'eau engendre une baisse de pression qui se propage des parois des excavations vers l'extérieur dans les formations géologiques.

L'intensité des échanges de masse d'eau en paroi dépend (i) de la transmissivité hydraulique des couches traversées (perméabilité, épaisseur), (ii) de la charge hydraulique initiale (en lien avec la profondeur de la couche traversée) et (iii) dans les formations peu perméables, de l'intensité de la ventilation par un air non saturé en vapeur d'eau qui pilote l'intensité des échanges hydriques en champ proche (la non saturation en vapeur d'eau de l'air entraine une désaturation des composants en contact générant une pression capillaire qui s'ajoute à la baisse de pression liée au creusement et agit alors comme second moteur des écoulements) (cf. Figure 3-8).

Ce schéma général est valable quel que soit le type d'excavation (ouvrages de liaison surface-fond, galeries, alvéoles) et la couche géologique traversée, avec cependant des spécificités pour les ouvrages de liaison surface-fond en lien avec la perméabilité de la couche traversée et son gradient de charge qui conduisent à des évolutions hydrauliques spécifiques (cf. Le comportement hydrique et hydraulique du stockage et le devenir des gaz pendant la période d'exploitation réversible (zones de stockage HA et MA-VL) » (11)).

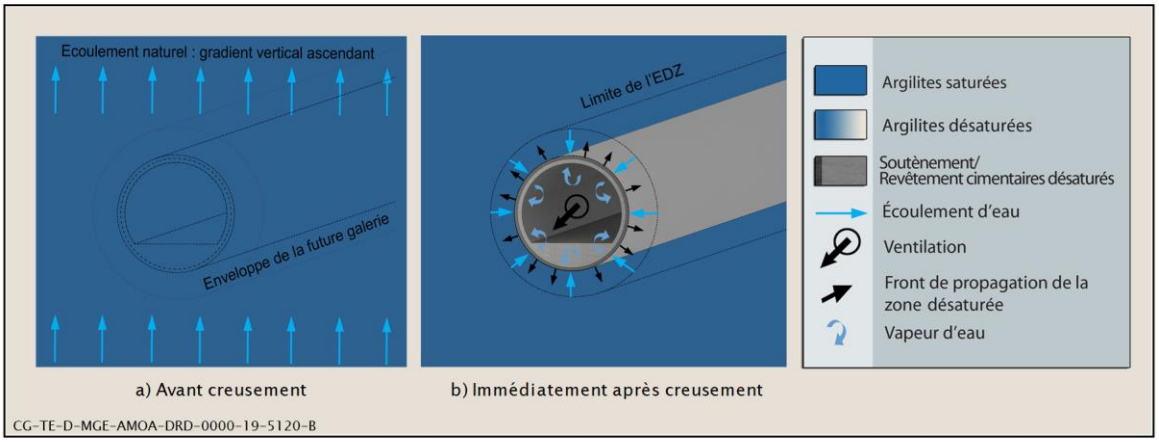


Figure 3-7 *Illustration des écoulements d'eau dans le Callovo-Oxfordien avant et après la création des ouvrages*

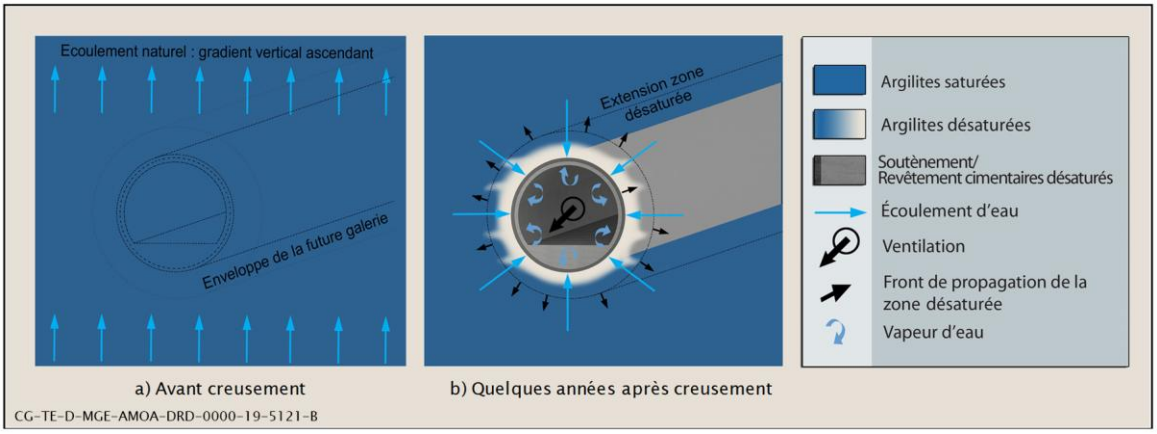


Figure 3-8 *Illustration schématique de la désaturation autour des ouvrages ventilés*

3.2.1.1.1 Au niveau de la formation des Calcaires du Barrois

La formation du Barrois est une couche géologique de surface constituée de calcaires fracturés et localement de conduits karstiques. Pour pallier les venues d'eau éventuelles, les parois des ouvrages de liaison surface-fond sont étanchées sur toute cette épaisseur empêchant ainsi toute perturbation hydraulique de se propager dans le milieu, en dehors du court transitoire hydraulique (diminution de quelques mètres de la charge sur une extension de l'ordre de quelques dizaines de mètres) lié au creusement de ces ouvrages avant un rapide retour à l'équilibre. Cette disposition de conception permet de s'affranchir des interactions directes entre les ouvrages souterrains et les eaux de surface lors de la phase de fonctionnement.

3.2.1.1.2 Au niveau du Kimméridgien marneux

Dans les marnes du Kimméridgien, la décharge hydraulique peut se développer librement. Néanmoins, au regard de la faible perméabilité du Kimméridgien (de l'ordre de quelques 10^{-12} m/s en moyenne), les débits d'eau drainés en paroi sont faibles comme le soulignent les observations des puits au Laboratoire de recherche souterrain où les seules venues d'eau observées proviennent essentiellement du marinage et de la zone endommagée autour du puits. Aucune venue d'eau liquide significative n'a été observée dans les puits du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne au droit de la formation du Kimméridgien.

Au-delà de quelques rayons à partir de la paroi des ouvrages de liaison surface-fond, l'impact hydraulique de l'ouvrage est quasi nul.

3.2.1.1.3 Au niveau de l'Oxfordien carbonaté

L'Oxfordien carbonaté est globalement considéré comme un aquifère en charge très peu productif. La production d'eau de cette couche hydrogéologique (quelques dizaines à quelques centaines de litres par heure) est fournie à 90 % par les horizons poreux (Hp) dont la perméabilité est de l'ordre de 10^{-8} m/s. La perturbation hydraulique se propage rapidement et sur des distances assez importantes (plurikilométrique en fin d'exploitation) (cf. La note conceptuelle « Le modèle hydrogéologique à l'Actuel et son évolution sur le prochain million d'années » (9)).

À proximité des ouvrages de liaison surface-fond, et lors du creusement, les décharges sont plus importantes dans les Hp les plus proches de la surface car ils sont chronologiquement sollicités en premiers. Après quelques années, ce sont les Hp les plus profonds qui sont les plus perturbés hydrauliquement car la décharge en parois de puits y est plus importante que dans les Hp les plus proches de la surface, la charge hydraulique initiale naturelle augmentant avec la profondeur.

À plusieurs centaines de mètres des puits et après plusieurs dizaines d'années, les charges s'homogénéisent sur toute la puissance de l'Oxfordien carbonaté (cette homogénéisation est principalement liée aux faibles contrastes de perméabilité, de l'ordre de dix à cent, sur la puissance de la couche).

Les estimations de la distance d'influence (cf. Tableau 3-1) sont en bonne cohérence avec le dispositif de suivi des encaissants autour des puits du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne qui a mesuré un cône de rabattement ayant une extension de l'ordre 2,7 km après 4,5 ans et 5 km environ après 10 ans d'existence.

Tableau 3-1 *Estimation du rayon d'influence hydraulique au voisinage des ouvrages de liaison surface-fond au droit de la formation de l'Oxfordien (évaluation analytique)*

Temps	4,5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	150 ans
Extension de la zone d'influence	3 km	4,6 km	6,5 km	10 km	15 km	18 km

À l'issue de la période d'exploitation (environ 100 ans), le front de la perturbation hydraulique s'est propagé à plusieurs kilomètres des ouvrages de liaison surface-fond. La dépression est de plusieurs centaines de mètres de colonne d'eau dans une zone d'extension pluridécamétriques.

3.2.1.1.4 Au niveau du Callovo-Oxfordien

Les zones de stockage HA et MA-VL étant éloignées les unes des autres de plusieurs centaines de mètres, les perturbations hydrauliques engendrées dans l'une d'entre elles ne se propagent pas, ou très peu, jusqu'à l'autre. Chaque zone de stockage peut donc être considérée comme indépendante hydrauliquement durant toute la phase de fonctionnement.

Cependant, à la fin de la phase de fonctionnement, il y a une légère interaction hydraulique entre les alvéoles MA-VL d'une part et entre les sous-quartiers HA (incluant le quartier pilote HA) éloignés les uns des autres de 50 mètres environ d'autre part, car, sur une durée séculaire, la perturbation hydraulique se propage sur des distances pluridécamétriques.

3.2.1.2 Les conditions d'environnement sèches et tempérées dans les ouvrages ventilés

La plupart des ouvrages du stockage sont ventilés durant la période de fonctionnement. En fonctionnement normal, le principe de ventilation retenu consiste à un aérage longitudinal en pleine section des ouvrages du stockage. La circulation de l'air dans les ouvrages est obtenue par l'utilisation d'un système mécanique générant un gradient de pression (moteur) suffisant pour s'opposer aux pertes de charges (frein) de toutes natures mises en jeu dans le stockage : pertes de charges régulières (linéaire de galerie), pertes de charges singulières (coudes, rétrécissements de section, obstacles…).

La ventilation repose sur le principe d'un balayage longitudinal de l'air de ventilation mettant en jeu des circuits de ventilation pour chaque quartier organisé en deux grandes familles de circuits d'aérage :

- pour les galeries de la zone MA-VL, les alvéoles MA-VL, les galeries d'accès au sein des quartiers de stockage HA et les descenderies, un circuit d'aérage en pleine section avec une galerie de retour d'air dédiée ;
- pour les galeries de liaison de la zone HA, un circuit d'aérage à contre-courant constitué d'une arrivée d'air en pleine section et d'un retour d'air en gaine (ou plénum).

Compte tenu des faibles quantités d'eau drainées par le Callovo-Oxfordien au regard des débits de ventilations et de l'inertie thermique du Callovo-Oxfordien, les conditions hygrométriques dans les ouvrages ventilés sont caractérisées par des humidités relatives globalement basses (de l'ordre de 40 % – 60 %). Malgré la surface d'échange développée avec le Callovo-Oxfordien (surface, longueur), compte tenu des faibles quantités d'eau drainées par les ouvrages souterrains du fait de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, la ventilation suffit à empêcher une élévation de l'humidité de l'air.

Les ouvrages de l'installation souterraine de stockage dans leur ensemble sont soumis à des conditions d'environnement globalement sèches. Les variations d'hygrométrie sont directement corrélées aux variations de température, de sorte que dans les ouvrages affectés par la charge thermique des déchets (galeries d'accès par effet de bord de la charge thermique des alvéoles HA et les alvéoles MA-VL contenant des colis faiblement exothermiques), l'hygrométrie peut atteindre des niveaux encore très bas éloignant encore plus ces ouvrages des conditions d'une condensation d'eau.

Cet environnement hydrique dans les galeries conduit à un état non saturé des composants ouvragés (génie civil, revêtement/soutènement) et du Callovo-Oxfordien en champ proche (se limitant pour l'essentiel aux fractures pariétales de la zone endommagée, plus exactement celle de la zone fracturée connectée).

LE CAS PARTICULIER DES ALVEOLES HA

La décharge hydraulique entraîne un flux d'eau qui, de manière générale converge vers toutes les excavations non étanchées, et donc également vers les alvéoles HA. Les alvéoles HA n'étant pas ventilées, de l'eau du Callovo-Oxfordien est drainée vers l'alvéole.

Des dispositions de conception sont mises en place dans les alvéoles afin de maintenir un taux d'oxygène inférieur à 1 % dans les vides internes à l'alvéole. Pour le quartier pilote HA, ces dispositions sont de deux types : i) une limitation des échanges d'air *via* les chemins possibles en tête d'alvéole et (ii) un système de balayage par un gaz inerte.

L'eau pénétrant à l'intérieur de l'alvéole par les jonctions de chemisage non étanches est collectée par drainage gravitaire puis évacuée. Le débit de l'eau entrant est susceptible de varier d'un alvéole à l'autre (en fonction de la charge thermique des alvéoles notamment), mais il est faible de l'ordre de quelques $m^3.an^{-1}$ par alvéole au maximum puis décroit ensuite du fait de la décharge hydraulique qui fait diminuer les gradients de pression en paroi et des perturbations thermo-hydrauliques qui diminuent avec la décroissance thermique.

En présence d'eau et en conditions anoxiques[45], la corrosion des composants métalliques produit de l'hydrogène. Au regard des conditions d'environnement (environnement humide et anoxique) et de fonctionnement (drainage de l'eau des alvéoles impliquant l'absence d'accumulation d'eau liquide), la corrosion est lente, de l'ordre de quelques $\mu m.an^{-1}$ au maximum, voire inférieure à l'interface avec le matériau de remplissage à l'extrados de chemisage) et la production d'hydrogène est faible également. L'hydrogène produit migre par dissolution/diffusion dans le matériau de remplissage cimentaire puis dans le Callovo-Oxfordien, l'alvéole de stockage offrant une surface d'échange importante avec la roche (une partie de l'hydrogène pourrait éventuellement être consommée par l'activité microbienne qui serait présente dans l'alvéole).

3.2.2 Après fermeture, un transitoire de resaturation couplé à la production de gaz

L'évolution phénoménologique du stockage en après fermeture est marquée par un transitoire hydraulique-gaz avant que le stockage ne soit totalement saturé par l'eau du Callovo-Oxfordien. Ce transitoire est lié à la production d'hydrogène, principalement par la corrosion des divers composants métalliques contenus dans le stockage et dans une moindre mesure par la radiolyse des composants organiques contenus dans le stockage et de l'eau. Ce transitoire est lent du fait des lentes cinétiques de corrosion et de la faible migration de l'hydrogène dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien.

Les principaux traits du transitoire hydraulique-gaz sont les suivants (cf. La note conceptuelle « Le transitoire hydraulique-gaz et le devenir des radionucléides gazeux (après-fermeture) » (12)) :

- au cours des premières centaines d'années après fermeture :
  - ✓ dans les liaisons surface-fond, l'apport d'eau par l'oxfordien-carbonaté relativement perméable sur la partie haute des scellements implique une resaturation en quelques dizaines d'années de la partie sommitale (sur quelques mètres *a minima*) de leur noyau entrainant son gonflement. Ce phénomène limite très fortement les flux d'eau en provenance de l'Oxfordien à travers ces scellements ; la resaturation des installations fonds est donc principalement gouvernée par le très faible apport d'eau (lié à la très faible perméabilité des argilites) radial en provenance de la roche hôte ;
  - ✓ dans les installations fond, une première phase influencée, d'une part, par la ventilation (désaturation) et s'étendant à l'ensemble du stockage et, d'autre part, par un couplage fort entre la thermique et l'hydraulique dans la zone de stockage HA conduisant à des pressions d'eau pouvant atteindre 10 MPa à 12 MPa dans les argilites saturées en eau au demi-entraxe des alvéoles HA ;

[45] Après consommation ou évacuation de l'oxygène occlus

- ✓ concomitamment, la combinatoire entre la faible solubilité de l'hydrogène dans l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien, la faible diffusion de l'hydrogène dissous dans le Callovo-Oxfordien et la production d'hydrogène conduisent à l'apparition d'une phase gaz hydrogène dans le stockage à partir environ de quelques centaines d'années après fermeture.

- de quelques centaines d'années après fermeture à une centaine de milliers d'années après fermeture (cf. La note conceptuelle « Le transitoire hydraulique-gaz et le devenir des radionucléides gazeux (après-fermeture) » (12)) :
  - ✓ les caractéristiques du Callovo-Oxfordien (forte pression d'entrée de gaz et faible perméabilité), conduisent à ce que l'hydrogène exprimé sous forme gazeuse soit limité au stockage et migre vers les ouvrages d'accès (puits et descenderies) principalement via les galeries remblayées et les scellements (noyau à base d'argile gonflante, zone de Callovo-Oxfordien endommagée au droit des zones de dépose des revêtements/soutènements, interface entre le noyau et le Callovo-Oxfordien) :
    - la saturation en eau dans les différents matériaux/composants du stockage varie en fonction de leurs caractéristiques diphasiques, les remblais sont significativement désaturés (degré de saturation en eau pouvant atteindre de l'ordre de 30 % à 40 % quelques centaines à milliers d'années après fermeture), tandis que les noyaux des scellements, du fait de leur composition à base d'argile gonflante, ont une désaturation plus limitée (degré de saturation en eau de l'ordre environ 90 % au-delà de quelques centaines d'années après fermeture) ;
    - du fait de ses caractéristiques diphasiques, le Callovo-Oxfordien sain ne se désature pas : l'hydrogène produit dans le stockage s'y dissout et migre par diffusion depuis le stockage vers les encaissants Dogger et Oxfordien carbonaté. L'hydrogène dissous parvient progressivement dans le Dogger et l'Oxfordien carbonaté.
  - ✓ les ouvrages de fermeture (galeries remblayées et scellements) sont « passants au gaz » mais ils constituent néanmoins un frein relatif au passage du gaz ; de ce fait, la combinatoire avec la lente migration de l'hydrogène dissous dans le Callovo-Oxfordien, la pression d'hydrogène gazeux augmente dans tout le stockage jusqu'à atteindre une valeur maximale de l'ordre de 7 MPa à 7,5 MPa quelques dizaines de milliers d'années après fermeture avant de décroitre progressivement du fait notamment de la diminution de la production d'hydrogène (cf. Figure 3-11) ;
  - ✓ quelques dizaines de milliers d'années après fermeture, les flux d'hydrogène gazeux entre les zones de stockage et les accès, et donc jusqu'à l'Oxfordien carbonaté, sont maximaux, de l'ordre de quelques dizaines à une centaine de milliers de moles par an, mais ne déplacent pas significativement de l'eau, les flux d'eau étant de l'ordre de quelque 0,1 $m^3.an^{-1}$ au maximum.

- au-delà de la centaine de milliers d'années :
  - ✓ les termes sources en hydrogène diminuent fortement (du fait de la corrosion totale de nombreux éléments métalliques) et la resaturation totale du stockage s'amorce pour être atteinte quelques centaines de milliers d'années après fermeture avec la resaturation totale de la zone de stockage de déchets MA VL. La zone de stockage HA est resaturée plus rapidement, de même que la zone de soutien logistique. Du fait de leurs caractéristiques diphasiques respectives, les scellements sont resaturés en premiers et les remblais en dernier, le temps de resaturation des alvéoles de stockage étant compris entre ces deux extrêmes (cf. Figure 3-9) ;
  - ✓ les flux d'hydrogène dissous transitant par les argilites saturées jusqu'aux encaissants supérieur et inférieur augmentent jusqu'à un maximum d'une dizaine de milliers de moles par an vers quelques centaines de milliers d'années puis diminuent pour s'annuler au-delà du million d'années sans perturber les écoulements dans ces encaissants (pas de désaturation, pas de modification de charge hydraulique).

À un million d'années, environ 30 % de la totalité de l'hydrogène produit dans le stockage a migré sous forme gazeuse vers l'Oxfordien carbonaté par les ouvrages de stockage dont les ouvrages d'accès scellés. La majeure partie des 70 % restant a migré par diffusion en phase dissoute dans le Callovo-Oxfordien vers les encaissants supérieur et inférieur (Dogger et Oxfordien carbonaté) en quantités globalement égales et est sortie du Callovo-Oxfordien ; seuls quelques pourcents de l'hydrogène produit sur le million d'années sont encore présents dans le Callovo-Oxfordien. L'hydrogène qui a atteint l'Oxfordien carbonaté et le Dogger a migré par diffusion et par convection dans les niveaux où circule de l'eau de ces formations pour se diluer spatialement dans le temps. Les quantités d'hydrogène dissous hors du Callovo-Oxfordien dans les formations géologiques sus-jacentes et sous-jacentes sont ainsi très faibles (cf. La note conceptuelle « Le transitoire hydraulique-gaz et le devenir des radionucléides gazeux (après-fermeture) » (12)).

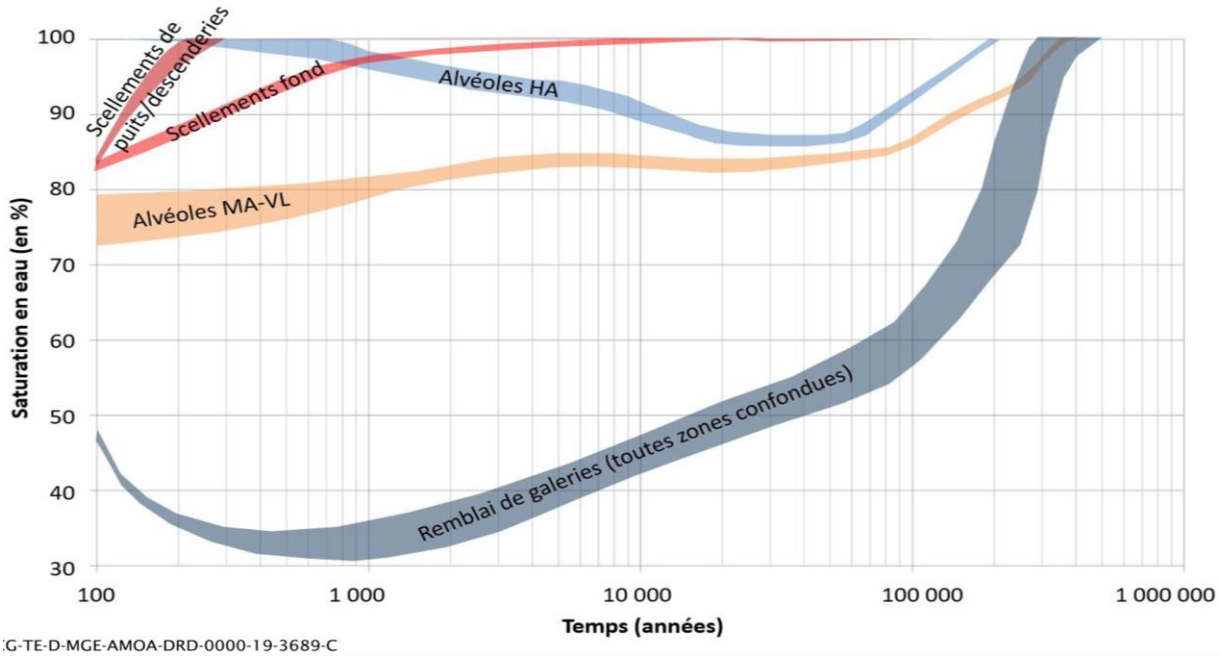


Figure 3-9 *Représentation schématique de l'évolution temporelle de la resaturation des principaux composants de l'installation souterraine en après fermeture*

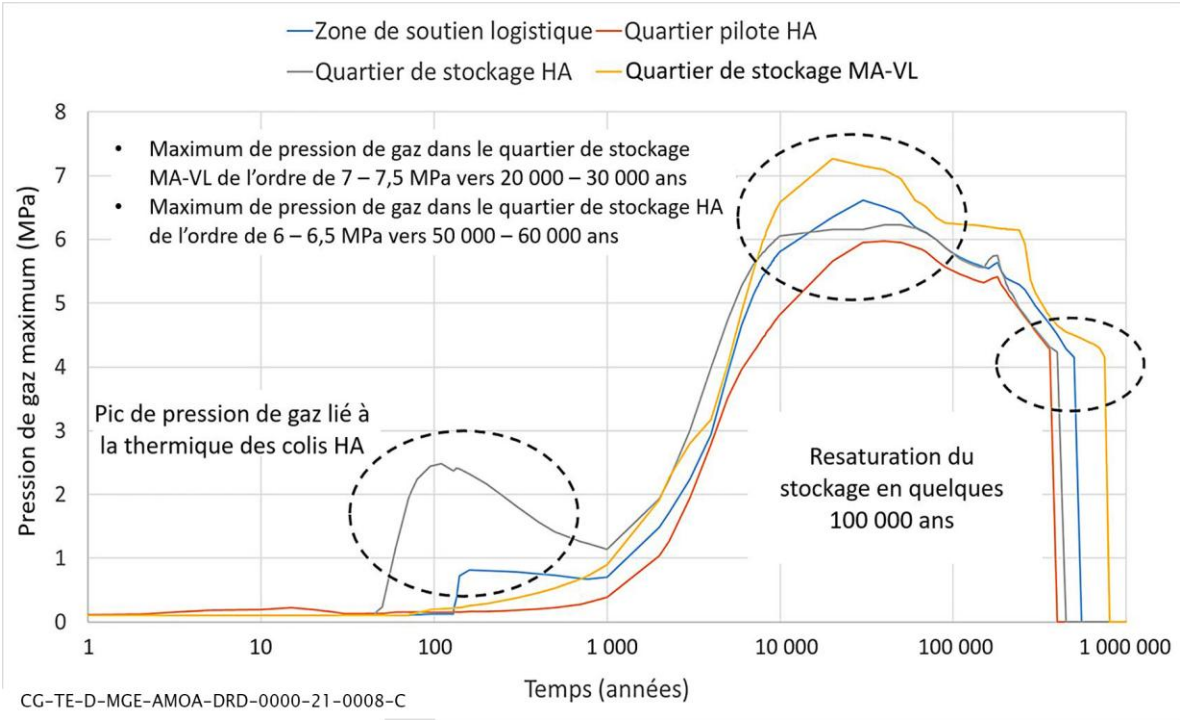


Figure 3-10 *Représentation schématique de l'évolution temporelle des pressions maximales de gaz dans les différentes zones de l'installation souterraine en après fermeture*

Sur la totalité de l'hydrogène produit dans le stockage, environ 30 % atteint l'encaissant supérieur sous forme gazeuse *via* les accès, le reste (70 %) migrant sous forme dissoute au sein du Callovo-Oxfordien à parts sensiblement égales vers les encaissants supérieur et inférieur (cf. Figure 3-11).

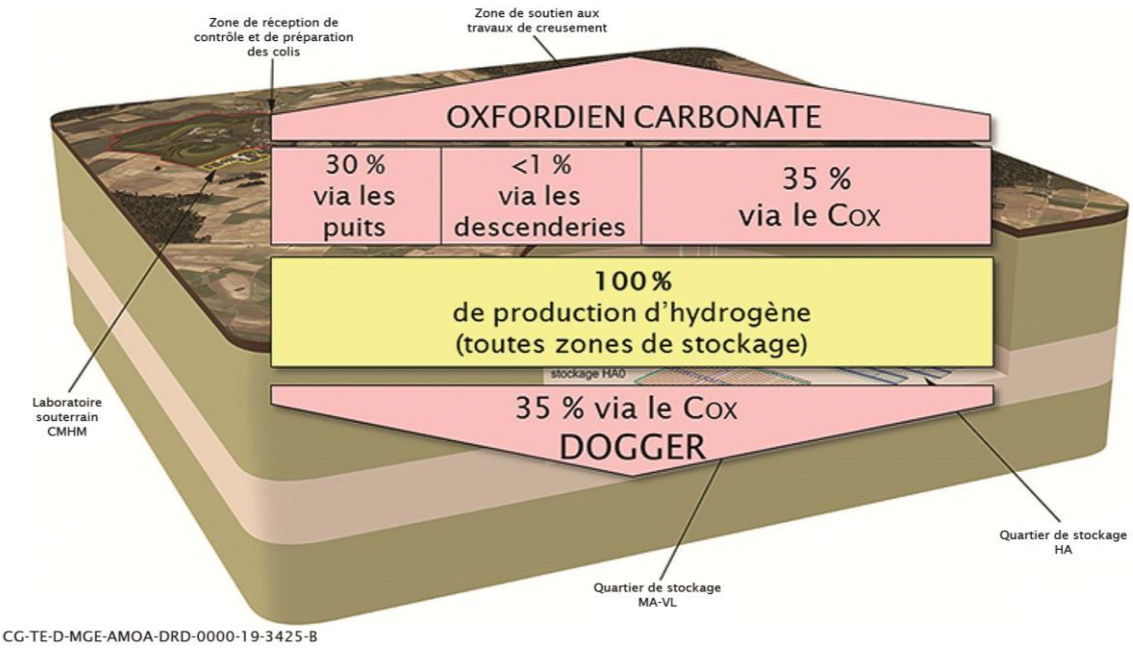


Figure 3-11 *Bilan de la répartition de la quantité totale d'hydrogène produit entre les encaissants supérieur et inférieur du Callovo-Oxfordien après un million d'années*

3.2.3 Le retour vers un nouvel équilibre : l'état saturé

La fin du transitoire hydraulique-gaz se définit par la disparition de l'hydrogène exprimé sous forme gazeuse (par épuisement des termes sources et dissolution/diffusion des quantités relâchées), la saturation totale de l'ensemble des ouvrages du stockage (après quelques centaines de milliers d'années) et le retour à un (nouvel) état d'équilibre hydraulique (après une dizaine de milliers d'années supplémentaire).

À l'échelle du stockage, un champ de charge hydraulique s'organise en lien avec les caractéristiques hydrauliques des composants qui constituent les ouvrages (béton, remblais…), leurs positions relatives au sein du stockage et leur position au sein de la ZIOS (cf. Figure 3-12).

Les niveaux de perméabilité plus élevés au sein des ouvrages que ceux dans le Callovo-Oxfordien autorisent le drainage partiel des eaux du Callovo-Oxfordien transitant par les ouvrages du stockage. Ce drainage est néanmoins très limité par le caractère borgne du stockage (absence de circulation) et la présence des scellements.

Plus en détail (cf. La note conceptuelle « Le transitoire hydraulique-gaz et le devenir des radionucléides gazeux (après-fermeture) » (12)) :

- les conditions hydrogéologiques du Callovo-Oxfordien (faibles perméabilités et gradients de charge) et la disposition relative des zones de stockage placent le quartier de stockage MA-VL en « amont hydraulique » des ouvrages de liaison surface-fond par rapport aux écoulements dans l'Oxfordien carbonaté. La principale contribution hydraulique du stockage aux flux d'eau sortant des ouvrages de liaison surface-fond est donc celle du quartier de stockages MA-VL :
  - ✓ les charges hydrauliques dans le stockage sont peu modifiées par rapport à celles existant à l'état naturel ;
  - ✓ le rayon d'influence hydraulique de la perturbation générée par les puits et descenderies est de l'ordre de quelques dizaines de mètres au plus dans le Callovo-Oxfordien (les trajectoires hydrauliques verticales sont déviées par le stockage puis repartent dans le Callovo-Oxfordien) ;
  - ✓ les flux d'eau drainés par le stockage sortant par les liaisons surface-fond sont très faibles, au plus de l'ordre de quelques dizaines de litres par an, répartis de manière homogène dans les différents ouvrages de liaison surface-fond.
- les vitesses d'écoulement dans les galeries remblayées sont limitées au plus à quelques $1/10^{e}$ de $mm.an^{-1}$ en tout point de l'installation souterraine du stockage. Ainsi, le transport de solutés en milieu poreux, par convection est négligeable, en tout point devant le transport par diffusion :
  - ✓ cette vitesse est pilotée d'une part par le système de scellements qui limite les flux d'eau dans les galeries et d'autre part par le revêtement/soutènement dégradé ;
  - ✓ le temps de transfert de l'eau depuis les alvéoles MA-VL situées en bordure de quartier jusqu'aux liaisons surface-fond est supérieur au million d'années ;
  - ✓ la présence de scellements permet de limiter les effets de drain hydraulique, avec des pertes de charge des liaisons surface-fond de l'ordre de 3 cm par m de scellement.

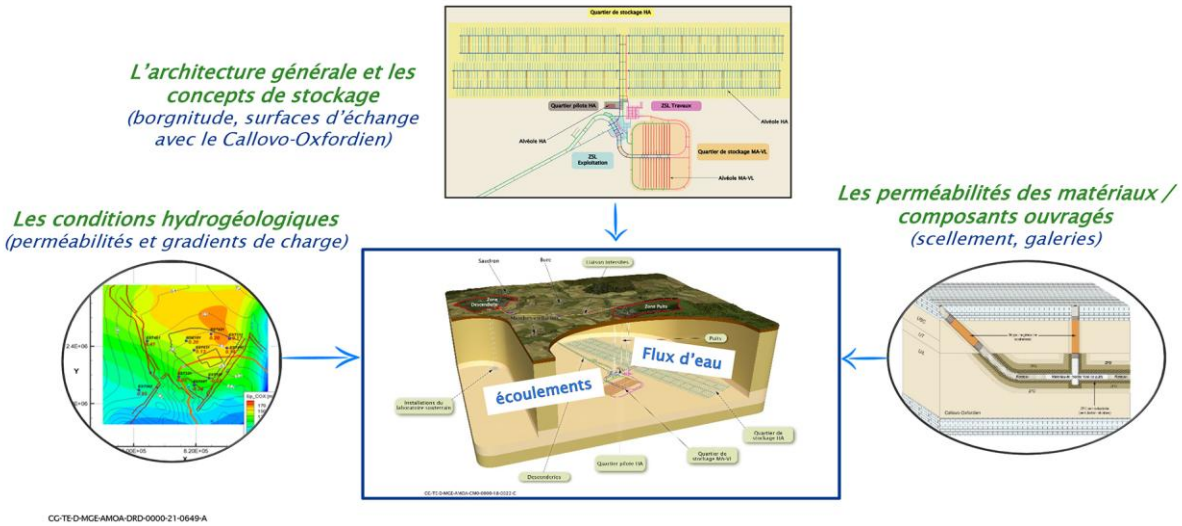


Figure 3-12 *Les principaux facteurs pilotant les écoulements et le transfert convectif des solutés dans le système de stockage après saturation et retour à un nouvel équilibre hydraulique*

Cette efficacité hydraulique est caractérisée par des pertes de charge au passage de chaque scellement, de l'ordre de quelques cm/m pour les scellements. La figure 3-13 permet de comparer le profil de charge hydraulique depuis les scellements de liaison surface-fond jusqu'aux scellements du quartier de stockage MA-VL. Elle indique des profils quasi-constants entre les scellements, du fait de plus fortes perméabilités des composants (revêtement + soutènement), et des « ruptures » au niveau de passage de chaque scellement. En l'absence de scellement, la figure 3-13 montre que la charge issue de l'Oxfordien se propagerait au sein du stockage, ce qui créerait une forte perturbation hydraulique qui conduirait à augmenter les débits d'eau sortant des ouvrages de liaison surface-fond d'un facteur 100.

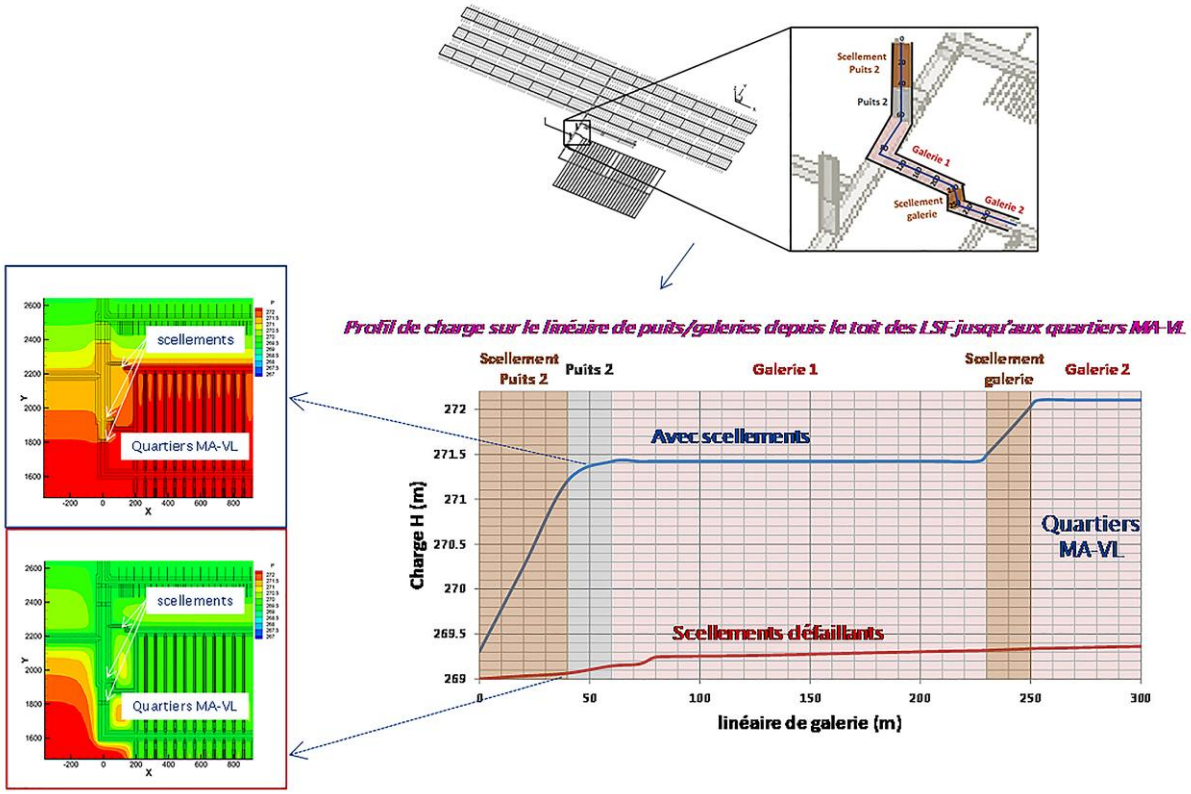


Figure 3-13 *Le rôle hydraulique des scellements en après fermeture - comparaison de profils et des cartographies de charge hydraulique entre une configuration avec et sans scellements*

3.3 L'évolution chimique des ouvrages et du milieu géologique environnant

Avant la construction initiale du centre de stockage, le milieu géologique et, plus particulièrement, la couche du Callovo-Oxfordien sont dans un état d'équilibre chimique.

La construction initiale du stockage se traduit par la mise en place au sein de la couche du Callovo-Oxfordien de matériaux différents, qui constituent les divers composants du stockage ; ils sont mis en place en interface avec les argilites et/ou entre eux. Il s'agit pour l'essentiel (cf. Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :

- de matériaux cimentaires constituant les infrastructures de génie civil (revêtement, radier…), les colis de stockage des déchets MA-VL et les massifs d'appui des scellements ;
- de matériaux métalliques, par exemple les conteneurs des déchets HA et le chemisage de l'alvéole HA, les déchets MA-VL (coques et embouts, déchets technologiques métalliques…) et l'ensemble des ferrailles issues du génie civil (armatures) ;
- d'argiles remaniées, par exemple l'argile gonflante pour les scellements et les bouchons des alvéoles de stockage ou les argilites excavées pour les remblais des galeries ;
- de matériaux constituant les déchets : la matrice vitreuse pour les déchets HA essentiellement, mais qui sont, pour les déchets MA-VL beaucoup plus variés (déchets bitumés, PVC, cellulose…).

L'évolution chimique résulte principalement de la mise en interface de ces matériaux et de leurs constituants (fluides et solides) et dépend des conditions d'environnement, notamment de la présence d'eau (nécessaire au développement des réactions chimiques), d'air apporté par la ventilation (oxygène, CO_2) et de température comme catalyseur des réactions.

Comme pour les processus thermiques et hydrauliques, l'architecture compartimentée du stockage en zones distinctes par grands types de déchets (HA et MA-VL) et en quartiers au sein d'une même zone concourt à des évolutions chimiques (i) indépendantes pour chaque quartier et (ii) similaires pour les alvéoles de stockage d'un même quartier.

Pendant le fonctionnement de l'INB, la ventilation constitue le moteur principal des processus chimiques et permet de distinguer les alvéoles de déchets MA-VL, les galeries et les ouvrages de liaison surface-fond (ventilés au cours de la phase de fonctionnement) des alvéoles de déchets HA qui sont rapidement isolés de l'air de ventilation.

En phase après fermeture à long terme et en l'absence d'oxygène dans le système chimique, ce sont la nature des matériaux introduits dans le stockage et les évolutions thermiques et hydrauliques décrites dans les chapitres 3.1 et 3.2 du volume7 de la présente version préliminaire du rapport de sûreté qui permettent de distinguer deux grandes périodes temporelles :

- dans la phase de saturation partielle (premières dizaines de milliers d'années à quelques centaines de milliers d'années de l'évolution du stockage), la disponibilité réduite de l'eau au contact des composants du stockage limite leur dégradation chimique ;
- la période insaturée liée à la production de gaz dans le stockage. Les propriétés hydrauliques des argilites du Callovo-Oxfordien (très faible perméabilité, faible diffusivité) limitent fortement les flux d'eau dans et autour du stockage, avant et après l'atteinte de la saturation complète du stockage.

Les processus chimiques se résument à des processus d'interface concernant le stockage et le Callovo-Oxfordien en champ proche (les formations encaissantes sont suffisamment éloignées du stockage pour ne pas en être significativement affectées).

L'évolution chimique est ainsi dominée par des processus très lents de dégradation des bétons, de corrosion des composants métalliques et d'altération des déchets qui conduisent à un relâchement lent et progressif des radionucléides.

3.3.1 L'évolution géochimique du Callovo-Oxfordien

Compte tenu de sa profondeur, la couche du Callovo-Oxfordien n'est pas affectée par les phénomènes géochimiques de surface (érosion, dissolution, polluants…). Les propriétés hydrauliques et chimiques du Callovo-Oxfordien, en particulier sa forte capacité de « tampon chimique », limitent les perturbations dues au stockage et à son environnement proche.

Les perturbations chimiques se développent ainsi aux interfaces entre les matériaux du stockage (utilisés dans les alvéoles, les galeries…) et la roche du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1) :

- la perturbation alcaline des argilites au contact d'ouvrages en béton (galeries et alvéoles de déchets MA-VL en particulier) se caractérise par deux zones minéralogiques (cf. Fiche 3.13 « La perturbation alcaline dans le Callovo-Oxfordien autour et dans les ouvrages à base cimentaire » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :
  - ✓ l'une, reminéralisée par les eaux cimentaires, couvre la zone fracturée de la zone endommagée (extension métrique au plus). Cette zone correspond à une modification des caractéristiques texturales, minéralogiques et géochimique des argilites » (cf. Fiche 3.13 « La perturbation alcaline dans le Callovo-Oxfordien autour et dans les ouvrages à base cimentaire » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et technique » (1)) ;
  - ✓ l'autre, faiblement perturbée, est la zone affectée par un panache alcalin sans reminéralisation mais dont l'eau porale a subi une élévation de pH.
- la perturbation oxydante induit des transformations minéralogiques dues à l'oxydation de certains constituants de la roche (principalement la pyrite et la matière organique). L'apport d'oxygène par l'air de ventilation perturbe le contexte chimique des argilites dans les ouvrages ventilés. Elle concerne le voisinage immédiat des fractures créées par le creusement. Par conséquent, la perturbation oxydante ne concerne qu'une faible fraction des composants de la roche ;
- la perturbation organique résulte de la dégradation des matériaux organiques des déchets et des matrices sous l'effet de l'hydrolyse en milieu basique et/ou de la radiolyse, et conduit au relâchement d'espèces complexantes sur des distances de quelques mètres ;
- la perturbation thermique pour laquelle :
  - ✓ les transformations minéralogiques en température sont bien établies ;
  - ✓ les processus réactionnels sont identifiés ;
  - ✓ les cinétiques associées traduisant l'effet de la température sur la géochimie au sens large des milieux argileux jusqu'à 80 °C/90 °C montrent que ce transitoire n'est pas de nature à entrainer (i) des transformations minéralogiques significatives ou (ii) une évolution de l'équilibre eau porale-solides après retour aux conditions géothermales naturelles. Ceci résulte des températures maximales dont l'amplitude reste limitée (entre 40 °C et 60 °C à l'échelle du Callovo-Oxfordien en grand) et des temps caractéristiques qui sont petits (quelques centaines à milliers d'années) par rapport aux temps géologiques.

En résumé, les perturbations chimiques engendrées par le stockage sur le Callovo-Oxfordien se limitent pour l'essentiel à une épaisseur inférieure au mètre ou à quelques mètres, peu significative en comparaison de la garde d'épaisseur saine minimale de 50 mètres du Callovo-Oxfordien, entre le stockage et ses encaissants.

Le stockage crée des perturbations chimiques de diverses origines : perturbation alcaline liée à la dégradation des matériaux cimentaires, perturbation organique liée à l'hydrolyse et à la radiolyse des matériaux organiques, perturbation oxydante lors de la phase de creusement, perturbation fer/argile liée à la corrosion des composants métalliques de l'alvéole (notamment le chemisage et le conteneur de l'alvéole HA), perturbation thermique pour les alvéoles contenant des déchets exothermiques. Ces perturbations possèdent des traits communs : elles s'inscrivent sur des échelles de temps variant de quelques milliers d'années à plusieurs centaines de milliers d'années, mais leur extension reste limitée à au plus quelques mètres au voisinage des alvéoles et des galeries. L'extension est ainsi d'ordre métrique pour la perturbation alcaline et d'au plus quelques mètres pour la perturbation organique.

Bien que ces perturbations puissent localement conduire à altérer le transfert et la rétention de certains radionucléides, leurs effets restent négligeables sur le transfert des solutés dans la couche du Callovo-Oxfordien et dans les ouvrages de stockage, du fait de leur faible extension.

3.3.2 L'évolution chimique des ouvrages cimentaires (galeries, alvéoles MA-VL)

Les galeries sont principalement constituées de composants cimentaires (revêtement/soutènement, radier et dans une proportion moindre, de matériaux métalliques enrobés dans le béton (armatures) ou dans les argilites (boulons). Elles sont ventilées[46] pendant la phase de fonctionnement puis remblayées après fermeture.

La désaturation des bétons de revêtement/soutènement pendant la phase de fonctionnement séculaire[47] n'a qu'un impact limité sur leurs propriétés physiques, donc sur le comportement mécanique des ouvrages. L'humidité de l'air de ventilation (autour de 40 % - 60 %) permet le développement de la carbonatation atmosphérique des bétons (cf. La note conceptuelle « Le comportement mécanique des alvéoles de déchets MA-VL (après-fermeture) » (13)). Si l'impact physique de la carbonatation atmosphérique reste faible sur le béton, les conséquences chimiques sont une modification des conditions dans lesquelles le processus de corrosion des armatures va se développer. La chute du pH dans les zones carbonatées, lorsqu'elles atteignent les armatures métalliques, peut entrainer une dépassivation des aciers et conduire à une augmentation d'un à plusieurs ordres de grandeur des cinétiques de corrosion (de quelques $1/10^{e}$ µm.an^{-1} à quelques dizaines µm.an^{-1}). La conséquence d'un tel couplage (carbonatation atmosphérique/corrosion des aciers) est l'apparition de dégâts mécaniques (fissuration/fracturation des bétons armés) avec des cinétiques plus rapides que celles attendues en conditions de maintien des aciers à l'état passif (d'autant plus rapides que l'on modifie le béton et donc que l'on s'éloigne des conditions de passivation). L'épaisseur d'enrobage de béton autour des bétons permet de repousser au-delà de la phase de fonctionnement la fissuration des bétons sous l'effet de la corrosion des armatures.

Ainsi, pendant la phase de ventilation et jusqu'à la disparition complète de l'oxygène (au plus quelques dizaines d'années après fermeture), la corrosion des différents éléments métalliques des composants des alvéoles se développe en conditions oxydantes dans des matériaux cimentaires, désaturés et globalement peu carbonatés. Les cinétiques de corrosion restent faibles (<0,1 µm.an^{-1}) dans de telles conditions, ce qui limite la dégradation mécanique de ces composants sur la durée de cette phase.

Sur le long terme, la perturbation alcaline affectant le remblai et les argilites en champ proche se développe conjointement à la dégradation chimique du revêtement/soutènement. Quel que soit le type de matériau cimentaire, l'extension de la perturbation alcaline induite dans les argilites reste « limitée » dans la zone fracturée connectée (ZFC), soit une extension métrique au maximum (cf. Fiche 3.13 « La perturbation alcaline dans le Callovo-Oxfordien autour et dans les ouvrages à base cimentaire » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

[46] En continue ou de manière intermittente
[47] Durée comparable à celle dimensionnant d'autres ouvrages de génie civil plus classiques (ponts, barrages…)

Dans le cas particulier des alvéoles MA-VL, au schéma général décrit ci-avant se superpose la perturbation inhérente aux déchets et à leurs caractéristiques (nature, débit de dose) :

- dans le domaine de débit de dose attendu en stockage pour les déchets MA-VL (de quelques Gy/h à des dizaines de Gy/h), les résultats des essais réalisés ne montrent pas d'impact d'une irradiation gamma externe sur les cinétiques de corrosion dans les bétons sains ainsi que sur les caractéristiques mécaniques principales ;
- par ailleurs, pour certains alvéoles contenant des déchets spécifiques, des perturbations salines (familles de déchets MA-VL 1 et MA-VL 2) ou organiques (familles de déchets MA-VL 2 ou MA-VL 3, du présent volume) peuvent survenir :
  - ✓ pour la perturbation saline, l'effet de « dilution volumique » du panache salin avec la distance conduit à une extension maximale de la zone réactive de l'ordre de quelques mètres pour le seuil de 0,5 M < FI[48] < 1 M (cf. La note conceptuelle « L'évolution chimique des alvéoles MA-VL » (5) ;
  - ✓ pour la perturbation organique, la mobilité des solutés est affectée sur quelques dizaines de milliers d'années sur une distance d'au plus une dizaine de mètres pour l'ISA, d'ordre métrique pour le TBP, et quasi nulle pour les phtalates. Dans tous les cas, cette distance est très inférieure à la garde saine du Callovo-Oxfordien et à la garde entre deux alvéoles adjacents (les alvéoles contenant des déchets organiques n'ont pas d'influence significative sur les alvéoles situés à proximité). Finalement, la prise en compte des modifications de Kd sur les zones de complexation (espace/temps) limitées ne conduit pas à modifier le comportement global des radionucléides sorbés (en particulier ceux des actinides) à l'échelle du Callovo-Oxfordien « en grand ».

Le stockage crée des perturbations chimiques, qui s'inscrivent sur des échelles de temps variant de quelques milliers d'années à plusieurs centaines de milliers d'années, mais d'extensions limitées.

Dans les ouvrages cimentaires :

- **la carbonatation atmosphérique** des bétons reste très limitée en peau des composants du fait de leur état fortement désaturé en lien avec la ventilation. De même, l'oxydation des argilites est limitée à la zone fracturée connectée (fractures et peau des blocs délimités par ces fractures). À plus long terme, la dégradation chimique des ouvrages cimentaires, couplée à la perturbation alcaline reste limitée sur le million d'années : (i) l'état de dégradation du béton est au plus de type « altéré », (ii) les zones reminéralisée et altérée des argilites par la perturbation alcaline sont d'extension pluri-décimétrique à métrique en parois des alvéoles MA-VL, et au plus décimétrique pour les bas pH en le cas échéant ;
- **l'impact des produits de dégradation des déchets** MA-VL potentiellement agressifs (notamment les sels et les déchets organiques) dépend de la nature et des quantités initiales de ces déchets, de leurs cinétiques de dégradation, de la durée de leur relâchement, de la nature et la quantité de complexants organiques susceptibles de se former et de la réactivité des différentes espèces :
  - ✓ dans le cas des déchets salins, la probable activité bactérienne dans les ouvrages conduira à la consommation des sels nitrates et donc à limiter (i) le panache oxydant et (ii) le panache de force ionique élevée au sein des alvéoles ou dans les argilites en champ proche ;
  - ✓ dans le cas des déchets MA-VL organiques, les évaluations actuelles prenant en compte une réactivité phénoménologique vis-à-vis des matériaux cimentaires et argileux montrent la migration de teneurs en organiques sur une grande partie de la roche hôte après 100 000 ans. Cependant, les conséquences de ces perturbations sur le transfert des radionucléides restent limitées.

[48] FI désigne la force ionique de la solution

3.3.3 L'évolution chimique des alvéoles HA

Dans les alvéoles HA, les conteneurs de stockage et le chemisage HA sont exposés à un environnement qui évolue dans le temps, d'une atmosphère chaude et humide et appauvrie en oxygène, jusqu'à un milieu complètement anoxique saturé en eau à la température géothermale du Callovo-Oxfordien à moyen et long terme. Entre ces deux états, l'alvéole sera le siège de différents transitoires hydriques, thermiques et physico-chimiques.

Un ensemble de dispositions de conception permettent de limiter certains processus de corrosion (cf. La fiche 4.1 « La conception et la réalisation d'un alvéole HA » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :

- le choix des nuances d'acier permet de s'affranchir des phénomènes de corrosion sous contrainte et de fragilisation par l'hydrogène. Le fait de retenir un traitement de détensionnement de l'acier pour éliminer les contraintes résiduelles internes après soudage du couvercle du conteneur de stockage concourt également à se prémunir du risque de corrosion sous contrainte ;
- la limitation du débit de dose en peau de colis permet de s'affranchir des phénomènes de corrosion radiolytique ;
- le matériau de remplissage cimentaire en extrados de chemisage permet de limiter les effets du transitoire oxydant lié au creusement ;
- les dispositifs d'étanchéification en tête d'alvéole permettent de limiter les venues d'oxygène dans l'alvéole et les dispositifs d'inertage et de surveillance de l'atmosphère interne permettent de maintenir la teneur en dioxygène inférieure à 1 % (hors période d'ouverture de l'alvéole). L'environnement appauvri en oxygène voire anoxique permet ainsi de limiter les cinétiques de corrosion et notamment la corrosion localisée.

De facto, la corrosion des aciers non alliés du chemisage et du conteneur de stockage en acier non allié est essentiellement une corrosion de type généralisée dans l'environnement du stockage. Elle correspond à une perte de matière relativement homogène à la surface du métal, avec formation de produits de corrosion qui peuvent acquérir un pouvoir protecteur (jusqu'à la passivation) conduisant à des vitesses de corrosion très faibles et décroissantes (cf. « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

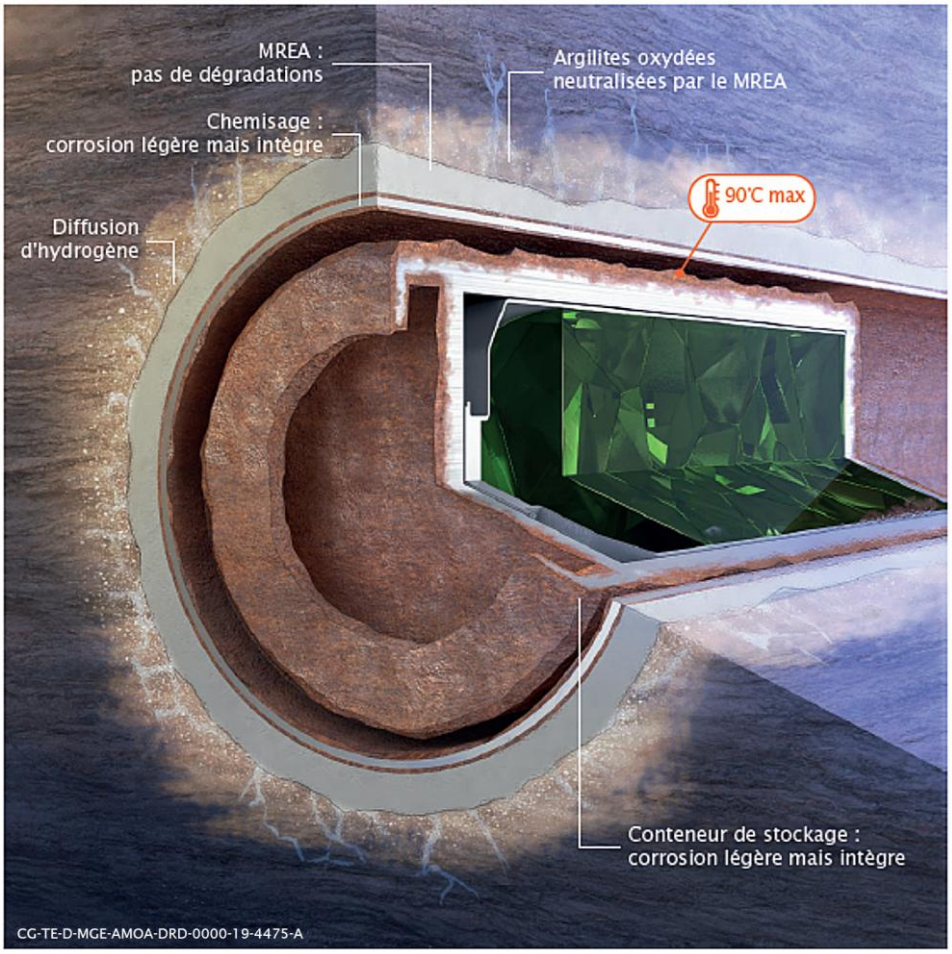


Figure 3-14 *Représentation schématique de l'alvéole HA avant la rupture du conteneur de stockage*

Pendant la période de fonctionnement, le conteneur de stockage, placé au sein d'un chemisage, évolue dans une atmosphère constituée essentiellement de vapeur d'eau avec une teneur en oxygène très limitée. Dans ce contexte et du fait de l'absence de cycles « humidification/séchage », le conteneur de stockage subit une corrosion généralisée très limitée.

L'hydrogène produit par la corrosion migre à l'état dissous dans les argilites et ne réagit que très peu ; en particulier, il contribue à transformer la pyrite des argilites du Callovo-Oxfordien en pyrrhotite, et l'eau interstitielle des argilites conserve un caractère réducteur.

Le matériau de remplissage cimentaire se neutralise progressivement au contact du fluide poral du Callovo-Oxfordien par réaction dans un premier temps avec les eaux acidifiées par l'oxydation des pyrites pendant la phase de creusement et dans une moindre mesure pendant la phase de fonctionnement, puis par la suite avec des eaux dont le pH est proche de la neutralité (cf. La note conceptuelle « L'évolution chimique des alvéoles HA et du Callovo-Oxfordien en champ proche (après-fermeture) » (14)).

Après une centaine à quelques centaines d'années, les bouchons d'alvéole à base d'argile gonflante constituent un tampon chimique permettant d'isoler la partie utile de l'alvéole de l'environnement alcalin de la galerie d'accès.

Après quelques milliers d'années *a minima*, le conteneur de stockage rompt mécaniquement suite à la diminution de son épaisseur par corrosion et au chargement mécanique anisotrope par la zone endommagée de Callovo-Oxfordien en champ proche, transmis par le matériau de remplissage et le chemisage après flambement (cf. Chapitre 3.4.2 du présent volume). Compte tenu de la quantité limitée de matériau cimentaire, il est attendu que lors de la perte d'étanchéité du conteneur de stockage, le pH du matériau de remplissage cimentaire ait fortement diminué (cf. La note conceptuelle « L'évolution chimique des alvéoles HA et du Callovo-Oxfordien en champ proche (après-fermeture) » (14)).

Bien que le conteneur primaire en acier inoxydable soit probablement résistant à la corrosion sur de très longues durées en conditions anoxiques, sa faible épaisseur ne permet pas d'exclure une rupture mécanique peu de temps après la rupture du conteneur de stockage. Cette rupture permet l'arrivée de l'eau (d'abord sous forme vapeur puis sous forme liquide après resaturation congruente à l'épuisement de la production de gaz). Le verre nucléaire se dissout selon les modalités décrites dans le chapitre 4 du présent volume.

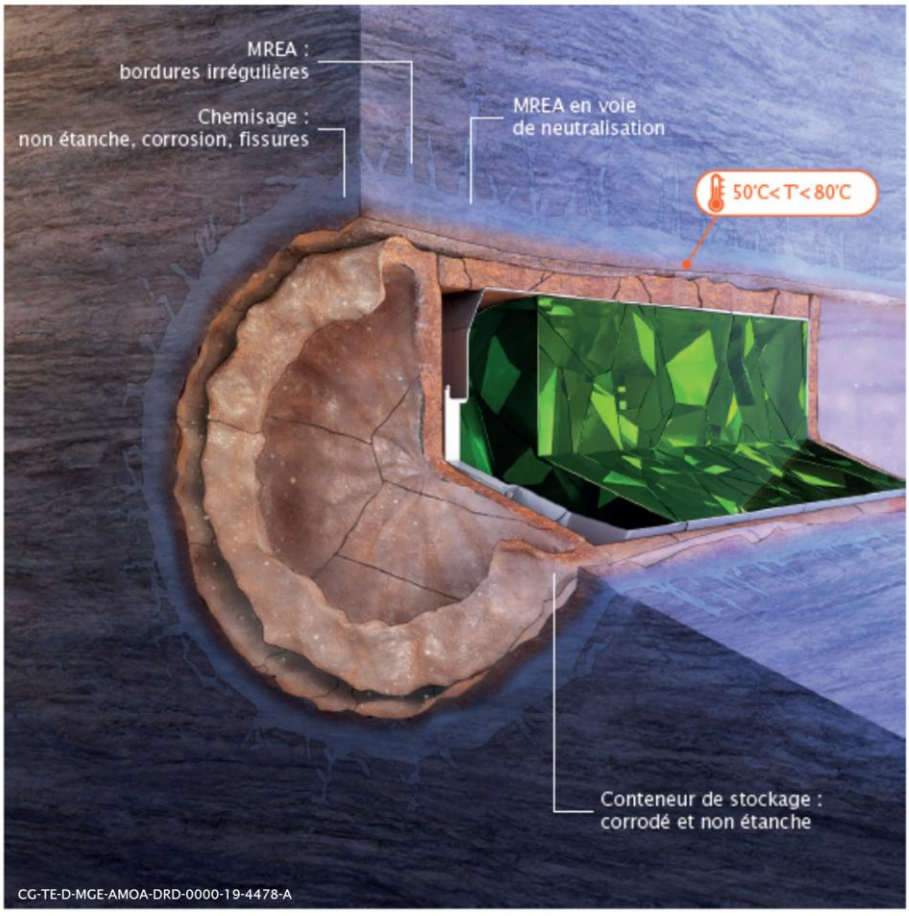


Figure 3-15 *Représentation schématique de l'alvéole HA après perte d'étanchéité du conteneur*

À plus long terme, au-delà de quelques centaines de milliers d'années, notamment après l'atteinte de la saturation totale des alvéoles HA et le retour à un équilibre hydraulique global au sein du stockage, l'évolution chimique d'un alvéole HA correspond au système composé par le Callovo-Oxfordien chimiquement sain, les produits de corrosion des aciers et le verre, à la température géothermale et avec des conditions de transport des solutés de type diffusion dominante. La dissolution du verre est donc pilotée par la composition de l'eau arrivant au contact du verre et les interactions verre/fer.

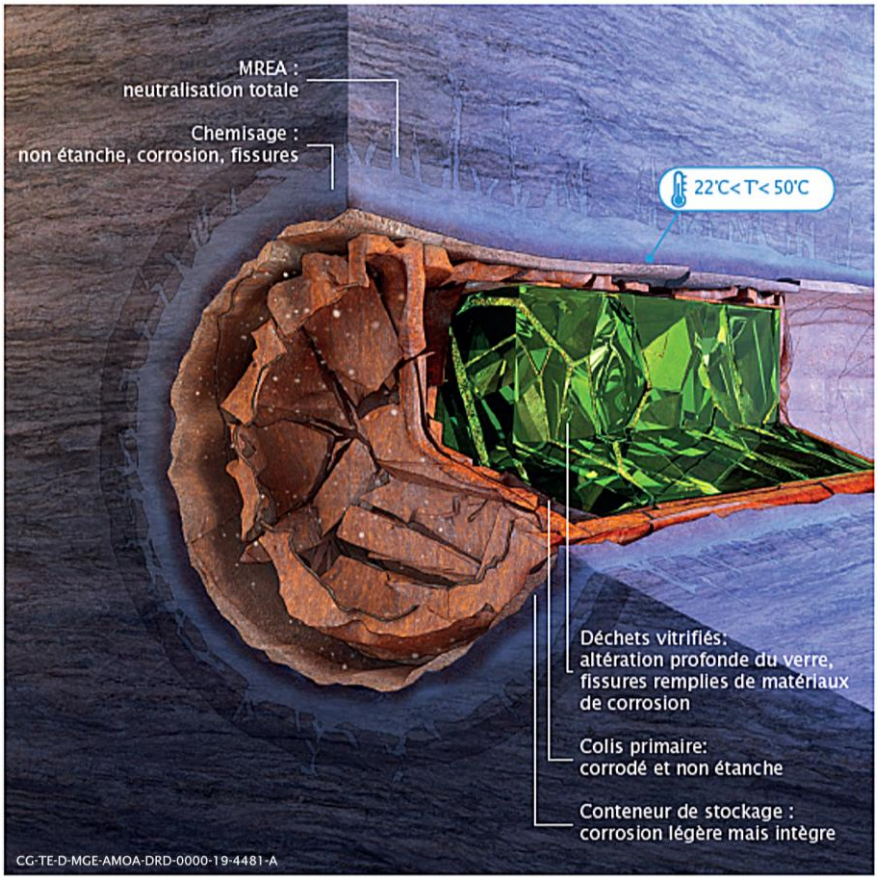


Figure 3-16 *Représentation schématique de l'évolution de l'alvéole HA à très long terme*

Le stockage crée des perturbations chimiques d'extension limitée, qui s'inscrivent sur des échelles de temps variant de quelques centaines d'années à plusieurs centaines de milliers d'années.

Pour les alvéoles HA, les données disponibles sur la corrosion des aciers bas carbone constituent un socle de connaissances bien établi :

- l'environnement du chemisage caractérisé par la présence d'un matériau de remplissage cimentaire permet d'éliminer le transitoire acide et de favoriser ainsi une protection/passivation de l'acier ;
- l'environnement du conteneur de stockage caractérisé par la présence de vapeur d'eau, la faible teneur en oxygène et l'absence de cycles d'humidification/séchage conduit à une corrosion généralisée d'au plus un micromètre par an ;
- les rayonnements gamma, pour des débits de doses jusqu'à 10 $Gy.h^{-1}$, conduisent à des valeurs de corrosion identiques, voire plus faibles qu'en l'absence de rayonnement. Le choix d'une épaisseur de colis de stockage garantissant un débit de dose maximal de 10 $Gy.h^{-1}$ a été retenu comme mentionné précédemment ;
- le choix des aciers (API 5L X65 pour le chemisage et P285NH pour le colis de stockage) permet de s'affranchir du risque de corrosion sous contrainte et de fragilisation par hydrogène dans les conditions attendues en stockage. Le détensionnement du conteneur de stockage au niveau de la zone de soudage entre le corps et le couvercle concourt également à se prémunir du risque de corrosion sous-contrainte.

3.4 L'évolution mécanique des ouvrages et du milieu géologique environnant

Avant la construction initiale du centre de stockage, la couche du Callovo-Oxfordien et le milieu géologique sont à l'équilibre mécanique sous un état de contrainte stable depuis plusieurs millions d'années. La construction du stockage crée un déséquilibre mécanique. Une évolution mécanique s'initie, d'abord du fait du creusement des ouvrages de stockage, entraînant un déconfinement de la roche à leur pourtour, puis sous l'effet de l'ensemble des processus thermiques, hydrauliques et chimiques qui sont mis en jeu dans le stockage et dans le milieu géologique environnant.

L'évolution mécanique du stockage résulte ainsi :

- de sollicitations strictement mécaniques comme les opérations de creusement qui constituent des sollicitations mécaniques majeures affectant les argilites en champ proche des ouvrages, avec la création d'une zone endommagée ;
- de couplages hydromécaniques : le stockage crée un transitoire hydraulique (cf. Chapitre 3.2 du présent volume). Il est marqué par une période d'état non saturé de tout ou partie du système de stockage, notamment pendant son exploitation, au cours de laquelle les processus chimiques de dégradation des composants du stockage sont limités et le comportement différé des argilites autour des ouvrages est contraint par la zone endommagée non saturée. Après la fermeture définitive du stockage, alors que la production d'hydrogène maintient les bétons d'infrastructure (soutènements/revêtements) et colis de stockage des déchets MA-VL et les remblais dans un état non saturé, elle n'influence pas la saturation des argilites et de l'argile gonflante des scellements. Le retour à l'état totalement saturé est atteint après une durée de l'ordre de quelques centaines de milliers d'années. L'état de saturation des composants du stockage et en particulier des argilites ou de l'argile gonflante influence de nombreux processus mécaniques comme le comportement différé des argilites ou le développement de la pression de gonflement de l'argile gonflante ;
- de couplages thermomécaniques : la mise en place des colis de déchets HA crée une charge thermique qui affecte principalement la zone de stockage et la couche du Callovo-Oxfordien environnante (cf. Chapitre 3.1 du présent volume). L'élévation de la température engendre des déformations et des contraintes dans les composants du stockage et dans les argilites. L'évolution du comportement mécanique des ouvrages de stockage concernés et des argilites environnantes est alors couplée à l'évolution des températures dans et autour des ouvrages.

Comme pour les processus thermiques, hydrauliques et chimiques, la conception compartimentée du stockage et les distances entre ouvrages concourent à une simplification de l'organisation des processus mécaniques du fait d'une limitation des interactions mécaniques au sein du stockage, et par conséquent à l'échelle de la couche du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes (cf. Chapitre 1.4 du présent volume).

C'est ainsi que (i) chaque zone de stockage suit une évolution mécanique propre indépendamment de celles de l'autre zone, et (ii) chaque quartier et chaque alvéole de stockage présente des évolutions similaires en dehors des sollicitations spécifiques (essentiellement de nature thermique ou chimique) liées aux déchets eux-mêmes. Ceci permet donc de traiter pour une grande part l'évolution mécanique du stockage et du milieu géologique environnant à l'échelle des ouvrages caractéristiques comme autant de motifs mécaniques élémentaires : alvéoles de stockage (colis de déchets HA, colis de déchets MA-VL), galeries au sens large, scellements et ouvrages de liaison surface-fond, aussi bien en période de réalisation et d'exploitation du stockage qu'après la fermeture jusqu'à un million d'années.

La nature des matériaux introduits dans le stockage et les évolutions thermique, hydraulique et chimique décrites dans les chapitres 3.1, 3.2 et 3.3 du présent volume, permettent de distinguer trois grandes catégories d'ouvrages en termes d'évolution mécanique :

- les alvéoles de colis de déchets HA : ils se caractérisent par la présence de matériaux métalliques, par une charge thermique élevée (cf. Chapitre 3.1 du présent volume), par l'absence de ventilation et par un premier retour à un état proche de la saturation rapidement après fermeture. Avant que la production d'hydrogène par corrosion des composants métalliques conduise au maintien d'un état non saturé sur une période de plusieurs centaines de milliers d'années environ (cf. Chapitre 3.2 du présent volume) ainsi que la fiche 4.3 « L'évolution mécanique des composants métalliques d'un alvéole HA » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) ;
- les alvéoles de colis de déchets MA-VL, les galeries et les ouvrages de liaison surface-fond : ces ouvrages sont constitués majoritairement de béton et de matériau de remblayage ou de scellement. Leur charge thermique est faible ou inexistante (cf. Chapitre 3.1 du présent volume). Ils sont ventilés pendant la phase de fonctionnement. Après la fermeture définitive, la production d'hydrogène par corrosion des composants métalliques conduit au maintien d'un état non saturé sur une période de plusieurs centaines de milliers d'années environ (cf. Chapitre 3.2 du présent volume ainsi que la fiche 5.3 « L'évolution mécanique d'un alvéole MA-VL » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) ;
- les ouvrages de fermeture et en particulier les scellements : ces ouvrages combinent la présence d'argiles (argile gonflante et argilites) et de béton. Leur charge thermique est modérée à nulle selon leur distance aux alvéoles contenant des déchets exothermiques ou non (cf. Chapitre 3.1 du présent volume).

3.4.1 L'évolution mécanique du milieu géologique en grand sur le site d'implantation des ouvrages souterrains de l'INB

La charge thermique du stockage (*e.g.* Élévation transitoire de température) entraine corrélativement une réponse thermo-hydromécanique (THM) transitoire du milieu géologique (Callovo-Oxfordien et formations encaissantes supérieures notamment). Les principaux processus transitoires ainsi mis en jeu sont les suivants :

- une dilatation thermique des différentes formations géologiques ;
- des contraintes thermomécaniques, notamment de cisaillement aux interfaces du Callovo-Oxfordien avec les formations encaissantes, au droit des extrémités des zones de stockage exothermiques du fait des différences de dilatation thermique de ces formations, en lien avec leurs comportements mécaniques différents (i.e. Formations de compétences différentes). À grande échelle, compte tenu de la limitation des niveaux de température (cf. Chapitre 1.4.4 du présent volume), le comportement du Callovo-Oxfordien induit par cette sollicitation reste dans son domaine d'élasticité ;
- des surpressions de l'eau interstitielle, principalement dans le Callovo-Oxfordien, du fait de la dilatation thermique différentielle entre l'eau interstitielle et le squelette solide et de la très faible perméabilité des argilites.

La réponse thermo-hydromécanique s'organise strictement au droit des différentes zones de stockage de déchets exothermiques, principalement celles des déchets HA. En effet, les distances de garde entre les zones HA et la zone MA-VL, ainsi que la structure globalement planaire du stockage (*i.e.* Faible épaisseur des zones HA *vs* leurs dimensions horizontales) conduit à l'absence d'interaction thermique entre les zones (cf. Fiche 3.2 « Le comportement thermo-hydromécanique du Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

La charge thermique de la zone HA génère des contraintes et déformations thermomécaniques dans le milieu géologique. En champ lointain des alvéoles, compte tenu des niveaux de température mis en jeu dans la couche du Callovo-Oxfordien en grand et dans les formations encaissantes, le Callovo-Oxfordien reste dans le domaine élastique (*i.e.* Pas d'endommagement). En champ proche des alvéoles, la sollicitation thermo-hydro-mécanique peut engendrer une faible extension de l'endommagement initial lié au creusement mais reste circonscrit au champ proche de l'alvéole.

À l'échelle du milieu géologique au droit de la zone HA, la charge thermique du stockage entraîne une déformation essentiellement verticale (du fait de la condition limite de déplacement libre en surface) atteignant au plus de l'ordre de 0,1 % à 0,2 % du Callovo-Oxfordien au droit de la zone HA, et ainsi un « soulèvement » des couches sus-jacentes. La contribution principale à ce soulèvement provient de la dilatation thermique du Callovo-Oxfordien qui est à la fois la formation soumise aux élévations de température les plus importantes et celle présentant le coefficient de dilation thermique le plus élevé. Le soulèvement de la surface topographique suit la cinétique de l'élévation de température, d'abord avec une cinétique rapide (de l'ordre du mm.an^{-1}), pour atteindre un maximum de l'ordre de 20 cm plusieurs siècles après la mise en place des colis, puis il décroit avec une cinétique plus lente de l'ordre de quelques dizaines de µm par an. Il faut ainsi plus de 10 000 ans pour que la surface topographique retrouve sa position initiale. Ce soulèvement est relativement homogène dans le plan horizontal du fait de l'homogénéisation progressive du flux de chaleur avec sa diffusion. Ainsi, les pentes maximales induites en surface au droit des extrémités de la zone HA ne dépassent pas quelques centièmes de pour-cent. Les déformations du milieu géologique du fait de la charge thermique du stockage n'entraînent donc pas « d'effet de butte » en surface.

Dans le cas particulier des extrémités des différents sous-quartiers de stockage HA, les faibles gradients horizontaux de température et la dilatation thermique différentielle entre les couches induisent des contraintes de cisaillement aux interfaces entre le Callovo-Oxfordien et les encaissants dont l'amplitude est limitée à quelques MPa au maximum. Les déviateurs induits restent donc nettement inférieurs au critère d'endommagement des argilites et aux critères de résistance des encaissants calcaires, d'où l'absence de fracturation aux interfaces entre le Callovo-Oxfordien et les encaissants (Oxfordien carbonaté et Dogger).

Dans le cas particulier de certains alvéoles MA-VL qui contiennent des colis de déchets MA-VL les plus exothermiques (notamment les CSD-C, PIVIC ou les C1PG^{SP}) la température maximale atteinte est plus faible que celle dans les alvéoles HA au regard des critères de dimensionnement plus contraignants (65 °C dans les bétons des alvéoles MA-VL contre 90 °C dans les alvéoles HA) et avec une décroissance plus rapide. L'exploitation du stockage conduit notamment à ce qu'une partie très significative de la puissance thermique de ces colis de déchets MA-VL soit évacuée par la ventilation. Au global, la sollicitation thermique au droit des alvéoles de colis de déchets MA-VL exothermiques est faible et il en va de même *de facto* pour la réponse thermo-hydromécanique du milieu géologique associée.

3.4.2 L'évolution mécanique des ouvrages

3.4.2.1 L'évolution mécanique des alvéoles des ouvrages de grands diamètres (alvéoles MA-VL, galeries, ouvrages de liaison surface-fond)

3.4.2.1.1 La zone endommagée par le creusement

Le creusement des ouvrages provoque une redistribution des contraintes et des déformations qui conduisent à la formation d'une zone endommagée dans la roche à proximité immédiate des ouvrages. Cet endommagement est variable selon la nature de la roche et de ses caractéristiques intrinsèques (résistance), de la profondeur et de l'orientation de l'ouvrage par rapport au champ de contrainte naturel.

Les ouvrages de liaison surface-fond (puits/descenderies) interceptent une alternance de couches à dominante argileuses (Kimméridgien marneux, unité argileuse du Callovo-Oxfordien) ou calcaires (calcaires du Barrois, Calcaires de l'Oxfordien, unité Silto-Carbonaté de la formation du Callovo-Oxfordien).

Dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien, le développement du réseau de galeries au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne depuis 2005 a permis d'appréhender de manière comparée, cohérente et détaillée l'effet de différentes méthodes de creusement/soutènement et de l'orientation des ouvrages par rapport au champ de contraintes naturelles, sur le comportement de la roche en champ proche. Ces observations et mesures ont ainsi permis de décrire et comprendre la fracturation induite par le creusement et l'évolution temporelle de son comportement (cf. Le référentiel « Les expérimentations scientifiques et technologiques 2022 » (10)). Elles sont aussi confirmées par les modélisations numériques.

Le ratio entre les valeurs des contraintes naturelles in situ ($\sigma_v = \sigma_h \approx 12$ MPa et $\sigma_H \approx 16$ MPa) et la résistance des argilites (résistance en compression simple de l'ordre de 21 MPa) dans l'unité argileuse implique une « décharge mécanique » très importante lors du creusement et l'apparition d'une fracturation tant en avant du front de taille (les chevrons) qu'en arrière (décharge radiale). Les observations réalisées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne depuis 2002, et ce jusqu'à la réalisation des ouvrages de plus grand diamètre d'environ neuf mètres de diamètre (galerie GVA1), montrent une même fracturation, quelles que soient les méthodes et les modalités de creusement testées jusqu'à présent et la géométrie des ouvrages (diamètre en particulier). Cette zone endommagée initiale se caractérise par l'apparition de fissures plus ou moins connectées, et dont la densité décroît avec l'éloignement à la paroi (cf. Encadré ci-après) (cf. La note conceptuelle « État initial et l'évolution de la zone endommagée » (15)).

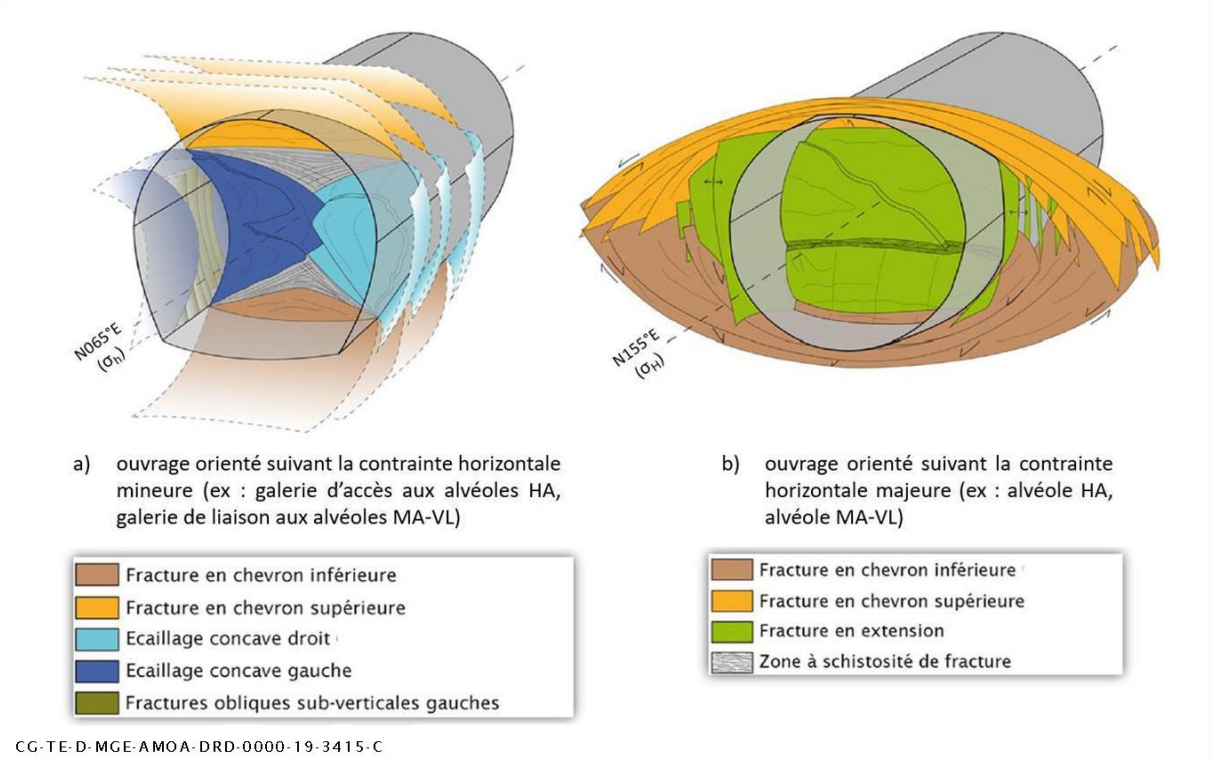


Figure 3-17 *Représentation conceptuelle de la fracturation induite autour des ouvrages dans le Callovo-Oxfordien suivant leurs orientations par rapport aux contraintes principales horizontales (Armand et al., 2014 (16)) : (à gauche) selon σ_h, et (à droite) selon σ_H*

Dans l'unité silto-carbonatée (USC) du Callovo-Oxfordien, la résistance en compression simple de l'argilite supérieure à 30 MPa et une lithologie marquée par une variabilité verticale et latérale de « niveaux/zones/passées » plus ou moins carbonatés impliquent une fracturation très différente de celle observée dans l'unité argileuse à savoir très hétérogène, localement connectée ou non. Son expression se rapproche du modèle de fracturation de type « pelure d'oignon » (Bossart *et al.*, 2002 (17)). Comme pour l'unité argileuse, la corrélation entre la fracturation et la conductivité hydraulique conduit à des valeurs de conductivité hydraulique initiale potentiellement élevées localement en paroi (là où il y a une fracture), mais qui décroissent très rapidement pour rejoindre des valeurs proches de celles mesurées sur l'argilite saine.

ZOOM SUR LA ZONE ENDOMMAGÉE AUTOUR DES EXCAVATIONS IMPLANTÉES DANS L'UNITÉ ARGILEUSE DU CALLOVO-OXFORDIEN

Les données acquises au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne autour de différents ouvrages permettent de distinguer au sein de la zone mécaniquement perturbée par le creusement deux zones (cf. Figure 3-18) :

- une **zone dite fracturée connectée** comportant un réseau 3D de fractures connectées entre elles et à la paroi des ouvrages. Ce réseau dense induit une augmentation de la perméabilité de la roche de plusieurs ordres de grandeur (plus de deux ordres de grandeur) immédiatement après le creusement de l'ouvrage. Cette augmentation importante est due à la transmissivité des fractures et la connectivité du réseau et non à la perméabilité intrinsèque de la roche ; son extension dépend de l'orientation de l'ouvrage par rapport aux contraintes *in situ* ;
- une **zone dite fracturée discrète**, située au-delà de la zone fracturée connectée ; elle est caractérisée par des fractures de cisaillement subparallèles à la paroi, de distribution peu dense et non ou très faiblement connectées entre elles. Ces fractures sont associées à un endommagement diffus (microfissuration) dans les blocs qu'elles délimitent où à leur périphérie. La perméabilité de cette zone est au plus de deux ordres de grandeur supérieure à celle des argilites saines. Au-delà, les argilites sont considérées comme non perturbées et on retrouve la perméabilité des argilites saines. L'extension de cette zone est de l'ordre d'un diamètre de galerie.

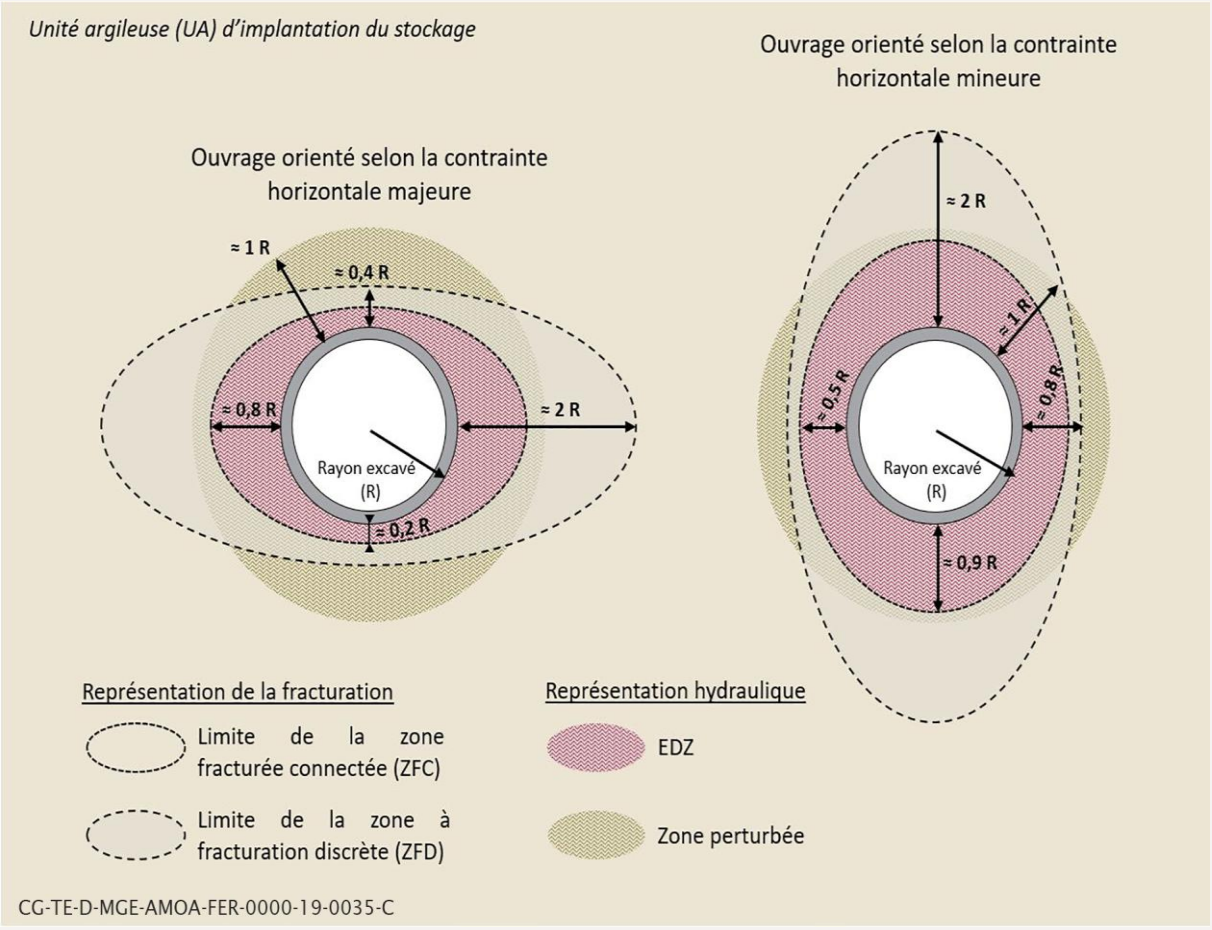


Figure 3-18 *Représentation schématique de la zone endommagée autour des ouvrages dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien*

3.4.2.1.2 L'évolution mécanique générale

Durant la phase de fonctionnement, les ouvrages de liaison surface-fond, les galeries et les alvéoles de déchets MA-VL sont soumis, *via* la ventilation, à des conditions d'environnement globalement sèches et tempérées conduisant à une désaturation des infrastructures en béton et des argilites en champ proche.

Dans le cas particulier des alvéoles MA-VL contenant des déchets faiblement exothermiques, la température maximale après chargement est par dimensionnement inférieure à 65 °C.

Ce contexte hydraulique et thermique en phase de fonctionnement conduit à une lente dégradation chimique des bétons de soutènement/revêtement et des colis de stockage de déchets MA-VL, ainsi qu'à une corrosion des composants métalliques sans incidence sur l'évolution mécanique de l'ouvrage. L'ensemble des données acquises au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne montre que le comportement mécanique est peu affecté par la méthode et la vitesse de creusement et les ouvrages périphériques au-delà d'une distance de quelques diamètres (cf. Le référentiel « Les expérimentations scientifiques et technologiques 2022 » (10)). Il est en revanche principalement piloté par les interactions sol/structure (et, dans une moindre mesure, par les effets des élévations de température le cas échéant) résultant de la décharge mécanique et de la convergence des argilites (mobilisant essentiellement la zone endommagée) résultant de la modification de l'état de contrainte liée au creusement. Toutefois, compte tenu de la diminution de la vitesse de fluage des argilites dans le temps et par la désaturation des argilites, la mise en charge du soutènement/revêtement par les argilites reste limitée sur la durée séculaire à pluriséculaire de l'exploitation.

Les revêtements/soutènements sont soumis à un chargement mécanique anisotrope, d'abord rapide (quelques mois) puis asymptotique avec des vitesses de déformation de plus en plus faibles au cours du temps. Les revêtements/soutènements sont conçus et dimensionnés mécaniquement pour accommoder les déformations (éléments compressibles en extrados du revêtement béton) et résister au chargement mécanique qui leur est appliqué de manière à garantir leur durabilité sur toute la période de fonctionnement. *De facto*, les déformations des revêtements/soutènements sont donc faibles (convergence d'ordre millimétrique), et permettent d'éviter le chargement des piles de colis de déchets, compte tenu des vides technologiques internes de mise en place (d'ordre décimétriques) (cf. La note conceptuelle « L'évolution des galeries en après-fermeture » (18)).

Après la fermeture du système de stockage, la tendance générale de l'évolution mécanique des alvéoles MA-VL est pilotée par le comportement mécanique à long terme du Callovo-Oxfordien, plus particulièrement la zone endommagée mécaniquement (*e.g.* Fracturée) en champ proche lors du creusement et la dégradation mécanique des bétons (revêtement/soutènement, structure, conteurs de stockage colis de déchets primaires), en lien avec la corrosion des armatures et la dégradation chimique, dans le contexte du transitoire hydraulique/gaz caractérisé par une humidité relative élevée dans les vides et un état partiellement saturé pendant quelques centaines de milliers d'années dans les matériaux assimilables à des milieux poreux comme les remblais de galeries, les bétons du génie civil (hors noyaux de scellement).

L'augmentation, même lente, du chargement mécanique des revêtements/soutènements par le Callovo-Oxfordien et la dégradation de leurs caractéristiques mécaniques conduisent à une rupture des revêtements/soutènements d'abord localisée (entre un millier et quelques milliers d'années) puis générale.

La rupture des revêtements/soutènements conduit à la mise en charge mécanique des colis de stockage MA-VL par ces derniers et, indirectement, par le Callovo-Oxfordien. Cette mise en charge associée à la dégradation mécanique des conteneurs de stockage (conteneurs béton ou paniers de stockage métallique) par la corrosion entraine un chargement complet progressif de l'alvéole depuis les revêtements/soutènements jusqu'aux colis primaires de déchets MA-VL.

En champ proche autour des alvéoles MA-VL, les ruptures successives du revêtement provoquent localement de nouvelles décharges de la roche, moins brutales que celle issue de l'excavation. La limitation des vides résiduels et l'absence de création de vide au sein des alvéoles MA-VL par les processus de dégradations chimiques (cf. *Infra*) ne sont pas de nature à entrainer une augmentation significative des vitesses de déformations différées et une extension importante de la zone fracturée, plus particulièrement en vertical (quelques mètres au plus de manière très enveloppe).

La convergence progressive des argilites, initiée dès la phase de creusement entraine des déformations du milieu géologique contribuant à la consolidation de la zone fracturée « connectée ». En effet, l'ensemble des données expérimentales (notamment l'expérimentation CDZ[49] au Laboratoire de recherche souterrain (10)) ou l'expérimentation EH au Mont Terri) souligne les capacités d'auto-colmatage par gonflement des minéraux smectiques et fermeture mécanique (même sous des contraintes de compression faibles) des argilites endommagées (endommagement diffus et endommagement localisé type fractures) (cf. Encadré ci-dessous).

ZOOM SUR LA FERMETURE DES FRACTURES DE LA ZONE ENDOMMAGÉE : AUTO-COLMATAGE

L'expérimentation EH relative à l'évolution de la perméabilité de la zone endommagée avec la resaturation réalisée au Mont Terri et transposable à l'INB Cigéo montre que la resaturation et le gonflement associé des argiles réduisent la transmissivité des fissures de deux à trois ordres de grandeur au bout de trois ans. Des mesures de perméabilité à l'eau d'échantillons d'argilites fissurées confirment cette évolution : le gonflement des argilites au niveau d'une fracture permet de restaurer la perméabilité à l'eau des argilites saines au bout de quelques jours (cf. Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

De la même manière, l'expérimentation Selfrac au Mont Terri montre que l'application d'une pression de quelques MPa diminue encore la transmissivité de deux ordres de grandeur au moins (Buehler *et al.*, 2003 (19)). Des essais en laboratoire confirment également l'auto-colmatage des argilites fissurées (NEA, 2010 (20)).

Avec la recompression mécanique des fissures, la perméabilité de la zone endommagée autour des ouvrages diminue d'un à plusieurs ordres de grandeur pour tendre vers la perméabilité des argilites saines. Cette diminution de la perméabilité de plus de deux ordres de grandeur du fait de la recompression des fissures est notamment observée au niveau de la récente expérimentation CDZ du Laboratoire de recherche souterrain du centre de Meuse/Haute-Marne. Les forages hors de la zone de poussée du vérin ne montrent pas d'évolution de conductivité hydraulique (sauf pour un intervalle) en fonction des paliers de chargement tandis que les forages sous le vérin montrent une assez nette diminution des conductivités hydrauliques pour les intervalles les plus proches de la paroi où la conductivité hydraulique chute d'un ordre de grandeur à près de cinq ordres de grandeur.

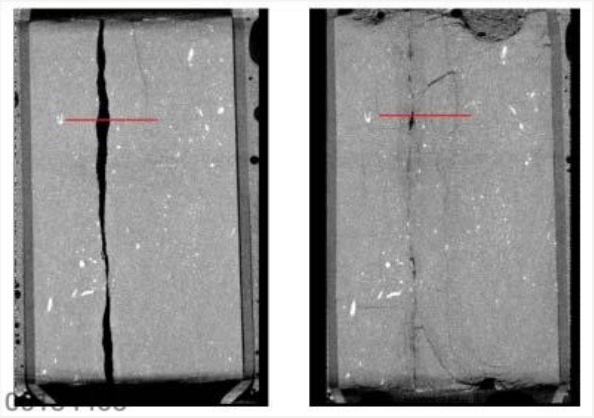


Figure 3-19 *Auto-colmatage des argilites observé par microtomographie X (diamètre des échantillons 1 cm)*

[49] Compression mécanique de l'EDZ : étude de l'impact d'une pression mécanique et de l'imbibition sur les propriétés HM de la zone fracturée à la paroi d'une galerie. Expérimentation dans le Laboratoire de Meuse/Haute-Marne pour caractériser le comportement de l'EDZ au droit des scellements. Elle consiste à démontrer la fermeture hydraulique des fractures autour des ouvrages par l'application d'une poussée sur le parement d'une galerie.

In fine, sur le long terme (quelques 10^5 ans), il n'y a pas d'effondrement des alvéoles, et l'atteinte progressive d'un état de quasi-équilibre mécanique tendant vers l'état mécanique naturel *in situ*. L'interne des alvéoles MA-VL se charge progressivement, dans un ensemble comprenant notamment des blocs de bétons tendant vers un état chimique neutralisé (*e.g.* En équilibre avec les eaux du Callovo-Oxfordien).

3.4.2.1.3 Cas particulier des alvéoles de fûts de déchets bitumés stockés en l'état en conteneur béton

Durant le transitoire hydraulique-gaz, l'augmentation de l'humidité relative et l'arrivée d'eau liquide sur les fûts de déchets bitumés entraine une reprise d'eau par les bitumes. Cette reprise d'eau entraine le relâchement progressif de sels en solution (sulfates, nitrates), le gonflement des bitumes et le développement progressif et local de pression de gonflement en interne des alvéoles, avec un effet faible en termes de sur-endommagement en champ proche autour des alvéoles.

Ce processus devrait s'étendre sur plusieurs dizaines de milliers d'années, voire au-delà, en passant néanmoins par un maximum ; avec la reprise d'eau, le potentiel osmotique passe par un maximum puis diminue avec le départ progressif des sels hors de l'enrobé bitumineux et l'arrivée progressive d'eau au sein de l'enrobé jusqu'à l'atteinte de l'équilibre osmotique avec l'eau cimentaire puis à long terme l'eau du Callovo-Oxfordien.

La dissolution des sels et leur transfert à travers des bétons entraînent une dégradation chimique essentiellement des bétons de colis de stockage et se superpose à celle provoquée par les eaux du Callovo-Oxfordien. Les échelles de temps des dégradations chimiques sont du même ordre de grandeurs que celles de la resaturation, plusieurs centaines de milliers d'années.

N'étant pas dans un système convectif avec des flux mobilisant les matériaux, il n'y a pas de « dissolution » des bétons mais une succession de processus de transformation dissolution/précipitation sans déplacements significatifs de matière. De la même manière, l'arrivée de sels dans le Callovo-Oxfordien en champ proche n'entraine pas de processus de dissolution-précipitation des phases solides ou de modifications de l'état de l'eau interstitielle susceptibles de modifier le comportement mécanique en grand du Callovo-Oxfordien et, plus particulièrement, celui différé de la zone endommagée.

Le gonflement conduit à l'application transitoire de pressions internes à l'alvéole et, *in fine*, au Callovo-Oxfordien en paroi de l'alvéole, notamment *via* les différents composants en béton, en particulier dès lors que le revêtement/soutènement a rompu. Étant donné sa plasticité et, en raison des vides disponibles qui permettent un réarrangement des fragments, la zone endommagée de Callovo-Oxfordien absorbe *pro parte* ces mises en charge mécaniques et il y a une évolution de son extension, essentiellement horizontalement, de l'ordre de quelques mètres au plus.

À long terme, l'évolution mécanique des alvéoles dédiés au stockage des fûts de déchets bitumés mis en conteneur béton rejoint la tendance générale d'évolution mécanique des alvéoles de déchets MA-VL.

3.4.2.1.4 Cas particulier des alvéoles en stockage direct

Il existe deux configurations pour les colis primaires MA-VL en stockage direct (*e.g.* Stockés sans conteneur de stockage) :

- les colis primaires stockés sous forme unitaire ;
- les colis primaires stockés regroupés en paniers.

Le premier cas concerne certaines familles CEA conditionnées en futs 870 L, les CBF-C'2 et les coques $C1PG^{SP}$ (cf. Volume 3 du présent rapport). Les déplacements des bétons de structure après rupture du revêtement conduisent potentiellement à l'apparition de désordres des empilements de colis avec des déplacements importants, d'échelle métrique. Le risque de chute est particulièrement limité compte tenu de la taille des colis.

Le deuxième cas concerne les colis CSD-C et certaines familles CEA conditionnées en 500 L (coque béton), qui sont disposés en paniers en acier inoxydable et gerbés sur deux ou trois niveaux. La stabilité mécanique de ces empilements est alors conditionnée à celle des paniers.

Le taux de vide initial dans ces alvéoles de colis pris en charge en stockage direct est un peu plus important (entre 5 % et 10 % de plus) par rapport à des alvéoles où les colis sont conditionnés en colis de stockage. Le calage de l'architecture dans la couche couvre cette variabilité.

Dans le cas des colis stockés en panier, la structure interne des alvéoles prévus pour le stockage direct des CSD-C et des familles de colis CEA conditionnées en 500 L (coques béton), du fait de la nature des colis à stocker et de leurs propriétés (exothermique tout particulièrement pour les CSD-C), est adaptée à la densification des colis au sein de ces alvéoles.

Dans ces alvéoles, le radier seul représente déjà 13 m^3/m à 17 m^3/m linéaire d'alvéole, représentant une zone mécaniquement très rigide et homogène en partie inférieure par rapport à une partie centrale présentant des possibilités de déplacement beaucoup plus importantes (colis cylindriques disposés en paniers métalliques sur une à deux hauteurs). Les colis occupent moins de 20 % de la section excavée. L'absence de conteneur de stockage dans ces alvéoles entraine une reprise de charge par les colis primaires après la rupture du génie civil.

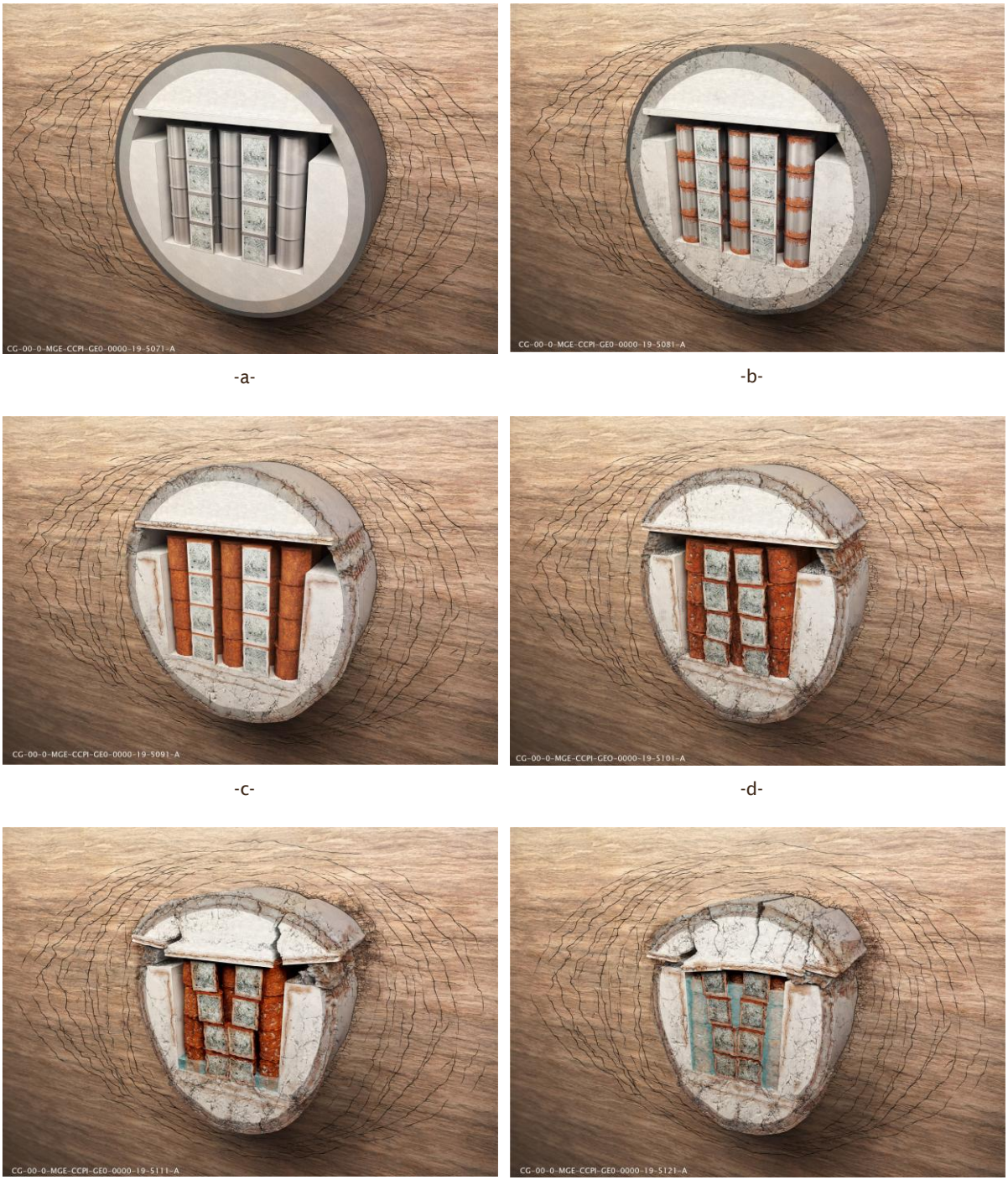


Figure 3-20 *Évolution mécanique d'un alvéole MA-VL : cas du stockage direct de colis en acier, à échelle de (a) quelques dizaines d'années (b) quelques centaines d'années (c) quelques milliers d'années (d) quelques dizaines de milliers d'années (e) 10^5 ans environ (f) quelques 10^5 ans*

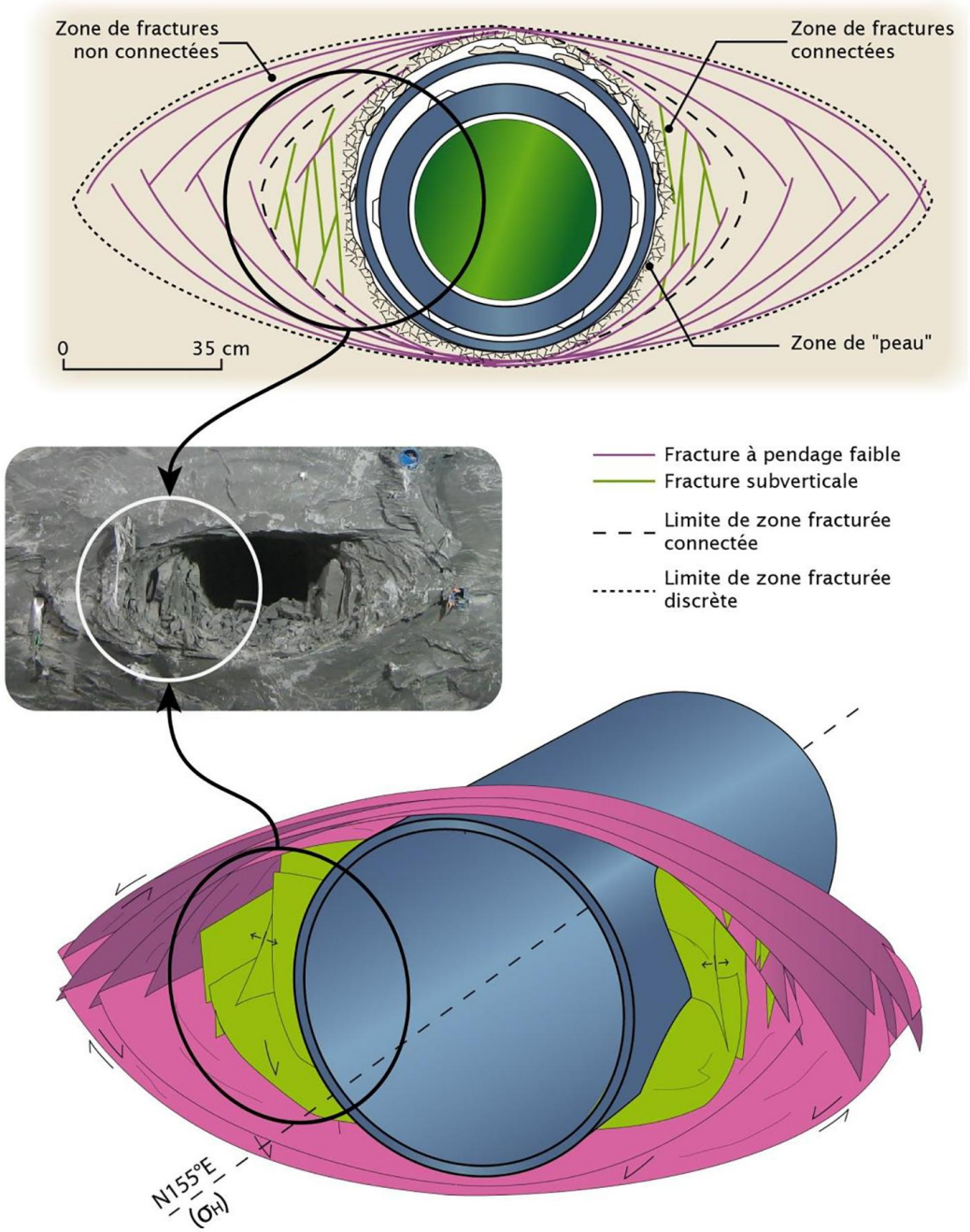
3.4.2.2 L'évolution mécanique des alvéoles HA

Les alvéoles de stockage HA constituent des ouvrages qui se différencient des galeries ou des alvéoles MA-VL du fait de leurs dimensions caractéristiques (dimension inframétrique) et la nature des matériaux qui constituent l'ouvrage équipé, notamment les aciers du chemisage et du conteneur de stockage, le verre nucléaire, le coulis cimentaire en extrados du chemisage.

L'évolution mécanique des alvéoles HA est pilotée par le chargement mécanique opéré par le Callovo-Oxfordien et par la résistance des composants métalliques qui diminue au cours du temps au fur et à mesure de la consommation de l'acier par la corrosion (cf. Fiche 4.3 « L'évolution mécanique des composants métalliques d'un alvéole HA » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Le séquencement de la mise en charge mécanique du chemisage par la roche pour un alvéole est bien identifié sur la base de nombreuses expérimentations aussi bien échelle réduite qu'en pleine échelle au Laboratoire de recherche souterrain du centre de Meuse/Haute-Marne (expérimentation AHA[50]) (10). Ces expérimentations qui représentent plusieurs centaines de points de mesure, mettent toutes en évidence un même comportement mécanique similaire à celui observé pour les galeries. En effet, comme pour le revêtement/soutènement des galeries, le comportement mécanique du chemisage est directement piloté par la zone endommagée d'argilites autour de l'alvéole, en particulier en termes d'anisotropie.

[50] AHA : Le principe des expérimentations AHA consiste en la démonstration de réalisation d'un alvéole chemisé d'au moins 80 mètres de longueur avec remplissage du vide annulaire entre le chemisage et la roche avec pour objectif de tester la faisabilité de réalisation, d'évaluer le comportement mécanique du chemisage en présence de matériau de remplissage, d'évaluer les échanges gazeux entre la galerie et l'alvéole HA et de vérifier la faisabilité de mise en œuvre de dispositifs de mesure envisagés pour la surveillance.



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0554-A

Figure 3-21 *Représentation schématique de la zone endommagée autour d'un alvéole de stockage HA*

La sollicitation de flexion radiale qui résulte du chargement anisotrope, génère *de facto* une ovalisation du chemisage qui n'est pas influencée par la distance à la galerie d'accès. La cinétique d'ovalisation suit la déformation de la zone endommagée avec une phase rapide puis l'atteinte d'un régime asymptotique (avec des valeurs de l'ordre ou inférieures à 10^{-11} s^{-1}, comme pour les galeries) et diminue dans le temps jusqu'à atteindre le blocage. Une extrapolation des données acquises montre que l'ovalisation maximale attendue sur 100 ans reste inférieure à 10 mm au diamètre, ce qui garantit le maintien des jeux de manutention autour des colis de stockage sur cette période. Pendant cette phase, le colis de stockage est soumis à son poids propre et à la pression fluide ambiante.

La consommation progressive du chemisage en acier par corrosion au cours du temps abaisse sa pression critique de flambement parallèlement à l'augmentation du chargement par le Callovo-Oxfordien. Lorsque celui-ci devient supérieur à cette pression critique, le chemisage flambe radialement ce qui se traduit par une déformation brutale et localisée (de type mono-lobe) avec une faible longueur d'onde du fait de la présence du milieu confinant comme déjà mis en évidence dans des configurations de soutènement analogue (cf. Fiche 4.3 « L'évolution mécanique des composants métalliques d'un alvéole HA » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) (cf. Figure 3-22).

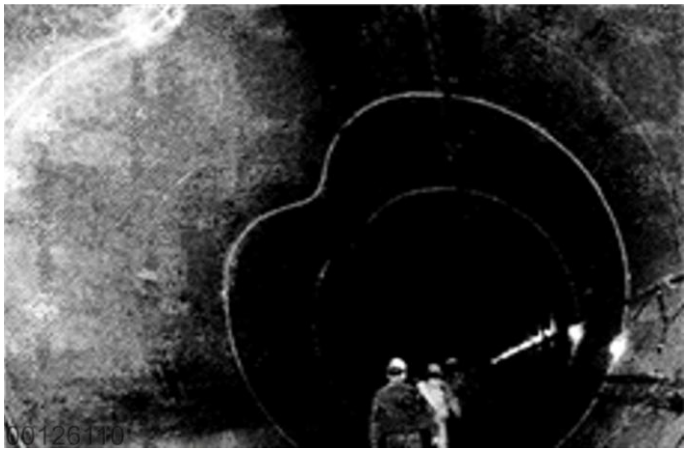


Figure 3-22 *Flambement monolobe d'un liner en acier (Newhall Tunnel, Californie (21))*

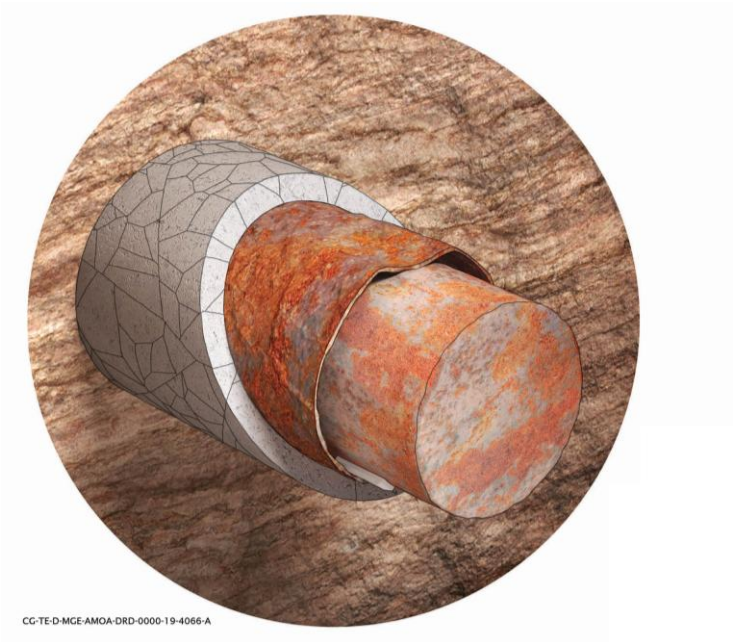


Figure 3-23 *Représentation schématique de l'alvéole HA après flambement du chemisage*

Différentes campagnes expérimentales réalisées sur coques cylindriques confinées, soumises à un chargement externe de type solide/solide, ont permis, d'une part, d'estimer la pression critique de flambement pour différentes configurations d'essais (nature du milieu confinant, épaisseur, etc.), d'autre part, de caractériser le comportement post-flambement (cf. Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques (1)). Ces nombreux résultats expérimentaux ont permis de bien caler un modèle de calcul permettant notamment de reproduire l'instabilité mécanique de la structure testée (seuil de flambement et comportement post-flambement). Ce modèle a ensuite été exploité pour simuler le flambement d'un chemisage soumis à une corrosion généralisée homogène (reproduite ici par une simple perte d'épaisseur) et un chargement radial externe homogène. Ces calculs ont permis d'estimer l'épaisseur résiduelle de flambement du chemisage entre 10 mm et 15 mm pour une pression externe de l'ordre de 10 MPa. Dans l'hypothèse d'une vitesse de corrosion moyenne de 10 µm.an^{-1} (valeur haute en conditions anoxiques), le flambement du chemisage se produirait donc après plusieurs centaines d'années. En considérant un abattement estimé autour de 35 % au niveau des jonctions (point faible compte tenu du doublement des surfaces accessibles à la corrosion), le flambement du chemisage est estimé au-delà de 300 ans après la mise en place du chemisage (cf. La note conceptuelle « Le comportement mécanique et la corrosion des composants métalliques des alvéoles HA dans le temps (exploitation et après fermeture) » (22)).

Le flambement du chemisage est susceptible d'entraîner la réduction des jeux fonctionnels à l'intérieur de l'alvéole pouvant aller jusqu'à la mise en contact du chemisage et du conteneur de stockage. Ce chargement mécanique est donc transmis radialement[51] au conteneur dans un premier temps *via* les surfaces de contact avec le chemisage, puis directement par la roche et le matériau de remplissage après corrosion totale du chemisage. Ce chargement localisé, difficilement caractérisable pour ce qui est de la localisation des zones de contact et du niveau de pression appliquée, entraîne l'entrée en plasticité du conteneur. Du fait de sa grande ductilité (y compris au niveau des zones soudées), l'acier P285NH du conteneur est capable de supporter de grandes déformations plastiques sans se fissurer de sorte que le conteneur conserve son étanchéité jusqu'à la consommation de la quasi-totalité de son épaisseur par corrosion (cf. Fiche bilan évolution mécanique du conteneur).

En considérant l'augmentation du chargement du conteneur de stockage au cours du temps, couplée à la diminution de l'épaisseur d'acier de ce conteneur de stockage, la fissuration de celui-ci est attendue entre quelques milliers d'années et quelques dizaines de milliers d'années dans la gamme de vitesse de corrosion généralisée [1 ; 10 µm.an^{-1}] (cf. Fiche bilan corrosion du recueil). Ainsi, en considérant la valeur haute du domaine de corrosion généralisée en conditions anoxiques (10 µm/an), l'épaisseur du conteneur de stockage (53 mm au niveau de la zone la plus amincie), et l'épaisseur critique de fissuration la plus haute (de l'ordre de 15 mm), la fissuration ductile du conteneur de stockage interviendrait au plus tôt aux alentours de 3 800 ans (cf. Fiche 4.3 « L'évolution mécanique des composants métalliques d'un alvéole HA » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Le conteneur des colis de stockage de type AVM, plus mince (de l'ordre de 20 mm d'épaisseur) confère une perte d'étanchéité plus précoce, de l'ordre de 500 ans *a minima*.

À plus long terme, les composants métalliques (chemisage, conteneur de stockage, conteneur primaire) se corrodent intégralement. Les déchets vitrifiés sont entièrement chargés par le Callovo-Oxfordien *via* une interface constituée du matériau de remplissage et des produits de corrosion. La réactivation des déformations du Callovo-Oxfordien avec le collapse généralisé de l'alvéole conduit à un comblement des vides résiduels, une compaction des composants et une fermeture des fissures résiduelles de la zone endommagée de l'alvéole jusqu'au retour vers un état d'équilibre mécanique.

[51] Dans le cas des alvéoles HA avec un espace intercalaire entre colis, un chargement mécanique axial peut apparaitre en cas de flambement localisé au droit des vides de part et d'autre des colis. Cette composante axiale additionnelle n'est cependant pas de nature à générer une augmentation significative des déformations plastiques (sauf au niveau des zones de contact où un matage des surfaces concernées peut apparaitre, mais il s'agit alors d'un endommagement très superficiel qui ne se propage pas dans l'épaisseur du conteneur).

Le stockage crée une perturbation mécanique dans les argilites en champ proche du stockage, d'abord lors du creusement des ouvrages et enfin en phase de post-fermeture en raison de l'évolution mécanique interne des ouvrages liés en particulier au chargement mécanique du Callovo-Oxfordien et, à plus long terme, du fait des processus chimiques (notamment celle des bétons). L'extension de la perturbation mécanique dans les argilites est d'ordre plurimétrique au maximum et des conséquences sur la perméabilité du Callovo-Oxfordien en champ proche s'estompent très rapidement par cicatrisation hydraulique et auto-colmatage.

Dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien, quel que soit le type d'ouvrage, la zone endommagée initiale (définie comme celle générée lors de l'excavation) est caractérisée aujourd'hui depuis la paroi des ouvrages par :

- une zone fracturée « connectée », formée par un réseau 3D dense de fractures interconnectées. Dans cette zone coexistent deux familles de fractures, les fractures en extension et les fractures en cisaillement. L'ensemble forme un réseau dense de fractures plus ou moins bien connecté avec la galerie, c'est-à-dire à pression atmosphérique après le creusement :
  - ✓ pour les galeries orientées selon la contrainte horizontale mineure (N65°E), l'extension de cette zone à fractures mixtes est de 0,2 rayon latéralement à la galerie, 0,4 rayon sous la galerie et 0,3 rayon au-dessus de la galerie ;
  - ✓ pour les galeries orientées selon la contrainte horizontale majeure, l'extension de cette zone à fractures mixtes est de 0,3 rayon latéralement à la galerie, 0,2 rayon au-dessus de la galerie et non mesurable au radier.

  L'ouverture géométrique de ces fractures varie beaucoup et peut atteindre plusieurs millimètres. De ce fait, les mesures de perméabilités à l'eau réalisées dans ce milieu fracturé ne sont pas représentatives d'un milieu poreux équivalent, mais sont liées à la transmissivité des fractures connectées à la chambre de mesure. Des tests effectués sur des échantillons fracturés montrent que lorsque la saturation est totale les perméabilités mesurées sont significativement moins élevées. Les mesures sur échantillons pris entre les fractures montrent des perméabilités inférieures à 10^{-12} m.s^{-1}. Par conséquent, la zone fracturée connectée est jugée enveloppe pour l'EDZ, définie conventionnellement comme la zone d'argilites autour des ouvrages avec une perméabilité supérieure à 10^{-10} m.s^{-1} ;
- une zone fracturée « discrète » formée par des fractures peu ou pas connectées et orientées globalement parallèlement à la paroi. Au-delà de la zone fracturée connectée, subsistent uniquement des fractures en cisaillement, principalement « la pointe des chevrons ». Dans cette zone, les fractures en cisaillement ne jouent pas de rôle hydraulique. L'extension de la zone perturbée, de perméabilité supérieure ou égale à 10^{-12} m.s^{-1}, est égale au rayon de la galerie, au-delà de la zone fracturée connectée. Par conséquent, la zone fracturée « discrète » peut donc être considérée comme la zone perturbée, définie conventionnellement comme la zone d'argilites ayant une perméabilité comprise entre 10^{-10} m.s^{-1}et 10^{-12} m.s^{-1} :
  - ✓ pour les galeries orientées selon la contrainte horizontale mineure (N65°E), l'extension de cette zone est de l'ordre 0,2 rayon en parement. Au-dessus de la galerie, elle se développe jusqu'à 0,7 rayon. Sous la galerie, son extension est de 1 rayon ;
  - ✓ pour les galeries orientées selon la contrainte horizontale majeure (N155°E), l'extension de cette zone est de l'ordre 1 rayon en parement. Au-dessus de la galerie, elle se développe jusqu'à 0,2 rayon. Sous la galerie, son extension non mesurable.

L'ensemble des données expérimentales (CDZ…) souligne les capacités d'auto-colmatage par gonflement des minéraux smectiques et de fermeture mécanique (même sous des contraintes de compression faibles, de l'ordre de 1 MPa) des argilites endommagées. Ces mécanismes sont mis en jeu très rapidement et conduisent à une récupération d'une perméabilité à l'eau très faible jusqu'à celle des argilites faibles. En particulier, la perméabilité de l'EDZ redescend *a minima* à 10^{-9} m/s et les perméabilités de la zone intermédiaire rejoignent celles des argilites saines. Enfin, cette récupération d'une faible perméabilité est définitivement acquise, même après un cycle de chargement/déchargement mécanique :

- au regard de l'évolution mécanique attendue des ouvrages du stockage (en particulier l'absence d'effondrement), on considère donc sur le plan hydraulique (i) l'absence de zone endommagée autour d'ouvrages tels que les scellements (*e.g.* Argilites saines), et (ii) l'absence d'une augmentation de la perméabilité de l'EDZ au-dessus de 10^{-9} $m.s^{-1}$ pour les autres ouvrages ;
- dans l'USC, les progrès de connaissances sur la zone endommagée consolident (peu d'endommagement lors du creusement) avec une légère microfissuration signe d'une zone perturbée mais l'absence d'EDZ ;
- des surpressions interstitielles liées à la charge thermique dans la couche du Callovo-Oxfordien au droit du stockage relativement élevées (jusqu'à 7,5 MPa) et homogènes dans toute la couche du Callovo-Oxfordien ;
- une déformation verticale au plus de l'ordre de 0,1 % du Callovo-Oxfordien au droit de la zone de stockage des déchets HA, et ainsi un soulèvement des couches sus-jacentes. Le soulèvement de la surface topographique atteint un maximum de l'ordre de 20 cm plusieurs siècles après la mise en place des colis et reste pluri-centimétrique durant au moins 10 000 ans.

3.4.3 Les ouvrages de fermetures

3.4.3.1 Les remblais

Après blocage des interfaces compressibles (matériau de bourrage en extrados des voussoirs, interface béton/roche, zone fracturée…), la convergence progressive des argilites entraine une augmentation des contraintes appliquées sur les revêtements conduisant à sa rupture. La rupture du revêtement est estimée de quelques centaines à quelques milliers d'années en fonction de l'orientation de l'ouvrage (selon la contrainte mineure ou majeure), de la date de pose du revêtement (à l'avancement dans le cas de galeries revêtues de voussoirs) et (de manière différée pour les galeries avec béton coulé en place) de la présence ou non d'un matériau compressible.

Sous l'effet de ce chargement et de la dégradation progressive des propriétés mécaniques du béton (qui reste limitée à ces échelles de temps), la rupture localisée intervient principalement au piédroit du revêtement/soutènement et s'initie suivant des fractures ou bande de localisations qui délimitent dans un premier temps des grands blocs comme le soulignent les simulations.

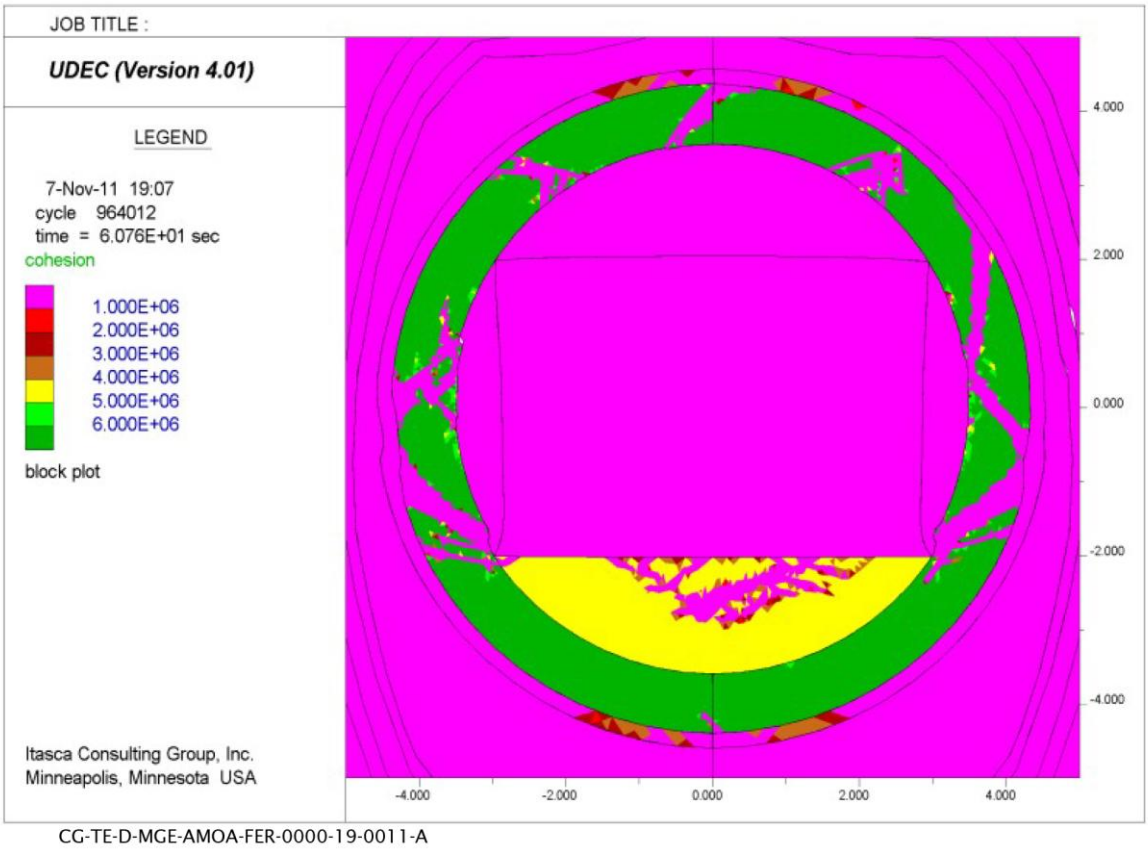


Figure 3-24 *Bandes de cisaillement à 20 000 ans pour un revêtement posé à t0 + 6 mois : calculs 2D – galerie courante alignée à la contrainte principale majeure*

La rupture du revêtement/soutènement entraine localement un poinçonnement du remblai qui, au regard de ses caractéristiques - notamment son module d'Young, sa densité, sa composition (avec l'ajout si besoin de bentonite en partie apicale) et les méthodes de mise en place (limitant ce même vide apical ou l'injection des réservations dans le radier) - limite fortement les effets de tassement (au maximum d'ordre décimétrique et, par voie de conséquence, empêche ou limite très fortement la décharge du milieu géologique, notamment en champ proche au niveau de la zone fracturée lors du creusement. La cinétique de déformation différée des argilites étant faible ($<10^{-11}$ s^{-1}), il en résulte une lente évolution (*e.g.* Quasi statique) des galeries, notamment des déformations de la zone endommagée (cf. La note conceptuelle « L'évolution phénoménologique des scellements de Cigéo (après fermeture) » (23)).

Comparativement à la création de la zone de fracturation initiale induite essentiellement lors de l'excavation, la nouvelle décharge issue de la rupture du revêtement/soutènement ne devrait pas induire d'extension significative de la zone fracturée. La rupture est progressive, par blocs, avec des déplacements limités du fait de la présence du remblai et d'un taux de vide très réduit au sein de l'ouvrage remblayé. Il n'y a pas d'extension spatiale significative de la zone de fracturation (les propagations de fractures si elles existent sont très limitées).

Sur le long terme (quelques centaines de milliers d'années), des réajustements localisés et limités internes à l'ouvrage (rupture locale, foisonnement, comblement des vides par fluage) se poursuivent jusqu'à atteindre progressivement un équilibre. Les déformations au sein de l'ouvrage deviennent très faibles et s'accompagnent d'une diminution du déviateur de contraintes, d'une diminution des déformations (ralentissement du fluage) et d'une augmentation de la contrainte moyenne. Les fractures de la zone endommagée se ferment progressivement sous l'effet de l'ensemble de ces mécanismes et de la resaturation. Le chargement de l'ensemble des composants de l'ouvrage par le milieu géologique contribue à augmenter leur rigidité et leur densité. Progressivement, l'ouvrage est mécaniquement intégré au milieu géologique. Le déviateur de contraintes s'annule et l'état initial des contraintes lithostatiques du milieu géologique est rétabli.

3.4.3.2 Les scellements

La réduction du rôle potentiel de drain hydraulique support à la migration des radionucléides par la zone endommagée générée en champ proche des excavations conduit à retenir des scellements pour « fermer » hydrauliquement le stockage. Les performances hydrauliques requises des scellements sont[52] [53]: (i) une perméabilité en grand de 10^{-9} m/s pour les scellements de fond et (ii) une perméabilité en grand de 10^{-11} m/s pour les scellements des liaisons surface-fond. L'atteinte de ces performances repose sur des principes fondamentaux de conception décrits dans le chapitre 1.4.4.3 du présent volume.

L'évolution mécanique des scellements s'inscrit dans le cadre d'une évolution hydraulique spécifique à ce type d'ouvrages qui est qualitativement identique à celle affectant le reste du stockage, mais quantitativement sujet à des temps caractéristiques différents en lien avec les caractéristiques diphasiques des argiles gonflantes (en particulier leur courbe de rétention très élevée) et la conception passante au gaz du noyau.

Ainsi, si la production de gaz dans le stockage conduit à un temps de resaturation du stockage de l'ordre de quelques centaines de milliers d'années, les propriétés de rétention très élevées des argiles gonflantes conduisent à des durées de resaturation beaucoup plus rapides (de l'ordre du millier d'années pour les scellements de fond et de l'ordre de quelques dizaines à centaines d'années pour les scellements des liaisons surface-fond alimentés par les horizons poreux de l'Oxfordien sus-jacent).

Par ailleurs, la dégradation des composants en béton (massif d'appui le cas échéant et le revêtement laissés en place pour les scellements de fond) et la perturbation alcaline sur le noyau et le Callovo-Oxfordien en champ proche renvoient à des processus très lents, se développant sur plusieurs centaines de milliers d'années et localisés aux interfaces entre les composants principalement hors des zones de dépose des revêtements, et n'affectent pas de manière significative la zone de noyau au droit des déposes. Cela est particulièrement le cas pour les scellements des liaisons surface-fond dont seules les extrémités sont au contact de béton. Les évaluations quantitatives, fondées sur les données expérimentales, montrent que du fait de la saturation par des eaux cimentaires, la perturbation alcaline n'affecterait que quelques pourcents des smectites (dissolution) et que sur le très long terme, seule la dizaine de centimètre au plus de noyau au contact du béton serait fortement reminéralisée. Du fait de la très faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, les flux d'eau mis en jeu sont très faibles, de l'ordre de quelques litres d'eau par an au maximum, de sorte que la perturbation alcaline plus particulièrement au niveau de la zone de noyau au droit des déposes de revêtement, sera très faible.

Dans ce contexte, l'évolution mécanique des scellements suit principalement le transitoire hydraulique (cf. La note conceptuelle « L'évolution phénoménologique des scellements de Cigéo (après fermeture) » (23)) :

- lors de la mise en œuvre des scellements, la dépose partielle ou totale du soutènement/revêtement n'entraîne pas d'évolution hydromécanique significative des argilites au droit des portions de béton déposées (évolutions de convergence et de perméabilité limitées), l'essentiel de la décharge hydromécanique des argilites ayant lieu à l'excavation ;
- l'évolution hydromécanique pendant la phase de saturation n'est pas influencée par la présence d'hydrogène ;

[52] Du fait de leur position en sortie du stockage, les scellements des liaisons surface-fond apportent la plus grande contribution à la performance hydraulique en grand du système de stockage en participant à la limitation des flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations encaissantes *via* les liaisons surface-fond. Combinés à une implantation dans l'USC (dont les caractéristiques autorisent une dépose totale du revêtement) et l'implantation verticale (ou inclinée) plus favorable, une performance supérieure est conférée aux scellements des ouvrages de liaison surface-fond.

[53] Ces performances n'excluent pas d'autres combinaisons (longueur ; perméabilité du noyau) correspondant à une performance d'ensemble équivalente. En particulier, le positionnement et la place disponible dans les galeries autorise des ajustements.

- la mise en charge hydromécanique du noyau en bentonite avec la saturation s'organise globalement de manière radiale et centripète (cf. Fiche 6.4 « Les comportements hydromécaniques et au gaz des matériaux à base de bentonite ou d'argilites remaniées » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :
  - ✓ cette mise en charge se fait à volume variable ou quasi-constant en fonction du concept choisi pour le massif d'appui. Dans ce dernier cas, la mise en contrainte radiale progressive des massifs d'appui en béton par les argilites permet de développer des forces de frottement tendant à équilibrer la poussée du noyau par le développement de la pression de gonflement avec la saturation ;
  - ✓ la mise en charge des argilites par la pression de gonflement développée par le noyau contribue à la récupération d'une faible perméabilité de la zone endommagée des argilites ;
  - ✓ compte tenu de la pression de gonflement (*e.g.* Rigidité du noyau), des faibles déviateurs sont ainsi atteints dans les argilites en champ proche, ce qui induit des vitesses de déformations différées des argilites très faibles à nulles : un pseudo équilibre hydromécanique est donc atteint avec la saturation ;
  - ✓ les portions de revêtement/soutènement laissées en place sont mises en charge en traction et cisaillement par le noyau en cours de saturation. Cette traction (ortho-radiale) dépasse la limite en traction du béton, ce qui conduit à la fracturation radiale de ces portions de revêtement/soutènement. Sous l'effet de la pression de gonflement du noyau, les massifs d'appui sont, quant à eux, mis en charge longitudinalement et sont susceptibles de se déplacer plus ou moins (en fonction de leur concept), avant que le système complet (argilites, noyau en bentonite, massifs d'appui) ne s'équilibre. L'augmentation significative éventuelle du volume du noyau se traduit par une diminution de la pression de gonflement dont la valeur reste cependant suffisamment élevée et ne remet ainsi pas en cause la performance du scellement.
- dans le cas de saignées, la mise en charge hydromécanique de la bentonite remplissant les saignées se fait préférentiellement de l'extrémité de la saignée vers le noyau. Au niveau de l'interface avec le noyau, aucune contrainte de cisaillement n'est mise en jeu dans les argilites, par le champ de pression de gonflement différentiel. Il n'y a donc pas de sur-endommagement ;
- au-delà de 100 000 ans, parallèlement aux dégradations chimiques, les scellements continuent à s'équilibrer lentement avec la cinétique de déformations différées lentes des argilites. Les dégradations chimiques périphériques des massifs d'appui en béton et corrélativement la perturbation alcaline sur les argilites au droit de ceux-ci entrainent une modification du frottement compensée par l'accroissement des contraintes radiales. Des déplacements longitudinaux limités de ces derniers peuvent se produire sans pour autant entrainer un effondrement du scellement, notamment de grandes déformations de la zone endommagée susceptibles de ré-augmenter sa perméabilité. Cette dernière reste ainsi hydrauliquement cicatrisée.

4

Le relâchement et le transfert des radionucléides

4.1 Le comportement des colis 106
4.2 Le transfert des radionucléides 111

4.1 Le comportement des colis

4.1.1 Les colis de déchets HA

Les déchets HA sont principalement des déchets vitrifiés (environ 99,5 % des colis de déchets HA). L'essentiel de ces déchets vitrifiés est constitué par les verres R7/T7 produits dans les installations de vitrification de l'Établissement de La Hague depuis 1989. Le comportement de ces déchets vitrifiés a fait l'objet de plus de 30 ans d'études, s'appuyant sur des expérimentations en laboratoire jour et en laboratoire de recherche souterrain, l'étude d'analogues archéologiques et des modélisations, permettant ainsi de disposer d'une bonne connaissance de leur comportement en stockage.

Pour ce qui concerne les autres déchets vitrifiés (verres AVM, UMo…), les processus d'altération en stockage sont qualitativement similaires à ceux décrits par la suite pour les verres R7/T7, avec néanmoins des jeux de paramètres spécifiques (cf. La note conceptuelle « Les modèles de relâchements phénoménologiques des radionucléides des colis de combustibles usés en fonction des conditions d'environnement : synthèse de connaissances » (24)).

L'altération des déchets vitrifiés R7/T7 en stockage, et donc le relâchement des radionucléides qu'ils contiennent, s'effectue selon trois grandes phases consécutives (cf. Fiche 3.7 « Le transfert des radionucléides solubles et gazeux dans le stockage pendant le transitoire hydraulique-gaz » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :

- une période qui s'étend jusqu'à la rupture du conteneur de stockage et du conteneur primaire, durant laquelle la matrice vitreuse évolue en absence d'eau ;
- une période pendant laquelle les jeux au sein des alvéoles HA sont désaturés (cf. Chapitre 3.2 du présent volume) sous l'effet du transitoire hydraulique/gaz conduisant à une altération de la matrice vitreuse par la vapeur d'eau du fait de la forte humidité relative (proche de 100 %) ;
- une période initiée par la resaturation de l'alvéole durant laquelle le verre va s'altérer sous eau liquide ayant percolé au travers de l'argilite, du matériau de remplissage et des produits de corrosion du chemisage et du conteneur de stockage.

4.1.1.1 L'altération des déchets vitrifiés R7/T7 en absence d'eau

Seuls deux phénomènes sont susceptibles d'induire des modifications physico-chimiques de la matrice vitreuse durant cette phase : la cristallisation et l'auto-irradiation (cf. La note conceptuelle « L'évolution chimique des alvéoles HA et du Callovo-Oxfordien en champ proche (après-fermeture) » (14)) :

- en ce qui concerne les verres produits ou à produire sous assurance qualité, les spécifications de production, le domaine de composition du verre, le scénario de refroidissement et la température au sein des verres lors de leur élaboration (inférieure à 510 °C pour le verre R7/T7) garantissent la stabilité de la matrice vitreuse, c'est-à-dire l'absence de cristallisation, et donc le maintien des propriétés de confinement des radionucléides (cf. Le référentiel « Le comportement des déchets vitrifiés (HA et MA-VL) » (25)) ;
- les études menées n'ont pas révélé de modification de la microstructure du verre de type R7/T7 décelable à l'échelle du MEB ou du MET, sous l'effet de l'auto-irradiation alpha, jusqu'à des doses cumulées de 8×10^{18} à $1,5 \times 10^{19}$ désintégrations $\alpha.g^{-1}$, Peuget *et al.,* 2014 (26). Concernant la production d'hélium associée aux désintégrations α, les études ont montré qu'elle n'entraîne aucune conséquence sur le comportement mécanique du verre jusqu'à des teneurs de 8×10^{19} He/g (correspondant à un verre âgé de plusieurs millions d'années). L'irradiation $\beta\gamma$ ne modifie pas significativement la structure des verres RT/T7.

En conclusion, il n'y a pas de modifications notables de la matrice vitreuse durant cette phase.

4.1.1.2 L'altération des déchets vitrifiés R7/T7 en présence de vapeur d'eau

Après rupture du conteneur de stockage, les déchets vitrifiés évoluent dans une atmosphère humide avec une humidité relative élevée (proche de 100 %), une température inférieure à 50 °C pour les verres HA0 et inférieure à 70 °C pour les verres HA1/HA2. Pour des humidités relatives supérieures à 50 %, une fine pellicule d'eau se forme à la surface du verre amorçant ainsi le processus d'hydratation, Ebert *et al.,* 1991 (27). L'absence d'échanges avec le milieu extérieur entraîne une augmentation de la concentration des espèces au sein de cette couche d'eau. La vitesse d'hydratation du verre SON 68 (simulant en inactif le verre R7/T7), pour des humidités relatives comprises entre 95 % et 99,86 % et une température de 90 °C, est de l'ordre de 10^{-2} g.m^{-2}.j^{-1} après une centaine de jours puis décroit pour atteindre environ 2×10^{-3} g.m^{-2}.j^{-1} à environ 500 jours d'hydratation, soit une vitesse très inférieure à la vitesse initiale d'altération du verre mais supérieure à la vitesse résiduelle mesurée en eau pure (1). La vitesse d'hydratation augmente avec l'augmentation de la température et de l'humidité relative.

Lorsqu'un verre préalablement hydraté sous vapeur d'eau est altéré sous eau, les vitesses d'altération observées sont plus importantes que celle classiquement mesurée pour un verre qui n'aurait pas été préalablement hydraté. Ce phénomène traduit une modification de la structure du verre en surface lors de l'hydratation et la probable dissolution des couches qui s'étaient préalablement formées à la surface de l'échantillon lors de son hydratation.

4.1.1.3 L'altération des déchets vitrifiés R7/T7 en présence d'eau liquide

4.1.1.3.1 Les processus d'altération des déchets vitrifiés HA en stockage

L'ensemble des études sur l'altération des déchets vitrifiés a permis de définir une évolution de l'altération du verre sous eau en fonction du temps qui fait aujourd'hui l'objet d'un consensus international (cf. Le référentiel « Le comportement des déchets vitrifiés (HA et MA-VL) » (25)).

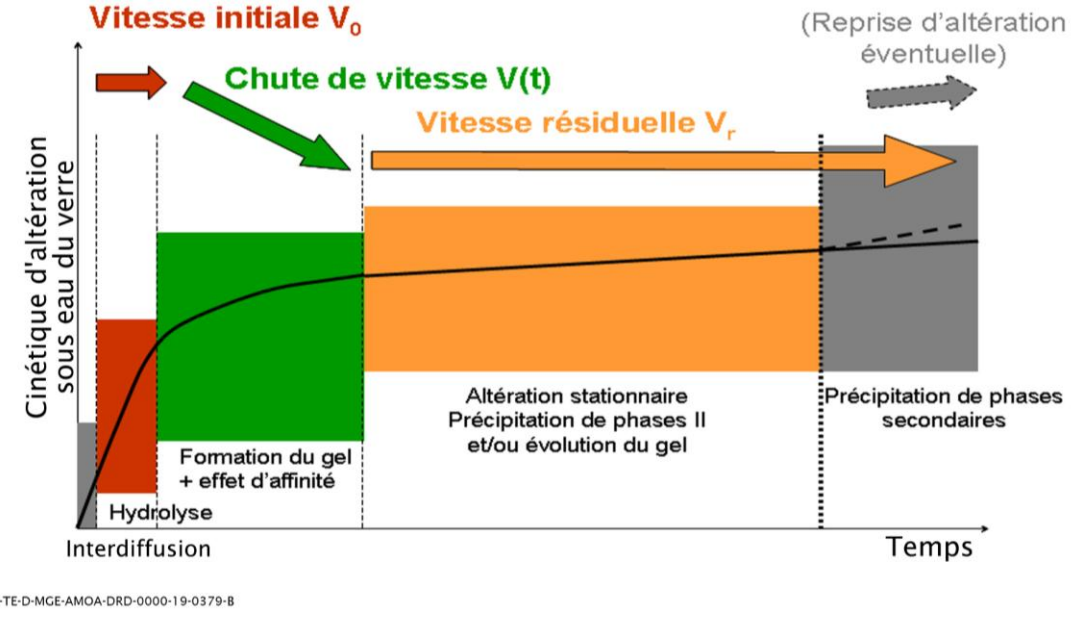


Figure 4-1 *Évolution dans le temps de la quantité de verre altéré associée aux différents régimes de vitesse d'altération*

L'altération sous eau du verre s'effectue suivant trois régimes de vitesses (cf. La note conceptuelle « L'évolution chimique des alvéoles HA et du Callovo-Oxfordien en champ proche (après-fermeture) » (14)) :

- un régime de vitesse initiale principalement piloté par l'hydrolyse du réseau vitreux silicaté. La vitesse initiale d'altération sous eau augmente avec la température et le pH et sa variabilité est faible (environ un facteur 4) dans le domaine de composition des verres R7/T7 spécifié par Orano. En eau argileuse, la vitesse initiale d'altération des verres R7/T7 augmente d'environ un facteur 5 du fait de la concentration en ions alcalins et alcalino-terreux et, dans une moindre mesure, de la force ionique. En présence d'un matériau de remplissage sain dans lequel a percolé l'eau provenant du milieu géologique, la vitesse initiale d'altération du verre à 50 °C est inférieure à celle mesurée dans l'eau du Callovo-Oxfordien. Cet effet bénéfique s'explique par la présence du calcium (pour un pH élevé) et du silicium en solution. En présence d'un matériau de remplissage vieilli, correspondant à un pH proche de 9,2, la vitesse initiale d'altération est du même ordre ;
- un régime transitoire de chute de vitesse résultant de la diminution de l'affinité entre le verre et le milieu environnant et la formation d'une interphase réactive passivante constituant une barrière diffusionnelle entre le verre et le milieu environnant. La durée de ce régime est très faible en l'absence de matériaux d'environnement réactifs. En conditions de stockage, le silicium relâché par l'altération du verre va réagir avec les aciers au carbone du chemisage et du conteneur de stockage à travers deux processus : la sorption sur les produits de corrosion à très court terme puis la coprécipitation avec le fer issu de la corrosion des matériaux métalliques pour former des silicates de fer. Ces deux processus entretiennent la vitesse d'altération du verre en consommant du silicium et retardent ainsi le passage en régime de vitesse résiduelle ;
- un régime de vitesse résiduel résultant d'un équilibre entre d'une part, la limitation de l'affinité réactionnelle et du transport du silicium au sein de la pellicule d'altération du verre, et d'autre part, la précipitation de phases secondaires plus ou moins cristallisées de type phyllosilicates qui entretiennent l'altération du verre en consommant du silicium. La vitesse résiduelle en eau pure est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à la vitesse initiale, elle augmente avec l'augmentation de la température et varie suivant la composition du verre (de l'ordre d'un facteur 10 dans le domaine de composition spécifié par Orano) et la composition de l'eau lixiviant le verre. En particulier, la disponibilité du magnésium en solution peut permettre suivant les conditions de pH (pH >8.3 à 8.4 à 50 °C), de précipiter des phases silicatées magnésiennes conduisant à une augmentation de la vitesse résiduelle.

La reprise d'altération du verre n'a été observée que pour des pH élevés (>10.5) ou des températures élevées (≥90 °C). Ces conditions ne sont pas représentatives des alvéoles HA après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage du fait des faibles débits de dose beta gamma.

4.1.1.3.2 L'influence de l'auto-irradiation sur les différents régimes d'altération des verres R7/T7

Les études de lixiviation sur verres actifs et verres dopés ne montrent pas d'effet de l'auto-irradiation sur le régime de vitesse initiale. Les essais réalisés sur un verre SON 68 dopé au ^{244}Cm montrent une vitesse d'altération environ trois fois plus importante durant le régime de chute de vitesse, conduisant ainsi à un retard du passage en régime de vitesse résiduelle. Cet effet du cumul de dose alpha s'explique par une augmentation d'environ un facteur 10 du coefficient de diffusion au sein de la couche de verre hydraté (cf. Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques (1)).

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 la plus probable est une synergie entre d'une part un fort débit de dose beta gamma et, d'autre part, la lixiviation sous eau du verre. Ce phénomène n'existe pas en stockage puisque l'activité beta-gamma aura fortement diminuée au moment de la rupture du conteneur primaire et de l'arrivée de l'eau au contact du verre (cf. Le référentiel « Le comportement des déchets vitrifiés (HA et MA-VL) » (25)).

4.1.1.3.3 Le taux de fracturation utile associé aux différents régimes d'altération des verres R7/T7

La quantité de verre altéré dépend à la fois de la vitesse d'altération du verre (cf. Chapitre 4.1.1.3.1 du présent volume) et de son taux de fracturation utile.

La fracturation initiale du verre résulte des contraintes engendrées par le gradient thermique auquel sont soumis les verres nucléaires lors de leur production. Le ratio entre la surface totale développée par le verre et sa surface externe (environ 40 pour les verres R7/T7) correspond au taux de fracturation du verre. Les modèles développés montrent (i) que la fracturation est moins importante pour les verres élaborés en creuset froid que pour ceux élaborés en pot de fusion et (ii) que le risque de sur-fracturation en stockage du fait des contraintes lithostatiques peut être écarté.

Lors de la lixiviation sous eau du verre, toutes les surfaces ne vont pas s'altérer à la même vitesse, en fonction de leur accessibilité à l'eau et du régime de vitesse (vitesse initiale ou vitesse résiduelle). La quantité de verre altéré s'exprime ainsi en fonction de la vitesse d'altération et du taux de fracturation utile. En régime de vitesse résiduelle, le taux de fracturation utile du verre R7/T7 est d'environ 40, toutes les fractures étant sollicitées. En régime de vitesse initiale, le taux de fracturation utile est de l'ordre de cinq, toutes les fractures n'étant pas sollicitées.

4.1.1.4 Le relâchement des radionucléides lors de l'altération sous eau des déchets vitrifiés R7/T7

En condition non saturée, le verre s'hydrate mais les radionucléides restent alors au sein de la couche de produits d'altération et ne pourront être relâchés que lorsque de l'eau sous forme liquide arrivera au contact du verre (cf. Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques (1)).

En condition saturée en eau, le relâchement des radionucléides est généralement considéré comme étant congruent à la dissolution du verre même si ce n'est pas le cas pour tous les radionucléides, certains étant sorbés dans les produits d'altération ou dans le gel. En effet, les essais de lixiviation montrent une forte limitation du relâchement des actinides (U, Pu, Am, Cm, Th, Np) et des terres rares du fait d'une adsorption à la surface du gel et/ou d'une coprécipitation. D'autres radionucléides tels que le césium et le nickel sont fortement retenus au sein des phases secondaires qui précipitent à la surface du verre.

Au sein du verre, le sélénium se trouve principalement sous la forme Se(0) et dans une moindre mesure Se(IV). La spéciation sous forme Se(VI) est très minoritaire (3 % sur la base d'études sur des verres simplifiés) (cf. Le référentiel « Le comportement des déchets vitrifiés (HA et MA-VL) » (25)).

4.1.2 Les colis de déchets MA-VL

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 ainsi fonction de la nature des déchets et de la localisation des radionucléides :

- **radionucléides en surface des déchets** (contamination) : le relâchement des radionucléides est très rapide même s'il peut être limité par la solubilité pour certains radionucléides ;
- **radionucléides activés ou implantés au sein de matériaux métalliques** : le relâchement des radionucléides est alors piloté par la corrosion de ces matériaux.

  En milieu aqueux, la corrosion d'un métal résulte d'un processus électrochimique mettant en jeu une réaction d'oxydation du métal libérant des électrons qui sont consommés par une réaction de réduction d'une espèce du milieu aqueux (oxygène dissous en milieu aéré, eau en milieu réducteur). Ce processus d'oxydation s'accompagne de la formation (mais également de la dissolution) d'une couche d'oxyde en surface du métal. Les radionucléides présents initialement au sein de la couche d'oxyde, ou suite à la corrosion du métal, peuvent alors migrer au sein de cette couche et/ou être libérés lors de sa dissolution.

Le relâchement des produits d'activation des déchets métalliques s'appuie sur un modèle de corrosion généralisée considérant les phénomènes suivants :

- ✓ le processus d'oxydation (corrosion) du métal ;
- ✓ la formation/dissolution d'une couche d'oxyde en surface du métal ;
- ✓ la migration éventuelle des radionucléides au sein de cette couche d'oxyde.

La fraction d'inventaire présente dans la couche d'oxyde sera relâchée relativement rapidement pour les pièces en alliages passivables (aciers inoxydables austénitiques, alliages de nickel) qui forment des couches d'oxydes minces (leur épaisseur dépasse rarement le micromètre). Cela sera également le cas pour les alliages qui forment une couche de produits de corrosion peu ou non protectrice en conditions de stockage (*e.g.* Aluminium). En revanche, pour les alliages dont l'oxyde est épais et peu soluble en conditions de stockage, comme c'est le cas des alliages de zirconium, le relâchement des radionucléides sera alors piloté soit par la dissolution de la couche d'oxyde, soit par la migration des radionucléides à travers cette couche. Ces deux mécanismes peuvent coexister et leur importance relative peut dépendre de la nature du radionucléide concerné.

Les vitesses de corrosion des principaux matériaux métalliques pour des conditions représentatives de celles attendues en stockage (milieu alcalin et température comprise entre 20 °C et 50 °C) sont de l'ordre du nanomètre par an (alliages de zirconium, alliages de nickel et aciers inoxydable), de l'ordre de la centaine de nanomètres par an pour les aciers non alliés, et comprises entre quelques dizaines de micromètres par an à quelques millimètres par an pour les alliages d'aluminium et de magnésium en fonction des conditions d'environnement (pH, teneur en chlorures…) (cf. La note conceptuelle « Les modèles de relâchement phénoménologiques des radionucléides des colis de combustibles usés en fonction des conditions d'environnement : synthèse des connaissances » (24)) :

- **radionucléides insolubilisés dans des sels au sein d'une matrice bitume** (déchets bitumés) : le relâchement des radionucléides est alors piloté conjointement par les propriétés de transfert de l'enrobé (reprise d'eau et migration des radionucléides) et par la solubilité des sels.

  La présence d'eau au contact des déchets bitumés conduit au relâchement des sels et des radionucléides suivant le processus décrit sur la figure 4-2 (28). La reprise d'eau est un processus osmotique qui conduit au gonflement des déchets bitumés : elle est d'autant plus importante que la solubilité des sels est élevée et sa cinétique est plus rapide en présence de sels insolubles (par exemple le sulfate de baryum) ;

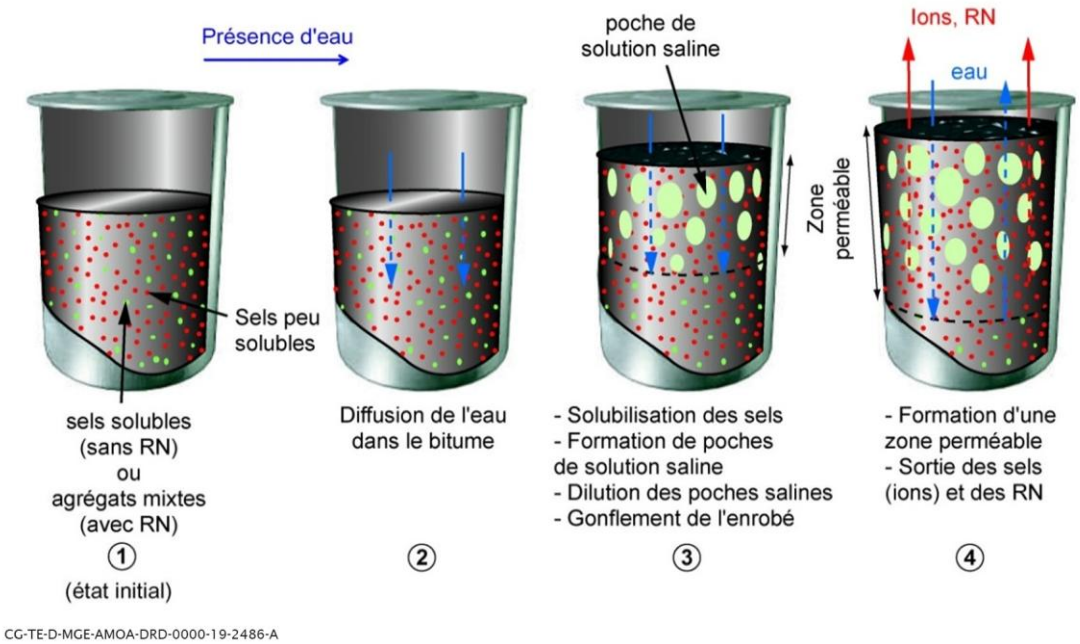


Figure 4-2 *Relâchement des sels et des radionucléides suite à la reprise d'eau des déchets bitumés*

- **radionucléides insolubilisés dans des sels** (hors déchets bitumés) : le relâchement des radionucléides est alors piloté par la solubilité des sels qui les contiennent ;
- **radionucléides localisés au sein d'une matrice cimentaire ou ciment/bitume** : le relâchement des radionucléides est alors piloté par les propriétés de transfert au sein de cette matrice : coefficient de diffusion effectif, rétention, solubilité ;
- **radionucléides activés au sein du graphite** : le relâchement des produits d'activation va être lié à la nature du graphite, à leur localisation, aux conditions d'exploitation en réacteurs et aux conditions de démantèlement ;
- **radionucléides localisés au sein d'une matrice vitreuse** (déchets vitrifiés MA-VL) : le relâchement des radionucléides est piloté par l'altération de la matrice vitreuse suivant les mêmes processus que ceux décrits pour les déchets vitrifiés HA (cf. Chapitre 4.1.1 du présent volume).

Outre ces paramètres intrinsèques aux colis de déchets, le relâchement des radionucléides est également piloté par les conditions d'environnement : transitoire de resaturation, évolution de la chimie au voisinage des déchets, évolution de la température…

4.2 Le transfert des radionucléides

L'acquisition en continu depuis plus de 20 ans de connaissances tirant notamment parti des observations faites au Laboratoire de recherche souterrain sur les mécanismes, processus et données afférentes au transfert de solutés et à leur rétention et de l'amélioration des capacités des outils de simulations numériques (accès à des niveaux de représentation de l'installation souterraine « en grand » et détaillées) permet de quantifier l'organisation spatio-temporelle des flux d'eau et le devenir de radionucléides au sein des ouvrages souterrains et dans le milieu géologique (Callovo-Oxfordien et formations encaissantes). Ces évaluations prennent en compte (i) les conditions hydrogéologiques du site (à l'actuel et sur le prochain million d'années), (ii) les effets des transitoires (thermo-hydro-mécaniques et chimiques), et (iii) des propriétés hydrauliques, de transfert et de rétention des matériaux de l'installation souterraine et du Callovo-Oxfordien (cf. La note conceptuelle « Le transfert des radionucléides » (29)).

4.2.1 Dans les composants ouvragés

4.2.1.1 Pendant les transitoires physico-chimiques

La construction et l'exploitation de l'INB Cigéo, puis son évolution en après-fermeture initient trois grands transitoires dans la vie du stockage en après-fermeture, qui affectent les composants ouvragés et le Callovo-Oxfordien environnant, de manière plus ou moins concomitante :

- le transitoire thermique (et thermo-hydro-mécanique) : d'une durée de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années au maximum ce transitoire affecte les quartiers de stockage HA et le Callovo-Oxfordien environnant au droit des quartiers ;
- le transitoire hydraulique/gaz : d'une durée maximum de plusieurs centaines de milliers d'années, découplé temporellement du transitoire thermo-hydromécanique (THM) dans les argilites, il affecte l'ensemble du stockage ;
- les perturbations chimiques des composants du stockage en interface entre eux, concomitante au transitoire (thermo)-hydraulique-gaz, et les effets associés sur les conditions de transfert des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien. Cela concerne :
  - ✓ de manière générale pour tous les composants cimentaires, la perturbation alcaline issue de leur dégradation. Ces processus se développent sur plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années, avec des extensions qui sont limitées au stockage et au champ proche (quelques mètres au maximum) ;
  - ✓ plus spécifiquement, en lien avec les caractéristiques des déchets :
    - la perturbation organique issue de la dégradation des composés organiques de certains déchets ;
    - la perturbation saline autour des alvéoles MA-VL contenant des déchets salins.

4.2.1.1.1 Dans les quartiers de stockage HA, un transitoire thermique et thermo-hydromécanique d'intensité limitée par conception et non influent sur le transfert des radionucléides en solution dans le Callovo-Oxfordien

Le transitoire thermique et thermo-hydromécanique (THM) n'affecte que très peu le relâchement et le transfert des radionucléides en solution : en effet, (i) son occurrence et son paroxysme sont bien plus précoces que le début de mise en solution des radionucléides issus des colis HA, (ii) sa durée (quelques milliers d'années) est très inférieure au temps de transfert dans le système de stockage (quelques centaines de milliers d'années), et d'intensité limitée (modification des paramètres hydro-dispersifs au plus d'un facteur 2), ne conduisent pas à modifier les conditions de transfert et de flux de solutés en sortie de Callovo-Oxfordien, quelle que soit la voie de transfert.

En effet :

- les paroxysmes de température (de l'ordre de 50 °C dans les alvéoles du quartier pilote HA, 70 °C à 80 °C dans l'alvéole du quartier de stockage HA et en champ proche des argilites + gradients de l'ordre de 20 °C.m^{-1}) et de pression d'eau (de l'ordre de 12 MPa au maximum + gradients de l'ordre de 0,1 MPa.m^{-1}) interviennent bien avant le relâchement et la mise en solution des radionucléides issus des colis de déchets HA (*a minima* de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années). Les paroxysmes passés, s'ensuit une phase de décroissance de la température s'accompagnant d'une diminution des gradients thermiques (en lien avec l'homogénéisation du champ thermique à des niveaux inférieurs et décroissant avec le temps) jusqu'au retour aux conditions de température naturelles dans les couches géologiques ;
- les températures et surpressions lors du relâchement des radionucléides sont globalement homogènes, respectivement de l'ordre de 40 °C (gradients thermiques de l'ordre de 2 °C.m^{-1}) et de l'ordre de 5 MPa à 6 MPa (gradients hydrauliques de l'ordre de 0,001 MPa.m^{-1}). L'augmentation (espace/temps) du coefficient de diffusion et de la perméabilité à l'eau (influence sur la viscosité) dans les argilites est limitée à au plus d'un facteur deux pendant quelques milliers d'années. Les effets de thermo-diffusion (effet Soret) et de thermoconvection sont négligeables, et les très faibles gradients de pression d'eau d'origine thermique au moment du relâchement ne modifient pas l'organisation et l'intensité des voies de transfert des radionucléides.

4.2.1.1.2 Dans l'ensemble du stockage, une resaturation lente des ouvrages qui limite encore plus le transfert des radionucléides en solution dans les composants ouvragés par rapport à une situation supposée saturée et à l'équilibre hydraulique

Les principaux effets du transitoire (thermo)-hydraulique-gaz sur l'organisation des écoulements et du transfert de solutés dans le système de stockage sont les suivantes (cf. La note conceptuelle « Le transfert des radionucléides » (29)) » :

- des mouvements d'eau radiaux et centripètes, de faible intensité, et ne s'opposant pas au transfert diffusif depuis les ouvrages vers le Callovo-Oxfordien, y compris dans l'alvéole MA-VL ;
- des faibles vitesses horizontales d'écoulement, de l'ordre du 1/100^{e} de mm.an^{-1} dans tous les quartiers de stockage et du 1/10^{e} de mm.an^{-1} en sortie de zone, favorisant ainsi les échanges de solutés avec le Callovo-Oxfordien ;
- des temps de transfert convectif dans les galeries (depuis les alvéoles, quels qu'ils soient, jusqu'aux liaisons surface-fond) supérieurs au million d'années, conduisant à une atténuation du maximum du flux de solutés sur 500 mètres de galeries d'un facteur 1 000 ;
- dans les quartiers de stockage HA, au moment du relâchement des solutés (vers 4 000 ans après fermeture), un « effet piston » (eau poussée par le gaz) des solutés négligeable (extension longitudinale pluridécamétriques très inférieure au linéaire de galerie, et durée de 10 000 ans très inférieure au temps de transfert dans les ouvrages) ;

- de forts gradients initiaux de pression d'eau entre l'alvéole HA et la galerie (en cours de resaturation), mais qui s'estompent très vite, ce qui fait que lors de la mise en solution des radionucléides, les gradients de pression d'eau sont négligeables. En parallèle, des conditions de transfert non saturées au niveau de la tête d'alvéole HA (faibles perméabilités) induisent au final des temps de transfert de l'ordre de plusieurs milliers d'années vers la galerie (similaires à ceux considérant un état saturé dès l'instant initial) (cf. Figure 4-3) ;
- dans l'alvéole MA-VL, et jusqu'à environ 300 000 ans (jeux non saturés), une voie de transfert en solution limitée vers le bas de l'alvéole à travers les colis de stockage non saturés en eau, limitant ainsi le transfert de solutés vers la galerie (flux de solutés arrivant dans la galerie inférieure d'un ordre de grandeur à celui considérant des conditions hydrauliques saturées dès la fermeture du stockage et retardé d'environ 100 000 ans) (cf. Figure 4-4).

Finalement, le maximum de flux de radionucléides en solution sortant des liaisons surface-fond, en considérant explicitement le transitoire hydraulique-gaz, est très faible, de plusieurs ordres de grandeur inférieur à celui sortant par la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien (cf. Figure 4-5).

Une comparaison avec des conditions hydrauliques saturées dès la fermeture du stockage (habituellement retenues dans le cadre du traitement des scénarios de sûreté) montre que le flux de solutés en sortie des liaisons surface-fond en conditions non saturées est deux à trois fois plus faible (et décalé de 300 000 ans) par rapport à une situation considérant un état saturé dès la fermeture du stockage (cf. Figure 4-5). Cette faible différence est due à des temps de transfert dans les ouvrages de l'ordre du million d'années *a minima* supérieurs à la durée du transitoire hydraulique gaz.

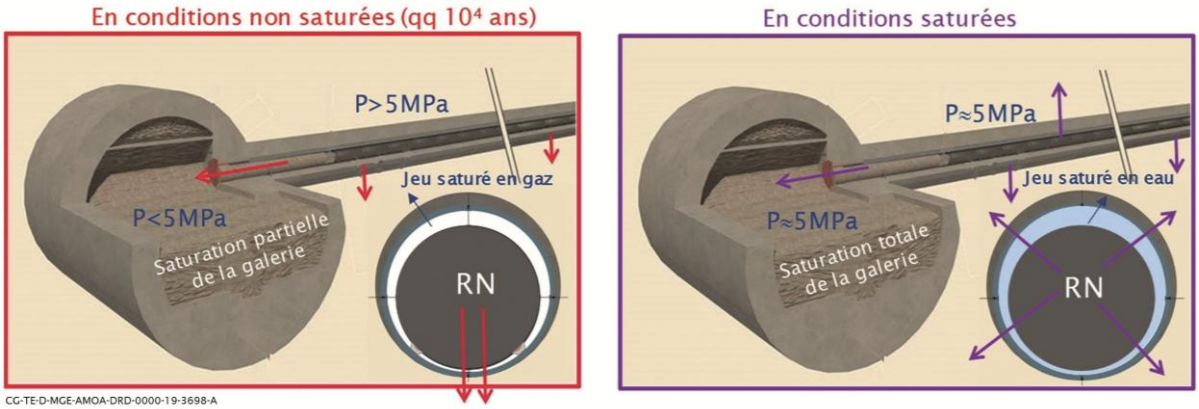


Figure 4-3 *Organisation des voies de transfert des radionucléides au sein de l'alvéole stockage HA pendant le transitoire hydraulique/gaz, et comparaison avec l'état tout saturé*

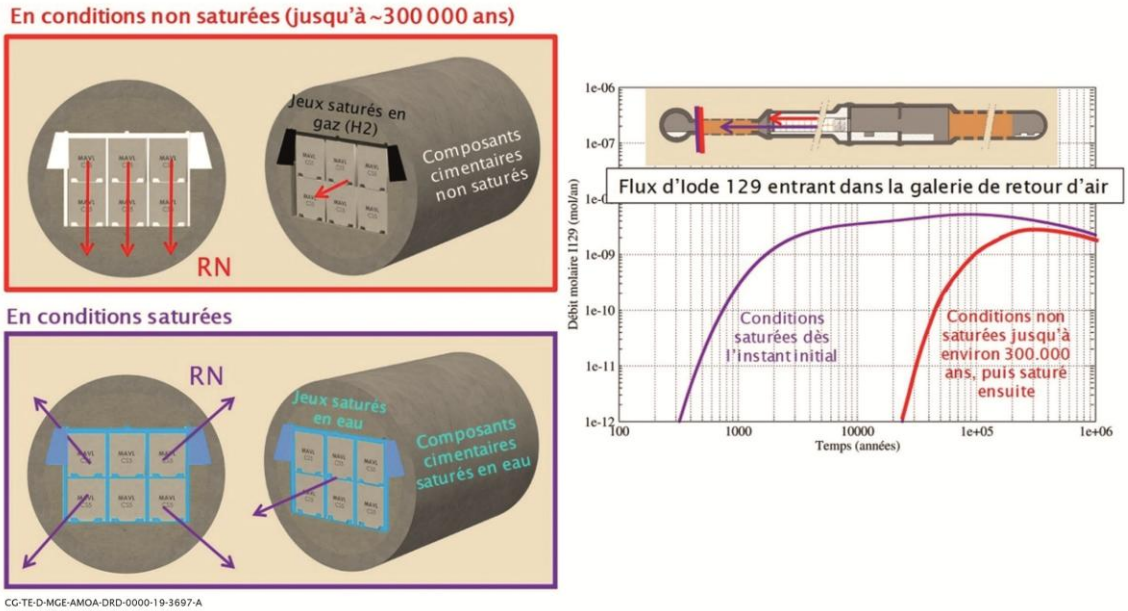


Figure 4-4 *Organisation des voies de transfert des radionucléides au sein de l'alvéole MA-VL pendant le transitoire hydraulique/gaz, et comparaison avec l'état tout saturé dès la fermeture du stockage*

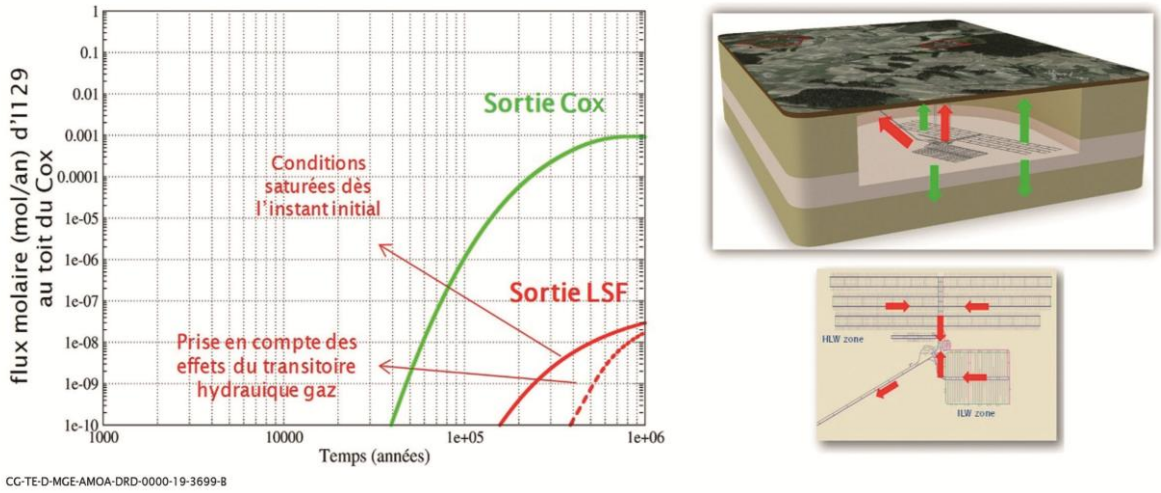


Figure 4-5 *Comparaison des voies de transfert « stockage » (avec et sans prise en compte du transitoire de resaturation) et du Callovo-Oxfordien*

4.2.1.1.3 Le cas particulier des radionucléides gazeux au cours du transitoire hydraulique-gaz

La production d'hydrogène dans l'installation souterraine implique la mise en place d'une phase gaz continue à l'échelle du stockage et une montée en pression[54] de ces gaz (principalement de l'hydrogène produit par corrosion anoxique des métaux présents dans l'installation souterraine tel que décrit dans le chapitre 3.2 du présent volume). Certains radionucléides ayant une solubilité faible peuvent ainsi s'exprimer (partiellement) sous forme gazeuse et migrer sous cette forme le long des ouvrages par la voie gazeuse.

Cependant la durée du transfert gazeux depuis les alvéoles (quelle que soit la zone de stockage) vers les liaisons surface-fond est de l'ordre de quelques centaines à quelques milliers d'années. Compte tenu de ces temps de transfert au regard des radionucléides gazeux, seul le carbone 14 (^{14}C), produit à plus de 99 % dans la zone MA-VL, est susceptible de s'exprimer jusqu'aux liaisons surface-fond.

Au cours du transfert le long des galeries, le ^{14}C gazeux se dissout partiellement dans les eaux environnantes. Ainsi, par combinaison de la décroissance radioactive et de la solubilité, seuls quelques pourcents de la quantité de ^{14}C présent dans l'installation souterraine parviennent aux liaisons surface-fond sous forme gazeuse. Par ailleurs, une fois dans l'Oxfordien, la totalité du ^{14}C se dissout rapidement du fait d'une capacité de dilution plus importante.

De plus, le ^{14}C dissout dans les eaux du Callovo-Oxfordien, soit directement au droit des alvéoles de stockage, soit le long du transfert dans les galeries vers les accès, migre lentement par diffusion en phase dissoute vers les encaissants du Callovo-Oxfordien qu'il met plusieurs centaines de milliers d'années à rejoindre : à ces dates, la totalité du ^{14}C à disparu par décroissance radioactive (cf. La note conceptuelle « Le transitoire hydraulique-gaz et le devenir des radionucléides gazeux (après-fermeture) » (12)) (cf. Figure 4-6).

[54] Limité par conception au regard du caractère passant au gaz des ouvrages de fermeture tel que décrit dans le chapitre 1.4.4.6 du présent volume.

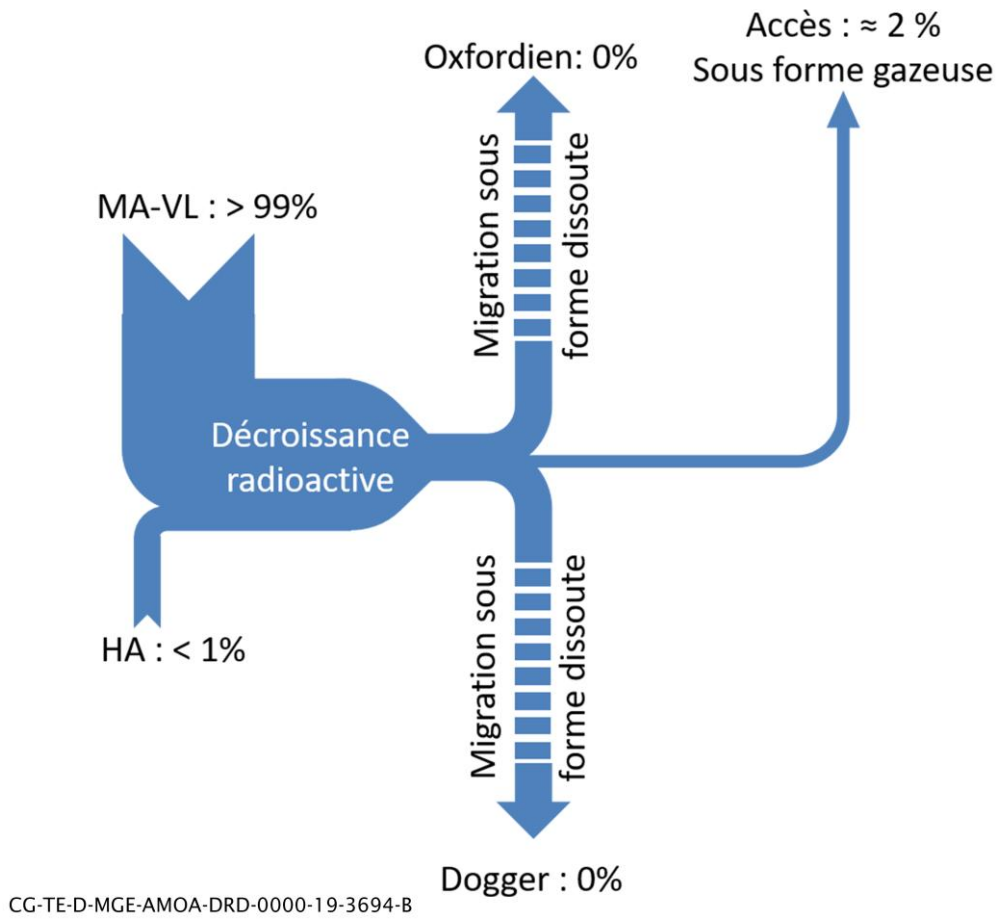


Figure 4-6 *Représentation schématique de la fraction massique de ^{14}C ayant transité vers les différentes voies de transfert possibles que sont le Dogger et l'Oxfordien, notamment via les puits/descenderies (résultats avec une spéciation du ^{14}C sous forme de $^{14}CO2$)*

Au total la quantité stockée est de l'ordre de la dizaine de milliers de moles ; ainsi, seules quelques centaines de moles de ^{14}C arrivent sous forme gazeuse dans l'Oxfordien au cours des premiers milliers d'années après fermeture et s'y dissolvent immédiatement.

4.2.1.1.4 Des perturbations chimiques d'intensité et d'extension limitées, peu influentes sur le transfert des radionucléides dans les ouvrages souterrains et le Callovo-Oxfordien

À l'exception des perturbations salines et organiques, la plupart des perturbations chimiques n'ont pas d'influence sur la migration des radionucléides à travers le Callovo-Oxfordien ou les ouvrages.

Les principaux effets du transitoire chimique sur l'organisation des écoulements et du transfert de solutés dans l'installation souterraine concernent :

- la perturbation organique (issue des déchets MA-VL contenant des espèces organiques possédant des propriétés complexantes) conduit à altérer, pendant quelques dizaines de milliers d'années, la rétention des solutés dans l'alvéole et sur des épaisseurs d'argilites d'au maximum 10 mètres pour l'ISA (l'extension est nulle pour les phtalates, notamment du fait d'un seuil d'effet de la complexation d'un ordre de grandeur plus élevé que celui de l'ISA). La prise en compte des modifications de Kd sur les zones de complexation (espace/temps) limitées ne conduit pas à modifier le comportement global des radionucléides sorbés « en grand » (stockage et Callovo-Oxfordien) ;
- la perturbation saline (issue des déchets MA-VL riches en nitrates et sulfates) ; elle conduit, dans les alvéoles et en champ proche, à un effet hygroscopique (resaturation plus rapide des colis) et osmotique, limité à quelques centaines d'années. Le seuil d'effet de la force ionique (0,2 $mol.L^{-1}$), conduisant à augmenter la diffusion des anions, n'est atteint que sur une extension d'argilites d'au plus quelques mètres, et sur une durée inférieure à 10 000 ans. Finalement, et au regard des temps de transfert de quelques centaines de milliers d'années la perturbation saline influe très peu sur le transfert des radionucléides (alvéole et Callovo-Oxfordien), avec des flux de solutés inchangés en sortie de Callovo-Oxfordien ;
- la perturbation alcaline dans le Callovo-Oxfordien (issue des alvéoles MA-VL et des revêtements/soutènements de galeries) ; elle est assimilée au développement de deux zones : l'une « reminéralisée » avec modification importante des caractéristiques minéralogiques et géochimiques des argilites, et l'autre correspondant à une zone affectée par un panache alcalin peu ou non reminéralisée mais avec un pH de la solution interstitielle élevé (pH~10) et une modification de la population de cations en position échangeable dans les feuillets des minéraux argileux. Quelle que soit la nature du matériau cimentaire, et en considérant comme critère (enveloppe) d'extension de la perturbation, la dissolution totale de la smectite, l'extension de la perturbation alcaline est de l'ordre de 50 cm à 100 000 ans et 1 mètre à 1 million d'années. Au regard de ces faibles extensions, très inférieures à la garde de Callovo-Oxfordien, et des modifications de Kd associées, la perturbation alcaline est négligeable sur le transfert des solutés à l'échelle de l'installation souterraine et du Callovo-Oxfordien.

4.2.1.2 Après resaturation retour à l'équilibre hydraulique

En lien avec des écoulements très faibles au sein des composants ouvragés, les conditions de transfert des radionucléides sont diffusives dans tous les ouvrages du stockage, y compris les alvéoles de stockage MA-VL. Seuls les radionucléides mobiles (^{129}I, ^{36}Cl et ^{79}Se) migrent dans le stockage hors des quartiers, depuis les alvéoles vers les puits et descenderies, et ce par diffusion dominante. Tous les autres radionucléides sont sorbés dans les composants ouvragés et dans le milieu géologique en champ proche des alvéoles. Les maxima de débit molaire des radionucléides mobiles en sortie des liaisons surface-fond sont très inférieurs à ceux relatifs à la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien, notamment au toit de ce dernier : par exemple, le débit molaire total maximum (HA + MA-VL) d'iode 129 pour la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est de plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui de la voie de transfert par le stockage en sortie des liaisons surface-fond (cf. Figure 4-5). En moyenne, pour le quartier de stockage MA-VL, le débit molaire sortant des liaisons surface-fond est atténué d'environ un facteur 2 pour 200 mètres de longueur de galerie supplémentaire, comme cela est indiqué à la figure 4-7, dans des conditions qui maximisent le transfert dans le Callovo-Oxfordien et les ouvrages.

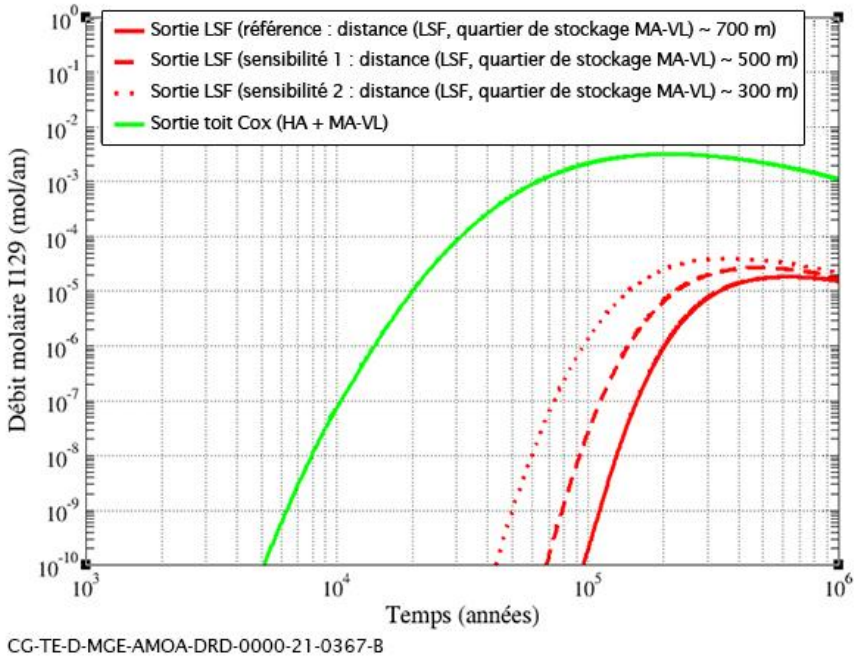


Figure 4-7 *Sensibilité du débit molaire d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à la longueur des galeries de liaison principales MA-VL*

4.2.1.3 Le devenir des espèces fissiles après fermeture

Le risque de criticité est contrôlé lors du stockage par la maîtrise de la quantité de matières fissiles contenues dans les colis primaires associée à des dispositions de conception portant sur l'agencement et la géométrie des colis de stockage. Après-fermeture et sur le long terme, les processus de reconcentration en lien avec la dégradation progressive des ouvrages et la perte d'intégrité des colis, ne sont pas considérés comme plausibles au regard du fait notamment de la (très) faible perméabilité de la formation hôte du Callovo-Oxfordien et de l'absence de « chamboulement » prévisible au regard des transitoires mis en jeu (rupture mécanique, transitoire hydraulique) ou imprévisibles (séisme…). En effet, les mouvements d'eau au sein des alvéoles de stockage sont très faibles : les vitesses d'écoulements au sein des alvéoles sont estimées bien inférieures au mm/s (10^{-3} m/s au maximum de de la resaturation en eau de l'alvéole et de l'ordre de 10^{-11} à 10^{-12} m/s une fois l'alvéole totalement saturée en eau) si bien que la diffusion (phénomène lent) est le mode de transport dominant des solutés :

- à l'inverse d'une reconcentration, la diffusion contribue à une dilution des zones concentrées vers les zones les moins concentrées et à une homogénéisation des concentrations en solutés ;
- d'autre part, selon les lois de comportement des particules en fonction de leur taille et de la vitesse du courant (diagramme de Hjulstrom), les seules particules qui pourraient être entrainées sont celles de taille inférieure au micromètre, soit des colloïdes, particules pour lesquelles les forces de gravité sont généralement secondaires par rapport aux autres forces de déplacement.

Dans le cas particulier des alvéoles MA-VL (type CSDC), la reconcentration localisée de la totalité de la masse de plutonium, en solution ou sous forme solide, n'est pas attendue dans les alvéoles de stockage de stockage :

- le plutonium présente de plus une très faible solubilité dans les conditions alcalines d'un alvéole de stockage MA-VL et la majeure partie du plutonium reste sous forme solide au sein de l'alvéole. Au sein des alvéoles de stockage, la possibilité de former et d'agréger un seul type de colloïdes « de phase pure » d'uranium et/ou de plutonium est fortement limitée par la variété des éléments chimiques présents en solution et la concomitance de colloïdes de natures diverses (particules argileuses, produits de corrosion, colloïdes cimentaires etc.) ;
- les connaissances sur la stabilité du Zircaloy soulignent la forte stabilité de cet alliage (milieu acide et milieu alcalin), avec des cinétiques de corrosion très faibles de l'ordre de 1 à 2 nanomètres par an au maximum (24, 30). Les coques dont l'épaisseur est pluri-millimétrique auront donc une durabilité très grande de la centaine à plusieurs centaines de milliers d'années, garantissant leur présence physique dans l'alvéole de stockage sur ces échelles de temps.

Dans le cas particulier des alvéoles HA, l'absence de reconcentration localisée de la totalité de la masse fissile (notamment en point bas de l'alvéole pentée vers la galerie d'accès) est contrôlée par l'immobilisation de la matière fissile au sein d'un alvéole de stockage, en raison :

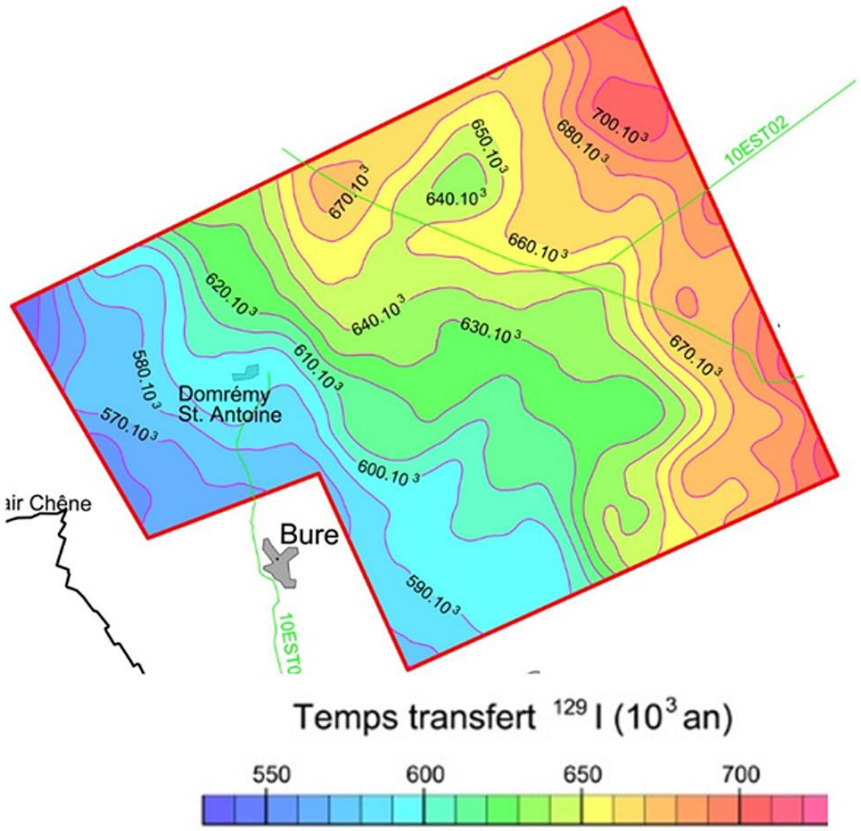
- de la faible solubilité des actinides dans les conditions d'un alvéole ;
- de la lente dissolution des verres ;
- de la rétention des actinides dans la pellicule d'altération du verre ou son « incorporation » dans des phases minérales secondaires issues de la dissolution (25, 31). Les produits de corrosion présentent également des capacités de rétention significatives vis-à-vis des actinides et lanthanides ;
- des faibles vitesses d'écoulements au sein des alvéoles HA (cf. S*upra*) du fait de la faible perméabilité de la formation du Callovo-Oxfordien.

Dans ces conditions, et selon les lois de comportement des particules en fonction de leur taille et de la vitesse du courant, les seules particules qui pourraient être entrainées sont celles de taille inférieure au micromètre, soit des colloïdes, particules pour lesquelles les forces de gravité sont généralement secondaires par rapport aux autres forces de déplacement. Au sein des alvéoles HA, la possibilité de former et d'agréger un seul type de colloïdes « de phase pure » d'uranium et/ou de plutonium est fortement limitée par la variété des éléments chimiques présents en solution et la concomitance de colloïdes de natures diverses (particules argileuses, produits de corrosion etc.).

4.2.2 Dans le Callovo-Oxfordien et les encaissants jusqu'aux exutoires

Les principales caractéristiques relatives au transfert des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien sont les suivantes (cf. La note conceptuelle « Le transfert des radionucléides » (29)) :

- la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et son faible gradient de charge vertical (impliquant des vitesses d'écoulement dans les argilites de quelques cm tous les 100 000 ans) conduisent à un transfert par diffusion dominante dans les gardes supérieures et inférieures du stockage, pour tous les radionucléides ;
- tous les radionucléides, autres que les radionucléides mobiles et à vie longue (^{129}I, ^{36}Cl, ^{79}Se) ou relativement peu mobiles (^{40}K, ^{41}Ca, ^{87}Rb) (cf. Figure 4-9), restent confinés dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien sur le prochain million d'années, soit du fait de leur période, très inférieure au temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien, soit du fait de la sorption dans les argilites qui favorise les échanges entre la galerie et le Callovo-Oxfordien. C'est le cas particulier des actinides, dont les propriétés de rétention conduisent à les immobiliser autour des alvéoles de stockage ; en un million d'années, la distance parcourue par les isotopes de l'uranium est d'environ 10 mètres et de 2 mètres pour le neptunium ;
- toutes les substances toxiques chimiques autres que les mobiles (sélénium, cyanure) (cf. Figure 4-10), restent confinées dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien sur le prochain million d'années, du fait de la sorption dans les argilites qui favorise les échanges entre la galerie et le Callovo-Oxfordien ;
- les temps de transfert par diffusion dans les gardes inférieures et supérieures sont *a minima* de plusieurs centaines de milliers d'années pour les radionucléides mobiles à vie longue pour des paramètres de transfert *best-estimate* dans le Callovo-Oxfordien, de sorte qu'ils permettent de bénéficier d'une décroissance radioactive significative pour la plupart des radionucléides et d'un étalement par diffusion (cf. Figure 4-8). À titre d'exemple, le maximum de débit molaire total (HA+MA-VL) d'iode 129 au toit du Callovo-Oxfordien, 10^{-3} mol.an^{-1}, est atteint à 850 000 ans. À un million d'années, seul 23 % de l'inventaire initial en iode 129 (10,5 % au toit et 12,5 % au mur) a atteint les limites de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 4-9).



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-19-3707-A

Figure 4-8 *Cartographie sur la ZIOS des temps de maximas de débit molaire de radionucléides 1D (en années) par diffusion des radionucléides mobiles (type I129) dans le Callovo-Oxfordien, selon un stockage de 10 mètres d'épaisseur et implanté en milieu de couche*

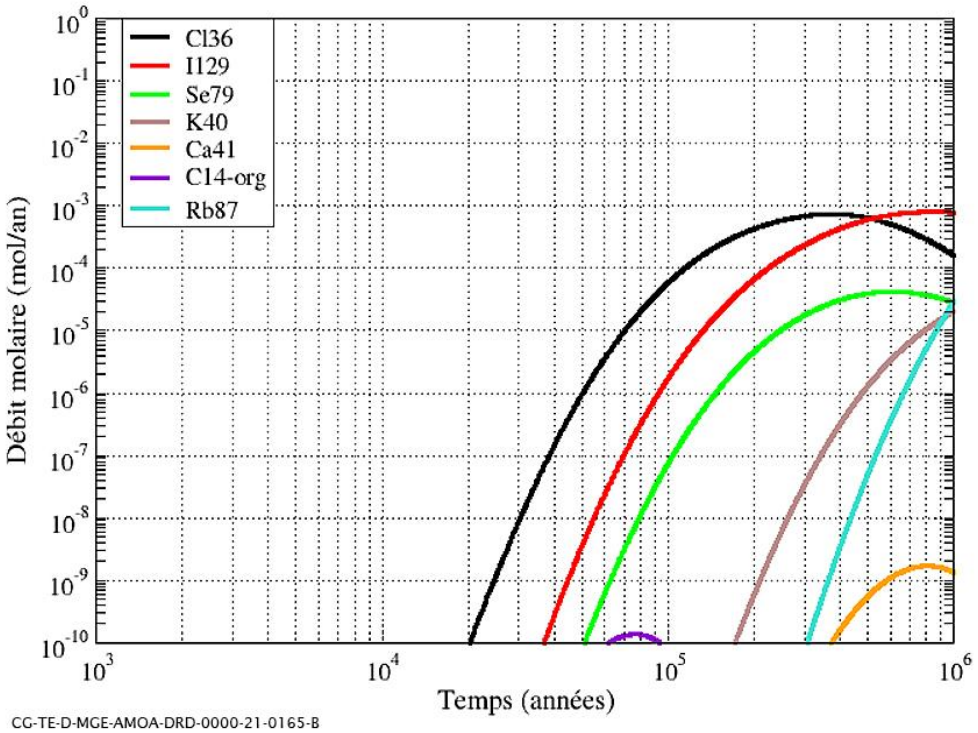


Figure 4-9 *Historiques de débit molaire en radionucléides au toit du Callovo-Oxfordien*

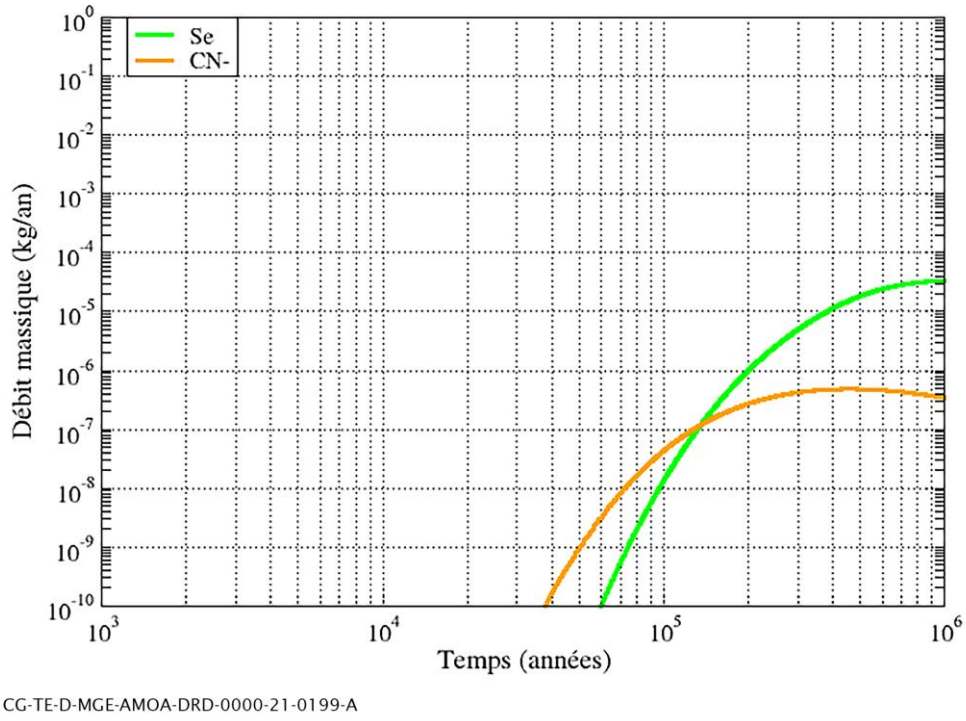


Figure 4-10 *Historiques de débit massique en substances toxiques chimiques au toit du Callovo-Oxfordien*

4.2.3 Dans les encaissants jusqu'aux exutoires

Les solutés (radionucléides, substances toxiques chimiques) ayant atteint les limites du Callovo-Oxfordien migrent ensuite dans les formations encaissantes sus- et sous-jacentes du Callovo-Oxfordien vers les exutoires naturels, et selon les modalités suivantes :

- le transfert horizontal dans les horizons poreux de l'Oxfordien (environ 4 km tous les 100 000 ans, avec une possible rétrodiffusion des solutés vers le Callovo-Oxfordien), ainsi que le transfert dans les séries grises de l'Oxfordien, permettent de bénéficier d'une atténuation supplémentaire du débit molaire des radionucléides; une faible quantité de l'inventaire initial en iode 129 atteint les limites supérieures de l'Oxfordien (0,7 %) et, en y en ajoutant le transfert dans le Kimméridgien, la quantité d'iode 129 atteignant le Barrois n'est que de 0,2 % de l'inventaire total initial ;
- pour le Dogger, les écoulements vers et la zone de fracturation diffuse et les failles de la Marne sont plus rapides (de l'ordre de 10 km tous les 100 000 ans) que dans l'Oxfordien, et les échanges vers les formations sous-jacentes et le Callovo-Oxfordien sont donc plus limités. La quantité d'iode 129 atteignant l'exutoire Dogger (dans la zone de fracturation diffuse et failles de la Marne) est d'environ 2,5 % de l'inventaire initial.

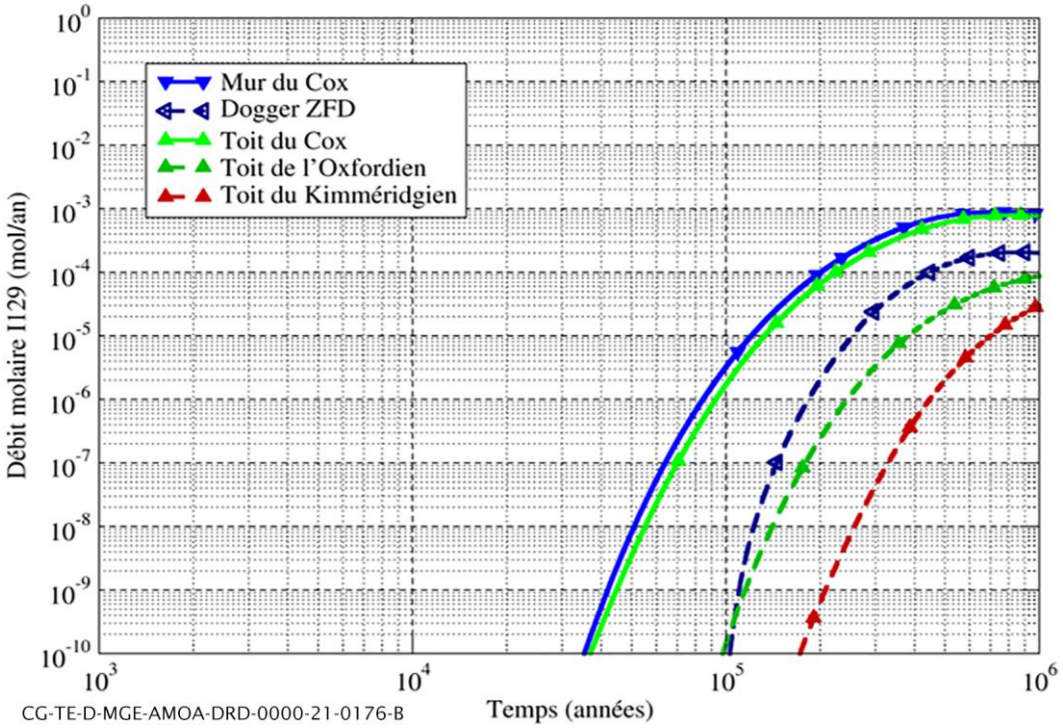


Figure 4-11 *Historiques de débit molaire en iode 129 dans le milieu géologique : toit et mur du Callovo-Oxfordien, toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien, dans le Dogger (dans la zone de fracturation diffuse)*

INFLUENCE DE LA SURPRESSION HYDRAULIQUE NATURELLE SUR LE TRANSFERT DES RADIONUCLÉIDES

Sous l'hypothèse très majorante de considérer que toute la surpression est d'origine hydraulique, pérenne, et qu'elle peut mobiliser le transfert d'eau, il a été quantifié son influence sur le transfert des radionucléides, en reproduisant le profil vertical tel que mesuré au Laboratoire de recherche souterrain. La voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est identique à « celle sans surpression » : le transfert reste en diffusion dominante (Peclet de garde = 0,1), les gradients de charges restent localisés en extrémité de couche de Callovo-Oxfordien et sont sans influence à l'échelle de la couche. En revanche, la voie de transfert par les ouvrages est supérieure d'un facteur 50 à « celle sans surpression », conduisant à un transfert codominant convectif/diffusif dans les ouvrages, mais reste très inférieure à celle par le Callovo-Oxfordien (cf. Figure 4-12).

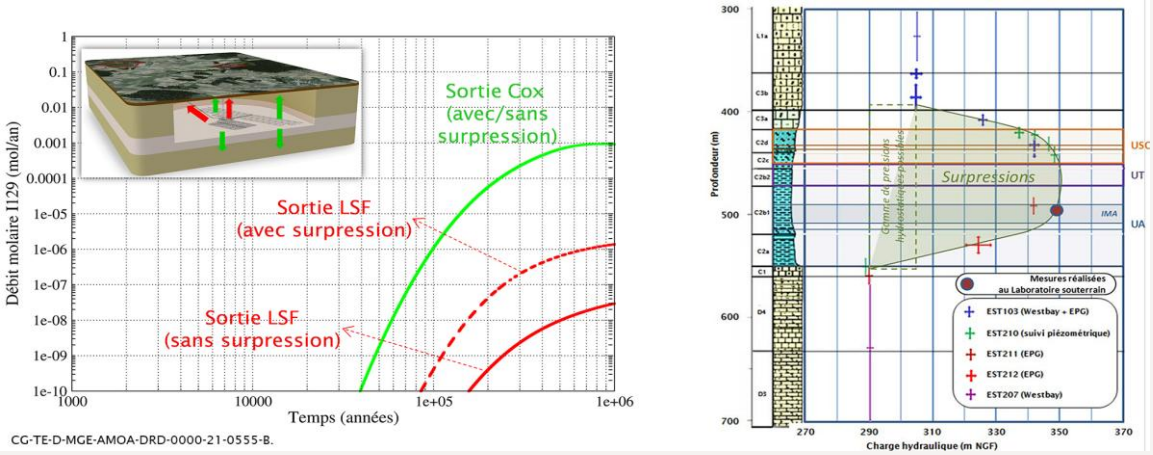


Figure 4-12 *Comparaison des débits molaires en sortie de Callovo-Oxfordien avec et sans considération des effets de la surpression hydraulique*

5

Les incertitudes résiduelles

5.1 Le site 127
5.2 Les grands transitoires 131

Les chapitres précédents ont présenté l'évolution de l'installation souterraine sur le prochain million d'années basée sur les connaissances actuelles. Il s'agit de donner une représentation de l'évolution phénoménologique des différents composants du stockage et du milieu géologique aux différentes échelles de temps et d'espace pertinentes, en incluant les processus qui conditionnent ou contrôlent le relâchement, des radionucléides et des substances toxiques chimiques puis leur comportement une fois relâchés, en particulier leur éventuelle migration hors du stockage vers l'environnement de surface.

Cette évolution résulte notamment des dispositions de conception du stockage, qui tirent parti des caractéristiques favorables du milieu géologique, plus particulièrement de la couche argileuse hôte du Callovo-Oxfordien, et contribuent à limiter la complexité des phénomènes et les incertitudes sur le comportement phénoménologique du stockage, afin de garantir la maîtrise de cette évolution et la robustesse de sa description. Cette description s'appuie sur une approche itérative construite au fur et à mesure que se sont précisées les connaissances, contribuant ainsi à orienter progressivement la conception vers des solutions offrant plus de robustesse. Enfin, la manière de décrire l'évolution de l'installation souterraine et du milieu géologique intègre les incertitudes résiduelles et les variabilités naturelles de toutes natures, ainsi que la réalité industrielle de l'installation souterraine avec prudence afin de préciser les marges de variation possibles de la description de l'évolution phénoménologique.

Ce travail se fonde donc sur l'ensemble des connaissances, par exemple celles acquises directement *in situ*, sur échantillons, les résultats de modélisations et de simulation numérique, ou la transposition de résultats obtenus dans le cadre de programmes étrangers.

La vision de l'évolution phénoménologique du stockage et du milieu géologique environnant ainsi présentée constitue une donnée d'entrée privilégiée de l'analyse de sûreté (cf. Volume 8 du présent rapport), en particulier la vérification que le stockage tel qu'il est conçu et son milieu géologique environnant garantissent le respect des fonctions allouées aux composants du système de stockage (milieu géologique et composants ouvragés), en prenant en compte par prudence des incertitudes résiduelles. Ces incertitudes résiduelles s'entendent en termes d'écart éventuel avec la vision décrite dans les chapitres précédents. Elles sont décrites de manière détaillée dans les fiches bilan du socle de connaissances scientifiques et techniques (1). On se focalisera ci-après sur un ensemble de caractéristiques du site et de processus de l'évolution phénoménologique, à titre d'illustration représentative de l'analyse des incertitudes résiduelles.

5.1 Le site

5.1.1 La perméabilité en grand du Callovo-Oxfordien

De nombreuses mesures de perméabilité ont été réalisées que ce soit sur échantillon, en forage, à partir de forages profonds ou de forages du Laboratoire de recherche souterrain et d'analyse inverse d'expérimentation *in situ*. On peut retenir que la multitude des approches, avec des géométries et des échelles de temps et d'espace investiguées très différentes, converge et fournit une image très cohérente des paramètres hydrogéologiques de l'argilite du Callovo-Oxfordien avec d'une part une bonne caractérisation des valeurs et, d'autre part, une bonne compréhension de leur distribution (cf. Fiche 2.6 « La perméabilité à l'eau du Callovo-Oxfordien en grand » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Compte tenu des incertitudes expérimentales et de la variabilité naturelle locale de la perméabilité, les mesures *in situ* et sur échantillons fournissent une estimation des valeurs locales de la perméabilité horizontale du Callovo-Oxfordien suivant une distribution statistique log-normale dans la gamme 10^{-21}-10^{-19} m^2 et avec une moyenne géométrique de 3×10^{-20} m^2. Le calcul d'une perméabilité verticale du Callovo-Oxfordien en grand à partir de la distribution des perméabilités locales donne une valeur comprise entre la moyenne harmonique et la moyenne géométrique des perméabilités locales.

Les incertitudes résiduelles quant à une faible valeur de la perméabilité (en grand) du Callovo-Oxfordien (*au maximum* de l'ordre de 10^{-13} m/s) à l'échelle de la zone de transposition et donc de la ZIOS, sont considérées comme limitées compte tenu :

- du nombre important de mesures couvrant verticalement et latéralement le Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition et de leur cohérence d'ensemble avec des valeurs des perméabilités d'autres formations argileuses profondes ;
- de la convergence entre les mesures et les indices indépendants (comme l'existence d'une surpression interstitielle dans le Callovo-Oxfordien, cf. *Infra*). Cette faible valeur de perméabilité en grand du Callovo-Oxfordien, *au maximum* de l'ordre de 10^{-13} m/s, est cohérente avec les profils verticaux de traceurs naturels et l'existence d'une surpression interstitielle dans le Callovo-Oxfordien mesurée au niveau du Laboratoire de recherche souterrain.

Dans le domaine d'incertitudes de mesure, on n'observe pas de variation significative de la perméabilité latéralement sur la zone de transposition et verticalement, en particulier suivant les différentes unités litho-stratigraphiques du Callovo-Oxfordien (UA et USC). Les enseignements des mesures au niveau du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne suggèrent une légère tendance à l'augmentation (relative) des perméabilités horizontales vers le cœur de la couche, c'est-à-dire que la perméabilité dans l'unité silto-carbonaté (USC) apparait un peu inférieure à celle de l'unité argileuse (UA). De même, on note une légère anisotropie entre la perméabilité horizontale et la perméabilité verticale, avec un facteur d'anisotropie de l'ordre de trois dans l'unité argileuse (UA). Toutefois, compte tenu du comportement plus déformable et endommageable des argilites de l'UA par rapport aux argilites de l'USC, on ne peut pas exclure un effet de ce comportement sur la mesure de la perméabilité (naturellement, la teneur en minéraux argileux plus importante dans l'UA que dans l'USC ne devrait pas entrainer une perméabilité plus élevée en relatif).

Cela s'entend notamment au regard de l'évaluation des conditions de transport des solutés (radionucléides et substances toxiques chimiques) dans le Callovo-Oxfordien, et plus particulièrement du caractère dominant de la diffusion. Les incertitudes résiduelles sur la perméabilité à l'eau en grand du Callovo-Oxfordien sont donc faibles au regard de l'évaluation des conditions de transport des solutés (radionucléides et substances toxiques chimiques) dans le Callovo-Oxfordien, et plus particulièrement du caractère dominant de la diffusion (cf. Fiche « La perméabilité à l'eau du Callovo-Oxfordien (en grand) à l'échelle de la zone de transposition » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

5.1.2 Les propriétés de diffusion et de rétention du Callovo-Oxfordien

Le socle de connaissances relatives au transfert des solutés dans le Callovo-Oxfordien repose sur un large ensemble d'études impliquant de nombreuses mesures et développements spécifiques réalisés depuis plus d'une vingtaine d'années (cf. Fiche 2.15 « La migration des radionucléides et des toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Le Callovo-Oxfordien est caractérisé par une faible perméabilité à l'eau et la diffusion est le processus de transport dominant des solutés. L'étude des concentrations en traceurs naturels (isotopes, gaz dissous, chlorure…) dans le Callovo-Oxfordien confirme le transfert des solutés à grande échelle par diffusion.

Les propriétés de diffusion des argilites du Callovo-Oxfordien sont régies par leur structure porale constituée de pores de dimension nanométrique, et par la présence de phénomènes électrostatiques à leur surface, ce qui diffère des milieux poreux « classiques » tels que les sables ou les calcaires.

Les grandes caractéristiques du transfert diffusif dans le Callovo-Oxfordien sont bien établies :

- les coefficients de diffusion effectifs sont très faibles. Ainsi, la diffusion des molécules d'eau dans les argilites du Callovo-Oxfordien est environ 100 fois plus faible que celle dans l'eau libre ;
- les anions, cations et espèces neutres ont un comportement distinct :
  - ✓ les anions sont exclus des surfaces argileuses, ce qui bloque leur accès au réseau des pores et ralentit leur diffusion. Ceci se traduit par des coefficients de diffusion effectifs de l'iode et du chlore plus faibles que ceux de l'eau tritiée. Le phénomène d'exclusion est mis en évidence sur l'ensemble de la formation ;
  - ✓ inversement, les cations sont attirés par les surfaces argileuses, ce qui augmente leur diffusion en termes de coefficient de diffusion effectif. La migration des cations demeure cependant très lente du fait des phénomènes de rétention (Kd > 0). Le césium est le cation dont le coefficient de diffusion effectif est le plus élevé, environ 8 à 10 fois celui de HTO. Le phénomène de diffusion augmentée des cations est également décrit sur l'ensemble de la formation ;
  - ✓ les espèces neutres telles que l'eau tritiée sont peu affectées par les phénomènes électrostatiques de surface. Elles présentent un comportement intermédiaire de ceux des cations et des anions.
- à l'échelle de la zone de transposition, il n'a pas été mis en évidence de variabilité significative des valeurs des coefficients de diffusion au sein d'une même unité géologique et entre les différentes unités géologiques. Pour l'UA et l'UT, la dispersion des valeurs traduit principalement des incertitudes expérimentales. Pour l'USC, la dispersion des valeurs de coefficient de diffusion est principalement liée à la présence de niveaux lithologiques localement plus riches en carbonates.

Les incertitudes résiduelles portent essentiellement sur les valeurs des coefficients de diffusion de certains éléments chimiques :

- les éléments chimiques les plus interagissant (essentiellement des métaux de transition, les lanthanides, les actinides…) : du fait de leur faible mobilité due à leur rétention importante, la composante purement diffusive de leur transfert est plus difficilement accessible expérimentalement sur roche intacte. Toutefois, les incertitudes résiduelles relatives au comportement diffusif de ces éléments dans le Callovo-Oxfordien sont réduites car leur mobilité apparente dans le Callovo-Oxfordien est faible et dominée par leur forte rétention dans le Callovo-Oxfordien et les argiles en général, qui est bien appréhendée ;
- les éléments chimiques difficiles à étudier expérimentalement, notamment en lien avec la maîtrise du redox, comme le sélénium : des mesures sur échantillons permettent néanmoins de valider des analogies de comportement prises avec des éléments qui ont fait l'objet de mesures plus nombreuses (par exemple, le chlore).

La migration des radionucléides et des toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien dépend de :

- leur spéciation (*i.e.* Leur forme chimique) en tant que solutés dans l'eau porale ;
- leur solubilité (*i.e.* La concentration maximale de l'élément chimique pouvant être atteinte en tant que soluté avant sa précipitation) ;
- leur réactivité avec les phases solides, dans les roches argileuses. Il s'agit principalement de mécanismes de sorption par les phases argileuses, représentés au travers d'un paramètre intégrateur et macroscopique, le coefficient de distribution Kd ;
- leur propriété de diffusion (transport), celle-ci étant gouvernée dans les roches argileuses par la géométrie du réseau de pores et les phénomènes d'interactions électrostatiques émanant des phases argileuses.

L'ensemble de ces processus sont étroitement liés et dépendent fortement des caractéristiques du système minéral et aqueux des argilites, qui comprend la chimie des eaux, la minéralogie et le réseau de pores. La spéciation est l'un des paramètres majeurs qui gouvernent la migration des radionucléides et des toxiques chimiques puisqu'elle conditionne fortement les propriétés de rétention (principalement en fonction de l'état d'oxydation) et de diffusion (au travers du coefficient de diffusion dans l'eau libre et de l'effet de la charge sur le facteur géométrique).

La mobilité des actinides, des lanthanides et de la plupart des métaux de transition dans le Callovo-Oxfordien est principalement gouvernée par leur forte réactivité avec les minéraux argileux constitutifs des argilites du Callovo-Oxfordien. Ces éléments présentent également une faible solubilité dans l'eau porale calcique-sodique des argilites.

Les anions monovalents, tels que le chlore et l'iode, ont une faible réactivité vis-à-vis des phases solides, leur solubilité n'est pas contrôlée et leur sorption est nulle. La mobilité des anions monovalents est cependant réduite au travers des argilites du Callovo-Oxfordien par le phénomène d'exclusion des anions qui restreint l'accessibilité des anions à l'ensemble du réseau de pores.

Le sélénium peut migrer sous un état d'oxydation –II (forme dominante) dont la solubilité est contrôlée par la phase Se(0) et sous un état d'oxydation +VI dont la solubilité n'est pas contrôlée. Ces deux formes, Se(-II) et Se(+VI) ont une sorption nulle dans le Callovo-Oxfordien et leur diffusion est soumise aux effets d'exclusion anionique.

L'ensemble important des connaissances sur la migration des radionucléides et des toxiques chimiques présente un niveau élevé de maîtrise du point de vue des phénomènes mis en jeu et des paramètres et gammes de paramètres associés. Les incertitudes résiduelles sur la migration des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien concernent essentiellement la spéciation et les effets associés en termes de mobilité de deux éléments chimiques :

- **le sélénium** : il peut présenter des états d'oxydation multiples dans l'eau porale des argilites. La forme Se(-II) est attendue comme dominante dans l'eau porale, toutefois 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). La part de Se(+VI) est liée aux termes sources déchets (et aux incertitudes associées) et flux en sorties d'alvéole. Des incertitudes subsistent sur le comportement du Se 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 Sélénium vers le Callovo-Oxfordien puis vers les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien par rapport aux évaluations de sûreté en après-fermeture réalisées pour le présent dossier de demande d'autorisation de création de l'INB ;
- **l'uranium** : sa spéciation est fortement dépendante du potentiel d'oxydo-réduction et de la concentration en carbonates dissous. Celle-ci gouverne également ses propriétés de rétention et de diffusion. L'absence de caractérisation expérimentale de la rétention et de la diffusion de l'uranium avec une maîtrise suffisamment détaillée des conditions redox et pCO_2 induit à ce jour des incertitudes sur les paramètres de transfert de l'uranium (Kd et D_e). Néanmoins au travers d'une gamme élargie de valeurs de Kd, ces incertitudes rendent compte d'une capacité de rétention élevée des argilites du Callovo-Oxfordien pour l'uranium, et donc elles ne remettent pas en cause la (très) faible mobilité de l'uranium dans le Callovo-Oxfordien.

5.1.3 La surpression interstitielle naturelle dans le Callovo-Oxfordien

La surpression interstitielle naturelle (de l'ordre de 0,5 MPa) mesurée dans la couche du Callovo-Oxfordien au niveau du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne n'est pas complètement expliquée (cf. Fiche 2.7 « La surpression interstitielle naturelle dans le Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). Il en va de même à l'échelle de la zone de transposition et donc de la ZIOS (existence, profils, valeurs). Si de manière exhaustive les mécanismes pouvant en être à l'origine sont bien appréhendés (effet osmotique lié à la taille très faible des pores des argilites, variations des conditions aux limites hydrauliques du Callovo-Oxfordien dans les encaissants du Callovo-Oxfordien, couplage entre le comportement mécanique différé et le comportement hydraulique du Callovo-Oxfordien…), leurs contributions respectives présentent encore des incertitudes qui ne permettent de conclure précisément à une origine émanant d'un seul phénomène ; Il est fortement probable que la surpression d'eau interstitielle dans le Callovo-Oxfordien soit la combinaison de plusieurs phénomènes.

Bien que les contributions des causes possibles de la surpression d'eau interstitielle naturelle dans le Callovo-Oxfordien au niveau du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne n'aient pas été établies de manière affirmées et précises, il apparait néanmoins que par l'existence même de la surpression, ces causes ne génèrent pas de déplacement d'eau, en particulier par gradient de pression ; elles soulignent la (très) faible perméabilité en grand du Callovo-Oxfordien, et le fait que la surpression ne participerait pas, ou que très marginalement, au transfert des solutés à grande échelle dans le Callovo-Oxfordien, en cohérence avec les observations sur les traceurs naturels et les simulations numériques s'y rapportant (cf. Fiche 2.7 « La surpression interstitielle naturelle dans le Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) montrant un transfert diffusif dominant, et les mesures de la perméabilité ainsi que des coefficients de diffusion (cf. *Infra*).

In fine, les incertitudes résiduelles sur la perméabilité en grand du Callovo-Oxfordien et la surpression interstitielle naturelle dans le Callovo-Oxfordien n'ont pas de conséquences significatives sur l'ensemble des processus physico-chimiques de l'évolution du stockage et du milieu géologique, en particulier les processus d'interactions entre le stockage et le Callovo-Oxfordien, par exemple la perturbation alcaline ou les processus du transitoire hydraulique-gaz, pour lesquels les écoulements d'eau et les échanges/transfert de solutés, en particulier avec le Callovo-Oxfordien, jouent un rôle.

5.1.4 L'évolution future du site

Les scénarios d'évolution géodynamique phénoménologique et maximaliste (conservatif) sur le prochain million d'années encadrent le domaine des possibles (cf. Fiche 2.17 « La géodynamique interne du site de Meuse/Haute-Marne à l'Actuel et sur le prochain million d'années » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). L'évaluation de l'évolution des écoulements (*e.g.* Hydrogéologie) du fait des évolutions géodynamiques montre l'apparition de deux exutoires dans l'aquifère du Dogger et une ligne d'inversion du gradient vertical de charge dans le Callovo-Oxfordien, séparant la zone d'écoulement descendant à l'est de celle à écoulement ascendant à l'ouest, qui se déplace vers le nord-ouest ensuite sous l'effet de l'érosion ; le déplacement est inversé vers le sud-est sur quelques kilomètres. À un million d'années, le Callovo-Oxfordien au niveau de la ZIRA se trouve entièrement en zone d'écoulement ascendant. L'évolution phénoménologique jugée la plus plausible conserve les deux exutoires dans le Dogger mais la ligne d'inversion du gradient ne se déplace que de quelques centaines de mètres vers le nord-ouest.

Les incertitudes résiduelles actuelles relatives à l'évolution géodynamique portent sur quelques paramètres, comme la durée de la phase d'érosion en début de période glaciaire, mais elles ne sont pas de nature à modifier fondamentalement les grands déterminants de l'évolution géodynamique et de ses conséquences possibles sur les écoulements d'eau sur le prochain million d'années.

Ainsi, on notera que les incertitudes résiduelles concernent (ii) l'effet d'une évolution géodynamique selon un scénario d'évolution perturbée du climat et (ii) l'effet de variantes de l'évolution géomorphologique, possibles dans le futur, qui induiraient des captures des rivières, notamment celle de l'Ornain. Toutefois, 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 conduit à une diminution considérable des 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.

5.2 Les grands transitoires

5.2.1 Le transitoire thermique

L'évaluation de la charge thermique s'appuie sur des modélisations numériques (calculs par éléments finis en trois dimensions) qui permettent de rendre compte des élévations transitoires de température dans le stockage et dans le milieu géologique environnant liées aux déchets exothermiques (les déchets HA et quelques déchets MA-VL) aux différentes échelles de temps et d'espace (cf. Fiche 3.1 « Le transitoire thermique dans le Callovo-Oxfordien autour des quartiers contenant des déchets exothermiques » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)). Les outils numériques actuels permettent de réaliser des calculs fiables concernant les évolutions de la température vis-à-vis des phénomènes mis en jeu. Les modèles numériques de transfert de la chaleur utilisés ont été éprouvés et validés, en particulier à partir des expérimentations thermiques effectuées au Laboratoire de recherche souterrain du centre de Meuse/Haute-Marne (par exemple les expérimentations TER/TED) (10).

Les connaissances sur les processus de transfert de la chaleur, les modèles de représentation de ces processus et les valeurs des paramètres des modèles au milieu géologique, en particulier la conductivité thermique de la couche du Callovo-Oxfordien, se fondent sur un grand nombre de données à différentes échelles spatiales (des mesures effectuées sur de nombreux échantillons prélevés au Laboratoire de recherche souterrain, des mesures d'expérimentations de chauffe *in situ* en forages dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, la mesure du profil de température géothermale et du gradient géothermal en forage depuis la surface, la corrélation entre les données sismiques 3D obtenues à l'échelle de la ZIOS et les données de conductivité thermique sur échantillons…). Ces données mettent en évidence une variabilité spatiale limitée de ce paramètre, prise en compte dans le dimensionnement thermique des ouvrages.

Les incertitudes résiduelles portent sur une description fine des ouvrages, et en particulier des couplages au sein des ouvrages. Toutefois, la démarche retenue est de privilégier des évaluations « robustes », notamment vis-à-vis de la charge thermique dans la couche du Callovo-Oxfordien. Ainsi, pour tenir compte de la variabilité des paramètres (par exemple : conductivité du milieu, vitesse de fermeture des jeux), les valeurs utilisées pour les modèles sont choisies de manière à être raisonnablement conservatives à savoir, par exemple, pour les alvéoles HA : les jeux fonctionnels sont supposés être remplis d'air : l'air étant un fluide moins caloporteur que l'eau, cette approximation surestime la température quelques degrés (de 1 °C à 3 °C environ).

En complément de ces évaluations temps/espace, des éléments de vérification ont permis de conforter le fait que la charge thermique n'est pas ou peu influencée par l'ensemble des autres processus que le transfert de chaleur par diffusion(par exemple la thermoconvection en grand), chimiques (transformations minéralogiques très limitées) ou mécaniques (évolutions des surfaces d'échanges limitées), qui affectent le stockage pendant cette charge thermique, en termes de couplage ou rétrocouplage avec la thermique.

In fine, la description du transitoire thermique bâtie sur les résultats de la simulation numérique est peu influencée par les incertitudes résiduelles, en particulier pour la couche du Callovo-Oxfordien. Les simplifications associées à la modélisation (le maillage, la discrétisation en temps, les opérations de changement d'échelle et/ou d'homogénéisation) conduisent à des niveaux de précision des évaluations estimées au maximum à quelques degrés (de l'ordre de 3 °C) et qui sont couvertes par les marges de dimensionnement (cf. Chapitre 1.4.4 du présent volume).

5.2.2 Le transitoire hydraulique/gaz

Les connaissances acquises depuis plus de 20 ans tant sur le plan phénoménologique que sur le plan méthodologique permettent de garantir une maîtrise de l'évaluation fine du transitoire hydraulique-gaz en après fermeture aux différentes échelles du stockage (des colis de déchets à l'alvéole puis au stockage en grand) et du milieu géologique environnant), à la fois en termes de grands traits et de valeurs des grandeurs caractéristiques (pressions d'eau et de gaz, flux d'eau et de gaz, degrés de saturation en eau, temps caractéristiques de resaturation…) (cf. Fiche 3.6 « Le transitoire hydraulique-gaz du stockage en après-fermeture » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Les processus élémentaires (production du gaz, migration du gaz…) sont bien établis et les phénomènes pilotant le transitoire de l'échelle des alvéoles à l'échelle du stockage en grand et du milieu géologique environnant sont bien identifiés.

Les grands traits du transitoire sont bien décrits, en particulier :

- les scellements des liaisons surface-fond se resaturent rapidement en partie supérieure par les eaux de l'Oxfordien ;
- le gaz mis en jeu est l'hydrogène et sa production dans le stockage est principalement liée à la corrosion anoxique des matériaux/composants métalliques et dans une bien moindre mesure à la radiolyse de l'eau et des matériaux/composants organiques ;
- la combinatoire entre la forte pression d'entrée de gaz des argilites du Callovo-Oxfordien, la production de gaz dans le stockage et la lente diffusion de l'hydrogène dissous dans le Callovo-Oxfordien conduit à la présence d'hydrogène sous forme gazeuse dans le stockage et à une augmentation transitoire de sa pression jusqu'à une valeur maximale avant de décroitre ;
- la capacité des ouvrages de fermeture, en particulier les scellements, à laisser passer les gaz conduit à une migration d'une partie de l'hydrogène gazeux dans le réseau de galeries du stockage vers les ouvrages de liaison surface-fond (descenderies et puits), ce qui contribue à limiter la pression maximale de gaz ;
- la resaturation totale du stockage est un processus lent ; elle est atteinte au-delà de la centaine de milliers d'années ;
- les flux de gaz mis en jeu dans le stockage et au toit et au mur du Callovo-Oxfordien sont limités. Ils n'entrainent pas une désaturation des formations encaissantes, plus particulièrement leurs niveaux de circulation d'eau (par exemple les horizons poreux de l'Oxfordien carbonaté) ne sont pas affectés.

Les grands traits de ce transitoire sont similaires à ceux établis pour le « Dossier 2005 » (32–37).

Les études de sensibilité aux incertitudes de connaissances résiduelles (processus, modèles de représentation, valeurs des paramètres des modèles…), aux variabilités des valeurs de paramètres et aux choix de conceptualisation pour les simulations numériques qui supportent l'évaluation quantitative du transitoire hydraulique-gaz (en incluant les incertitudes numériques) montrent la robustesse de la description : les grands traits du transitoire hydrauliques gaz sont peu influencés. Les valeurs des grandeurs caractéristiques varient de manière limitée et sans effet falaise significatif. Il s'agit notamment de la pression maximale de gaz dont le domaine de sensibilité ne varie significativement que pour des combinatoires de valeurs de paramètres jugées très peu plausibles et restes en deçà de 11 MPa.

Les incertitudes résiduelles de connaissances sont limitées. Elles portent principalement sur la consommation de l'hydrogène (modèles et valeurs des paramètres) et la migration du gaz exprimé aux interfaces entre composants/matériaux, en particulier entre le noyau à base de bentonite des scellements et le Callovo-Oxfordien (modèle, valeur des paramètres…). Concernant ce dernier point, les données expérimentales montrent que les interfaces peuvent constituer des voies de migration de gaz significatives. À ce stade, la consommation d'hydrogène et la migration par les interfaces n'ont pas été introduites dans le simulations numériques : il s'agit d'une approche prudente (*i.e.* Enveloppe), en particulier vis-à-vis de la pression maximale de gaz car ces deux processus conduisent *de facto* à limiter la présence d'hydrogène gazeux dans le stockage.

Enfin, on notera que l'introduction d'une exigence « passant au gaz » (cf. « Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture » (38)) pour le système de fermeture de l'installation souterraine de l'INB implique une grande robustesse de ce système vis-à-vis des incertitudes concernant les paramètres des milieux naturels (la zone endommagée et le Callovo-Oxfordien sain) car la très grande majorité des flux de gaz passent alors par les composants ouvragés et les analyses de sensibilités effectuées montrent que la valeur estimée pour la pression maximale de gaz dans l'installation souterraine de l'INB est peu sensible à ces incertitudes (à quelques 0,1 MPa près).

5.2.3 Le transitoire chimique

5.2.3.1 Les cinétiques de corrosion des composants métalliques, plus particulièrement au sein des alvéoles HA

Les connaissances aujourd'hui disponibles sur la corrosion des aciers bas carbone des composants métalliques, plus particulièrement dans les alvéoles HA en situations de stockage sont bien établies[55] (cf. Fiche 4.7 « La corrosion du chemisage et des conteneurs de stockage d'un alvéole HA en situation de stockage » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :

- **dans une atmosphère humide**, sans cycles d'humidification/séchage, comme celle de l'alvéole HA en période de fonctionnement, une corrosion généralisée prédomine après un temps d'amorçage dépendant essentiellement de l'état de surface du métal et qui conduit à une dispersion des mesures des vitesses de corrosion au cours des premiers mois. Après un an, ces vitesses de corrosion sont inférieures à 50 µm.an^{-1} à 100 % HR et 80 °C en présence d'oxygène (air). En présence de vapeur d'eau sans oxygène (ou ne dépassant pas 1 % d'oxygène), à 90 % HR et 80 °C, la vitesse de corrosion généralisée est de l'ordre du micromètre par an ;
- **l'oxygène** a deux types d'effet sur la corrosion en milieu argileux :
  - ✓ il favorise des vitesses de corrosion élevées (jusqu'à plusieurs centaines de micromètres par an), ainsi qu'un risque de corrosion localisée. Dans un milieu limitant l'apport d'oxygène (par diffusion dans l'eau par exemple), les vitesses de corrosion sont directement contrôlées par l'apport de cet élément vers le métal ;
  - ✓ l'oxygène favorise également un milieu transitoirement acide en paroi d'alvéole, qui conduit à des vitesses de corrosion de plusieurs centaines de micromètres par an. Le retour à un pH neutre ou alcalin anoxique ne conduit pas à retrouver les conditions de corrosion à vitesse faible (<10 µm.an^{-1}) même après deux années, du fait de la présence de couches non protectrices formées durant le transitoire oxydant/acide initial.
- **le matériau de remplissage cimentaire** des alvéoles HA permet d'éliminer le transitoire acide et favorise une protection/passivation de l'acier, dont il est possible de définir des domaines de stabilité (absence de corrosion localisée ou de corrosion hétérogène) dans lesquels la corrosion des aciers du chemisage et du conteneur pourra évoluer (cf. Fiche 4.4 « L'évolution chimique d'un alvéole HA » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :
  - ✓ en milieu anoxique (teneur en oxygène dissous inférieure à quelques dizaines de µg.L^{-1} d'eau), la protection/passivité de l'acier conduit à une vitesse de corrosion généralisée rapidement inférieure à 10 µm.an^{-1} (25 °C à 90 °C), quel que soit le matériau de remplissage (et donc son pH). Elle peut atteindre des vitesses de l'ordre de 0,1 µm.an^{-1} ;

[55] Les connaissances sur la corrosion des aciers dans les matériaux cimentaires en situation de stockage s'appuient sur le socle de connaissances acquis hors du domaine du stockage géologique dans le domaine du génie civil et des ouvrages souterrains, depuis plusieurs dizaines d'années. Les connaissances sont bien établies et codifiées dans le cadre de règles de l'art.

- ✓ en présence d'oxygène, l'acier se passive initialement :
  - cette passivité reste « stable » au-dessus d'un pH d'environ 11 : absence de corrosion hétérogène ou localisée, quelle que soit la valeur du potentiel rédox (et donc la teneur en oxygène). La vitesse de corrosion généralisée est faible (10 µm.an^{-1} à 0,1 µm.an^{-1}) et décroissante dans le temps ;
  - dans l'intervalle de pH de 9 à 11, certains milieux permettent à l'acier de prendre un potentiel suffisamment élevé pour atteindre un potentiel de piqûration (ou de dépassivation). L'atteinte de ce potentiel sera favorisée par la teneur et le flux d'oxygène dans le milieu, sans toutefois pouvoir le relier directement à ces paramètres. Lorsque ce potentiel est atteint, une corrosion localisée ou hétérogène peut se développer (alternance de zones actives et passives avec des vitesses de corrosion bien différentes, l'une favorisant le développement de l'autre). L'un des moyens pour évaluer le risque d'apparition d'une corrosion localisée *in situ* est alors de comparer des mesures de potentiel de piqûration/repassivation au potentiel à l'abandon de l'acier dans le même milieu.

- **les rayonnements gamma**, pour des débits de dose jusqu'à 20 Gy.h^{-1}, n'influencent pas les vitesses de corrosion généralisée, mais cette corrosion présente un caractère non uniforme pour un débit de dose de 20 Gy.h^{-1}. Un débit de dose de 10 Gy.h^{-1} conduit à des valeurs identiques, voire plus faibles qu'en l'absence de rayonnement. Le choix d'une épaisseur de colis de stockage garantissant un débit de dose maximal de 10 Gy.h^{-1}a été retenu comme mentionné précédemment ;
- **les essais de corrosion sous contrainte** ont permis d'orienter le choix des aciers : API 5L X65 pour le chemisage et P285NH amélioré pour le colis de stockage.

  L'importance de la microstructure dans la résistance à l'amorçage et la propagation de fissures a été confirmée expérimentalement. En conséquence, le choix de matériaux s'est porté sur des aciers de type pétrolier tel que l'API 5L X65 MS, ayant une microstructure ferritique homogène à grains fins et des propriétés mécaniques élevées (pour le chemisage), et des aciers forgés avec une composition contrôlée en impuretés et une faible limite d'élasticité (pour les conteneurs de stockage). Ces aciers ne subissent, en milieu argileux, qu'une fissuration peu profonde et limitée à une zone superficielle écrouie. Des essais de longue durée (amorçage et propagation) ont également été menés sur des échantillons des différentes zones des prototypes de chemisages et de conteneurs de stockage : corps du composant, zones soudées, zones détensionnées. Ces essais ont été réalisés avec un matériau de remplissage cimentaire contenant de la bentonite (alcalinité modérée : pH 10,5 à 11 à 25 °C et pH ≈ 9 à 90 °C) et des eaux synthétiques représentatives de l'eau porale de ce matériau (avec et sans influence de l'eau du Callovo-Oxfordien ayant percolé au travers de ce matériau). Aucun des essais n'a produit de fissure susceptible de constituer un risque pour le chemisage ou le conteneur de stockage de l'alvéole HA.

  En complément, on notera que l'Andra a retenu un traitement de détensionnement de l'acier pour éliminer les contraintes résiduelles internes après soudage du couvercle du conteneur de stockage ;
- **l'influence des micro-organismes** :
  - ✓ **en milieu argileux**, cette influence n'est pas déterminante dans les processus de corrosion :
    - les conditions les plus pénalisantes sont celles d'un milieu mixte « aéré/désaéré » en présence d'un biofilm, permettant d'obtenir ces conditions ;
    - les expérimentations (notamment au Laboratoire de recherche souterrain) étant réalisées sans stérilisation, les vitesses données précédemment en milieu argileux intègrent le rôle des micro-organismes ;
    - une corrosion généralisée amplifiée d'un facteur 2 ou 3 par rapport à un milieu « stérile » est observée en milieu argileux, en favorisant le développement des micro-organismes. La corrosion localisée est limitée à des piqûres peu profondes ;
    - les produits de corrosion provenant de cette interaction avec les micro-organismes (sulfures pour les bactéries sulfato-réductrices, principales souches observées) ne sont pas au contact du métal. Ils ont, de ce fait, une faible influence sur le processus de corrosion.

- ✓ **dans le matériau de remplissage cimentaire en extrados du chemisage des alvéoles HA et ses eaux porales influencées par le Callovo-Oxfordien :**
  - 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 ;
  - les essais au contact d'un matériau cimentaire contenant de la bentonite ont montré une diminution, voire une perte de capacité des micro-organismes à se développer.

La principale incertitude résiduelle identifiée porte sur l'influence de la concentration et du flux d'oxygène vers l'alvéole (extrados) depuis la galerie pendant la phase de fonctionnement, qui influencent le potentiel rédox du milieu et le potentiel libre de corrosion de l'acier, déterminant ainsi les conditions d'une passivité stable ou bien l'occurrence d'une corrosion localisée ou hétérogène par rupture de passivité. Ce processus n'est toutefois significatif qu'en dessous d'un pH d'environ 11. Au-dessus de ce pH, ou bien dans un milieu anoxique, l'acier non allié reste dans un domaine de protection ou de passivité, conduisant à des vitesses de corrosion généralisée inférieures à 10 µm.an^{-1}. Cela renvoie à la présence possible d'oxygène dans l'alvéole en période de fonctionnement, dont la conception vise néanmoins à limiter/empêcher les échanges d'oxygène avec la galerie, outre la disposition d'inertage de l'interne de l'alvéole HA si besoin.

5.2.3.2 La perturbation oxydante

L'ensemble des travaux expérimentaux et de modélisation menée convergent vers un même schéma de la perturbation oxydante (cf. Fiche 3.11 « La perturbation oxydante dans le Callovo-Oxfordien autour des ouvrages pendant l'exploitation » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)) :

- la perturbation oxydante affecte la zone fracturée autour des ouvrages souterrains et en particulier les parois des fractures et les objets connectés à ces fractures, tels que des bioturbations, en lien avec leur désaturation. Les blocs entre les fractures ne se désaturent que très peu. Dans ces blocs et dans la roche intacte saturée, la vitesse de pénétration de l'oxygène est de l'ordre de quelques centimètres par siècle ;
- la perturbation oxydante génère des modifications de la composition du gaz, de l'eau et de la roche au voisinage des fractures. L'oxygène de l'air est consommé en réagissant principalement avec les pyrites de la roche ; la réaction de l'oxygène avec les pyrites produit de l'acide sulfurique qui induit la dissolution de carbonates solides en dégageant du CO_2. Des phases secondaires de fer et éventuellement du gypse se forment. Ces réactions restent localisées dans les premiers centimètres de zone saturée au voisinage des fractures. Au-delà, dans les blocs de roche délimités par les fractures, les conditions redox ne sont pas modifiées.

En période de fonctionnement, la perturbation oxydante produit des effets différents dans les ouvrages selon qu'ils sont restés ouverts ou qu'ils ont été fermés à la ventilation :

- pour un ouvrage laissé ouvert, tel qu'une galerie ou un alvéole MA-VL, le CO_2 produit est évacué et de l'eau est extraite sous forme de vapeur pendant toute la période de fonctionnement. La composition de l'atmosphère gazeuse de l'ouvrage est constamment celle de l'air de ventilation. Il n'y a pas d'arrivée d'eau liquide en provenance de la roche pendant cette phase. La perturbation oxydante est localisée au voisinage des fractures autour des ouvrages. Les conditions redox ne sont pas modifiées au-delà de cette zone ;
- pour un ouvrage fermé en période de fonctionnement tel qu'un alvéole HA, une phase de resaturation en eau commence lors de la fermeture car la vapeur d'eau n'est plus extraite vers l'air de ventilation. Cette eau porale se mélange à l'eau des zones oxydées de la roche en paroi des fractures autour de l'ouvrage et dissout les phases secondaires solubles, telles que le gypse, qui ont pu précipiter. Le mélange aqueux qui arrive dans l'ouvrage est enrichi en sulfates et en cations par rapport à l'eau porale de la roche non perturbée. Les baisses potentielles du pH sont de l'ordre d'une unité.

Après fermeture, les produits de la perturbation oxydante dans l'eau porale et dans la roche au voisinage des fractures vont être lessivés par l'eau de resaturation qui parvient dans les ouvrages.

Les processus en jeu dans la perturbation oxydante sont bien identifiés à plusieurs échelles dans les Laboratoires de recherche souterrains.

Les incertitudes résiduelles portent sur la quantification précise de la perturbation oxydante pour certains ouvrages, par exemple les alvéoles HA, en lien avec la quantification des éventuels flux d'oxygène (et leur évolution dans le temps) susceptibles de rentrer dans ces ouvrages en phase de fonctionnement. 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 de l'alvéole HA (MREA)) limitant l'influence de ses effets lors de la resaturation, et des incertitudes sur la quantification de la quantité d'argilites oxydées, au travers de la quantification des surfaces cumulées des fractures de la zone endommagée générées par l'excavation des ouvrages.

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 de l'alvéole (MREA) limitant l'influence de ses effets lors de la resaturation.

5.2.3.3 L'évolution chimique des bétons

Étant donné la composition de leur eau porale (sodique-calcique et à pH quasi neutre), les argilites du Callovo-Oxfordien généreront des évolutions chimiques des composants cimentaires, en relation avec la présence en solution, d'ions sulfate et carbonate (cf. Fiche 3.12 « La dégradation sous eau des matériaux cimentaires au sein du Callovo-Oxfordien » au « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Les réactivités chimiques associées à ces espèces en solution sont bien connues et leurs phénoménologies étudiées de très longue date tant dans le domaine du génie civil que pour le stockage en couche géologique profonde au travers de programmes initiés et pilotés par l'Andra et ses homologues depuis près de vingt ans, notamment dans le cadre de projets nationaux ou internationaux. Si une part importante de la connaissance actuelle est ainsi basée sur le savoir-faire et la connaissance issus du génie civil classique, les études plus poussées en matière d'exigences (de durabilités physiques et chimiques), appliquées au domaine du stockage de déchets radioactifs, constituent aujourd'hui un *corpus* de connaissances important et suffisant pour la description des évolutions chimiques des composants cimentaires dans les conditions de fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

L'Andra dispose ainsi à la fois de modèles de comportement et des données d'entrée correspondantes (données thermodynamiques pour toutes les principales phases impliquées dans ces dégradations chimiques et données cinétiques pour un nombre limité de phases pures). L'essentiel du corpus de connaissances sur les évolutions chimiques des matériaux cimentaires est basé sur l'étude de liants silico-calcaires « classiques », principalement à partir de ciments de types CEM I ou CEM V. Les formulations des liants à faible chaleur d'hydratation/bas pH sont basées sur l'emploi des mêmes matières premières (ciments et ajouts minéraux). Les phénoménologies permettant d'en décrire les évolutions chimiques sont donc les mêmes que celles des matériaux cimentaires classiques et ce sont les cortèges minéralogiques initiaux qui vont distinguer ces matériaux les uns des autres.

On notera que certains déchets chimiquement réactifs présentent les mêmes types de réactivités chimiques. Leurs interactions avec les ouvrages cimentaires sont donc décrites avec les mêmes phénoménologies.

Par ailleurs, les spécifications sur les matières premières (ciments et granulats) pour un emploi dans le centre de stockage Cigéo visent à prévenir des pathologies des bétons dont le caractère délétère est connu en génie civil, mais dont l'occurrence reste encore parfois difficile à quantifier. Ces spécifications visent donc à se placer dans des conditions où le développement de ces pathologies est la moins probable, voire de manière certaine, hors des conditions d'amorce des processus. Le respect de la règlementation sur les matières premières (ciments, granulats, adjuvants, eau…), ainsi que sur les bétons et les moyens de contrôle du respect des normes en vigueur, est ainsi un prérequis à toute définition et emploi de matériau cimentaire dans l'INB (NF EN 206/CN de décembre 2014 (39) ; NF EN 197-1 d'avril 2012 (40) et normes associées). Les liants sont ainsi spécifiés pour être résistants aux attaques sulfatiques (interne ou externe), Une autre spécification concerne la limitation de la chaleur d'hydratation et le contenu en alcalin. Ce choix vise en particulier à minimiser le risque de développement de la RSI, tout comme à limiter l'impact des déchets salins sur les colis de stockage et à plus long terme l'apparition d'une formation différée d'ettringite (impact chimique du Callovo-Oxfordien sur les structures de stockage). Les ciments industriels disponibles sur le marché couvrent ces besoins autant pour des ciments simples (CEM I) que pour des ciments composés (CEM V) ou les formules spécifiques des liants à faible chaleur d'hydratation/bas pH.

Du point de vue de la dégradation chimique *stricto sensu*, aucune incertitude résiduelle majeure n'est identifiée ; les seules incertitudes résiduelles portent sur les définitions détaillées des cortèges minéralogiques, plus ou moins étoffés suivant la nature des liants envisagés. Toutefois, elles ne remettent pas en cause les processus majeurs de la dégradation chimique des matériaux cimentaires avec l'eau porale des argilites du Callovo-Oxfordien.

Les effets des dégradations chimiques sur le comportement mécanique des bétons (et indirectement sur les propriétés de transfert des solutés au travers d'une modification de la porosité) sont bien appréhendés. Les incertitudes résiduelles portent sur la capacité de modélisation couplée des processus chimiques, des processus mécaniques et des processus de transfert des solutés. Les effets sont appréhendés de manière prudente par simplification des couplages. Compte tenu des conditions aux limites (hydraulique, chimique et de transfert des solutés) imposées par le Callovo-Oxfordien, les conséquences des incertitudes résiduelles relatives aux couplages intrinsèques chimio-mécanique sur la dégradation chimique des bétons sont (très) limitées et ne remettent pas en cause le schéma d'évolution chimique des composants en béton dans le temps et l'espace. On notera par ailleurs que les processus de dégradation chimique des bétons ne conduisent pas à une disparition des bétons par consommation chimique du liant hydraulique par interactions avec l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien : notamment la carbonatation sous eau qui est le processus chimique majeur de l'évolution des bétons confère aux bétons des caractéristiques mécaniques résiduelles significatives.

5.2.3.4 La perturbation alcaline

Le contraste chimique entre les milieux/matériaux argileux (Callovo-Oxfordien, noyau des scellements à base d'argile gonflante, remblai des galeries à base d'argilites du Callovo-Oxfordien excavées) et les matériaux cimentaires, en particulier le pH et la concentration en ions alcalins et alcalino-terreux, entraîne une réactivité à leur interface. La perturbation alcaline issue des matériaux cimentaires entraîne intrinsèquement des transformations minéralogiques et une modification des propriétés hydromécaniques du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains.

Le schéma réactionnel pour le Callovo-Oxfordien au contact d'un béton de type CEM I ou CEM V est considéré comme bien établi grâce à une base de connaissances expérimentale, de modélisation et de simulation numérique importante (cf. Fiche 3.13 « La perturbation alcaline dans le Callovo-Oxfordien autour et dans les ouvrages à base cimentaire » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Le développement de la perturbation alcaline, en termes d'intensité et d'extension, est bien appréhendé : les simulations montrent des effets limités, notamment une extension de la zone reminéralisée d'ordre décimétrique au plus, et la robustesse des modèles réactionnels vis-à-vis de la nature des matériaux argileux et des phases secondaires considérés.

Les incertitudes résiduelles sont identifiées mais ne sont pas de nature à modifier la conclusion quant à l'effet limité des perturbations alcalines sur les fonctions des composants argileux de l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo :

- le choix des phases néoformées dans les simulations influence l'extension de la perturbation. Ce choix s'appuie sur les caractérisations expérimentales. Si le cas des zéolithes semble bien circonscrit, celui des phases magnésiennes néoformées (MSH, serpentines, saponites) présente des incertitudes mais les effets sont secondaires dans le cadre du schéma réactionnel global ;
- la prise en compte de la zone endommagée tant du fait de l'état d'oxydation des argilites en paroi d'alvéole ou de galerie que du réseau de fractures débouchant en parois. Les simulations actuelles montrent un effet plutôt bénéfique ;
- l'effet des transformations minéralogiques et/ou la présence d'un fluide cimentaire dans la porosité sur les propriétés de transport est apprécié de manière qualitative. Ce couplage a été réalisé de façon simplifiée mais prudente par simulation numérique en s'appuyant sur la variation de la porosité issue des bilans de matière. Les évaluations menées montrent des modifications importantes de la porosité uniquement dans les zones fortement reminéralisées, qui n'affectent donc pas le Callovo-Oxfordien en grand en regard de l'épaisseur de garde de part et d'autre du stockage d'au moins 50 mètres.

Plus spécifiquement pour les scellements de fond, les évaluations de la perturbation alcaline mettent en évidence le développement d'une perturbation chimique qui se propage dans le Callovo-Oxfordien en champ proche et le noyau en argile gonflante depuis leurs interfaces avec les matériaux cimentaires. L'extension de ces perturbations dépend de différents paramètres tels que la nature des matériaux cimentaires, la géométrie des scellements, la proportion d'argile, etc.

En l'état actuel des connaissances, les incertitudes résiduelles sur le modèle réactionnel de la perturbation alcaline (liées à la formation de silicates de magnésium hydratés (MSH), etc.) sont limitées et ne sont pas de nature à modifier l'évaluation des extensions de perturbations qui sont liées majoritairement aux alcalins (sodium et potassium) à court terme depuis les matériaux cimentaires et aux ions calcium à plus long terme depuis la roche hôte.

L'incertitude résiduelle majeure porte ainsi non pas sur les processus de la perturbation alcaline mais sur son intensité et son organisation spatiale précises au sein du noyau à base d'argile gonflante au regard des conséquences sur la pression de gonflement effectivement exercée ou sur la perméabilité au gaz dans les zones fortement reminéralisées. Toutefois, la conception et le dimensionnement des scellements de fond, plus particulièrement une proportion adaptée d'argile gonflante *vs* la quantité de béton (concept avec ou sans massifs d'appui), le retrait local du revêtement/soutènement permettant un contact direct du noyau avec le Callovo-Oxfordien sur une longueur d'ordre métrique à plurimétrique et les dimensions importantes des noyaux (diamètre d'ordre décamétrique et longueur d'ordre pluridécamétrique en longueur), limitent le poids des incertitudes et garantissent de conserver une zone du noyau argileux peu affectée par la perturbation alcaline.

5.2.4 L'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrain

5.2.4.1 L'endommagement initial

5.2.4.1.1 Dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien

Les incertitudes résiduelles sur les grandes caractéristiques de la fracturation du Callovo-Oxfordien au pourtour des ouvrages souterrains dans l'UA induite pour leur creusement sont considérées comme faibles à nulles : les travaux de caractérisation au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ont permis de balayer la plupart des techniques de construction et une gamme de diamètre de galeries importante jusqu'à neuf mètres, ne montrant aucun effet d'échelle.

Les travaux de modélisation fondés sur l'analyse des mécanismes de formation de la fracturation sont cohérents avec les observations expérimentales. Sur ces bases, il n'est pas envisagé d'effet d'échelle pour les ouvrages de diamètre plus grands notamment jusqu'à environ 10 mètres. Il en va de même pour la conductivité hydraulique initiale dans la zone endommagée, par sa corrélation avec la fracturation.

L'incertitude résiduelle principale réside dans l'effet de la vitesse d'excavation sur la zone fracturée ; les vitesses de creusement au Laboratoire de recherche souterrain sont plus faibles que celles industrielles. Toutefois, en regard des mécanismes principaux mis en jeu dans la formation de la fracturation, il est peu probable que des vitesses plus élevées conduisent à une fracturation différente de celle observée au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, notamment au travers de la génération de surpression interstitielle : on notera ainsi l'absence de différence de la fracturation entre les galeries du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et les alvéoles HA réalisés aussi au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne mais avec des vitesses d'avancement bien supérieures à celles industrielles du creusement de galeries (cf. Fiche 3.8 « La zone endommagée du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains : nature, structure et perméabilités à l'eau et au gaz initiales » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

5.2.4.2 Dans l'unité Silto-Carbonatée (USC) du Callovo-Oxfordien

Dans l'USC, la résistance en compression simple des argilites supérieure à 30 MPa et une lithologie marquée par une variabilité verticale et latérale de « niveaux/zones/passées » plus ou moins carbonatés impliquent une fracturation très différente de celle observée dans l'UA, à savoir très hétérogène, localement connectée ou non, et non connectée longitudinalement. Son expression se rapproche du modèle de fracturation de type « pelure d'oignon ». Comme pour l'UA, la corrélation entre la fracturation et la conductivité hydraulique conduit à des valeurs de conductivité hydraulique initiale potentiellement élevées localement en paroi (là où il y a une fracture), mais qui décroissent très rapidement pour rejoindre des valeurs proches de celles mesurées sur l'argilite saine (cf. Fiche 3.8 « La zone endommagée du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains : nature, structure et perméabilités à l'eau et au gaz initiales » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

L'incertitude résiduelle concerne la représentation spatiale précise de la relation entre l'endommagement et l'alternance de « niveaux/zones/passées » plus ou moins carbonatés, mais cela ne remet pas en cause le schéma conceptuel de représentation générale de la zone endommagée dans l'USC.

5.2.4.3 La cicatrisation hydraulique

5.2.4.3.1 Dans l'Unité Argileuse (UA)

L'ensemble des observations aussi bien sur échantillons que dans les ouvrages souterrains montrent une capacité de cicatrisation hydraulique des argilites de l'UA du Callovo-Oxfordien. La resaturation des argilites fracturées induit une diminution de la conductivité hydraulique dans le temps.

L'arrivée d'eau conduit à une diminution dans le temps (mais rapide) de la conductivité hydraulique de plusieurs ordres de grandeur jusqu'à s'approcher de celle de l'argilite saine. Les nombreuses conditions d'environnement (état de contrainte, température, nature des fluides de percolation…) et les différents types de fractures et géométries testés n'ont pas révélé de cas pour lesquels il n'y a pas de cicatrisation hydraulique. La perturbation alcaline par les composants en béton du génie civil laissés en place est susceptible d'affecter localement le potentiel de gonflement au sein des fractures, mais en regard de l'extension limitée de la perturbation alcaline, les effets sur la cicatrisation hydraulique restent locaux et n'affectent pas la capacité de cicatrisation en grand (cf. Fiche 3.10 « La cicatrisation hydraulique du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

5.2.4.3.2 Dans l'Unité silto-carbonatée (USC)

Les résultats concernant la cicatrisation hydraulique dans l'USC sont contrastés. Les observations et mesures réalisées sur échantillons et dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne indiquent des « zones » pour lesquelles il n'y a pas de cicatrisation hydraulique, et d'autres où il y une cicatrisation hydraulique avec un comportement proche de celui de l'argilite de UA. Ces fortes différences de comportement sont attribuées à la variation de la composition minéralogique dans l'USC avec des teneurs en carbonate variant entre 20 % et 80 %. Les fractures localisées dans les « zones » à forte teneur en carbonate sont identifiées comme ne pouvant pas se colmater alors que celles dans les « zones » plus argileuses sont propices au colmatage lors de l'hydratation. Il existe ainsi plusieurs échelles de variabilité depuis l'échelle de la microstructure jusqu'à l'échelle métrique.

L'incertitude résiduelle sur l'autocicatrisation dans l'USC concerne sa représentation spatiale en lien avec la représentation spatiale de la variabilité de la teneur en carbonates. Toutefois, cette incertitude résiduelle ne remet pas en cause l'absence de zone endommagée dans l'USC du type de celle observée dans l'UA, en particulier l'absence observée de continuité longitudinale de fractures (cf. Fiche 3.10 « La cicatrisation hydraulique du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

5.2.4.4 L'évolution sur le long terme

L'évolution de la zone endommagée du Callovo-Oxfordien autour de l'installation souterraine renvoie à différentes échelles spatiales, celle du stockage en grand et celles des ouvrages, et à l'ensemble des processus physico-chimiques mis en jeu (cf. Fiche 3.9 « Le comportement mécanique de la zone endommagée en champ proche des ouvrages souterrains dans le Callovo-Oxfordien » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

La description de cette évolution est bien appréhendée de manière macroscopique à ces différentes échelles spatiales, au travers de simulations numériques, d'observations *in situ*, en particulier dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, d'analyses d'analogues naturels et anthropomorphiques etc. Cela est notamment le cas dès lors qu'il peut y avoir des interactions physico-chimiques fortes, comme pour les alvéoles de déchets bitumés qui seraient stockés en l'état, du fait de la pression de gonflements des déchets bitumés lors et du relâchement de sels de la reprise d'eau.

Les incertitudes résiduelles sur l'évolution de la zone endommagée dans le temps portent sur une description très fine de cette évolution. Macroscopiquement, les incertitudes résiduelles sont limitées en raison d'un ensemble de facteurs corrélés, notamment les caractéristiques mécaniques des couches géologiques, le volume de l'installation souterraine qui ne représente que moins de 1 % du volume de roche environnant et des dispositions de conception décrits dans le chapitre 1.4.4.2 du présent volume, notamment la limitation du taux de vide, les espacements entre les alvéoles de stockages (ouvrages souterrains en général), et corrélativement les dimensions des alvéoles, ou l'emploi d'argile gonflante pour les noyaux des scellements coulée au retrait partiel ou total du revêtement/soutènement. À cela s'ajoutent l'extension limitée de la perturbation alcaline et l'absence de perte totale de caractéristiques mécaniques des composants en béton. Les incertitudes résiduelles sur un effondrement du stockage sont donc considérées comme nulles et aucune incertitude résiduelle n'est identifiée concernant une évolution significative de la zone endommagée autour des ouvrages souterrains dans le temps, en particulier en termes d'extension.

5.2.4.5 Le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques

Les évaluations relatives au transfert des solutés (radionucléides, substances toxiques chimiques) menées tout au long du développement du projet de stockage et en particulier depuis 2005 *via* les itérations confortées lors des options de sûreté (cf. » Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture » (41)) et celles, objet de la présente version préliminaire du rapport de sûreté, confirment le rôle prépondérant du Callovo-Oxfordien, qui, associé à des dispositions favorables de conception du système de stockage (borgnitude des quartiers de stockage, regroupement des liaisons surface-fond, longueur d'alvéole…), permet de satisfaire les fonctions de sûreté long terme, en minimisant les perturbations de toutes natures (cf. Fiche 3.14 « Le transfert des radionucléides depuis le stockage jusqu'à la biosphère sur le prochain million d'années » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1)).

Les temps de transfert des radionucléides ou substances toxiques chimiques en solution sont de plusieurs centaines de milliers d'années à la fois au sein du stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien, avec une prédominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien de plusieurs ordres de grandeur par rapport à celle par les ouvrages. Par conséquent, la plupart des radionucléides sont atténués en sortie de couche du Callovo-Oxfordien, soit du fait de leur période très inférieure au temps de transfert, soit du fait d'une précipitation ou une rétention suffisamment élevée pour confiner les radionucléides à quelques mètres des alvéoles sur le prochain million d'années (cas des actinides). Il en est de même de la plupart des substances toxiques chimiques en dehors des substances mobiles (sélénium, cyanure). Les trois principaux radionucléides atteignant le toit et le mur du Callovo-Oxfordien et les exutoires des formations encaissantes sus et sous-jacentes sont l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79. En un million d'années, environ 23 % de l'inventaire initial en iode 129 a atteint le toit et le mur de la couche. La figure 5-1 résume les bilans de masse d'iode 129, normés par rapport à l'inventaire initial.

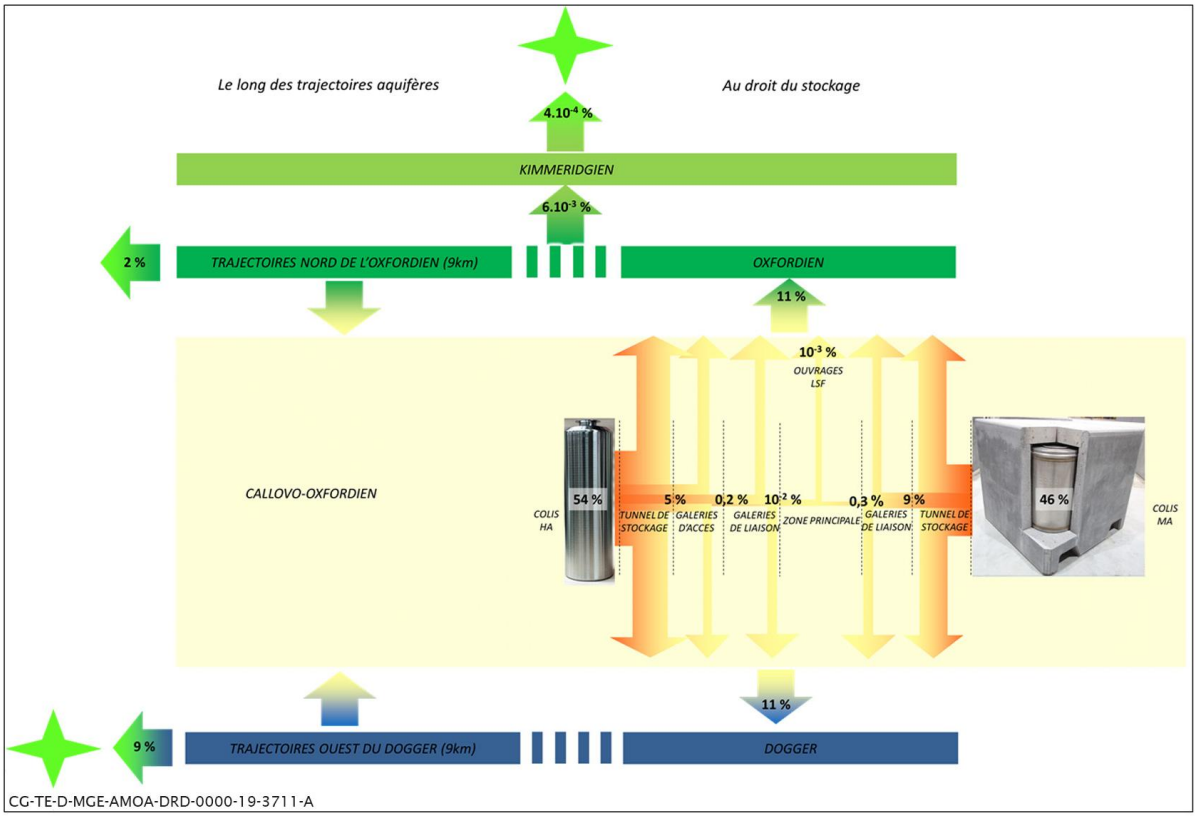


Figure 5-1 *Synthèse de la répartition des voies de transfert dans les composants ouvragés et le milieu géologique depuis le colis jusqu'aux exutoires - Bilan normé par rapport à l'inventaire initial*

Les enseignements sur les déterminants majeurs de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique montrent l'importance des caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien « en grand » sur l'évolution du stockage et *In fine* sur le transfert des solutés (radionucléides, substances toxiques chimiques) relâchés vers les encaissants. Il s'agit en particulier de la faible perméabilité (et de manière plus générale des faibles circulations d'eau), du transfert dominant des solutés par diffusion, des propriétés de rétention élevées et des faibles rapports eau/roche mis en jeu. L'ensemble de ces propriétés contribue non seulement à la lente évolution chimique du stockage, mais aussi aux faibles extensions des perturbations apportées par le stockage sur la couche du Callovo-Oxfordien. Celle-ci possède des caractéristiques qui assurent sa stabilité sur l'échelle de temps du million d'années et des relâchements très progressifs des solutés par les colis de déchets, puis leur faible migration vers les encaissants.

La voie de transfert dans les ouvrages reste principalement pilotée par l'efficacité des scellements des puits et descenderies, et reste plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle par le Callovo-Oxfordien.

Les incertitudes de connaissances sur les conditions hydrogéologiques (domaine de perméabilités, de gradients verticaux et horizontaux liées au modèle hydrogéologique actuel et futur, incluant un scénario d'évolution géodynamique maximaliste, prise en compte des effets de la surpression hydraulique…) sont suffisamment faibles pour ne pas modifier les caractéristiques du comportement hydraulique du stockage et le régime de transfert diffusif des solutés au sein des ouvrages et du Callovo-Oxfordien.

Les incertitudes de connaissances sur les différents transitoires physico-chimiques ne viennent pas modifier les grands enseignements et leur influence reste très localisée : par conception, leur durée, intensité et extension restent négligeables « en grand », devant les longueurs de transfert et/ou temps de transfert associés, que ce soit dans les galeries de l'installation souterraine ou dans le Callovo-Oxfordien.

Enfin, les incertitudes sur les propriétés de diffusion et de rétention sont faibles et permettent de ne pas remettre en question la robustesse du fonctionnement du système de stockage vis-à-vis de la conception qui a également été étudiée en termes de conséquences sur le transfert des radionucléides. Cette prédominance est déterminée par les faibles conditions hydrauliques (perméabilité et gradient de charge hydraulique du Callovo-Oxfordien en grand) et les dispositions de conception dans les quartiers de stockage qui font qu'*in fine*, l'essentiel de l'atténuation des débits molaires des radionucléides ou des débits massiques des substances toxiques chimiques a lieu au sein des quartiers de stockage (au plus près des alvéoles de stockage) (cf. Chapitre 2.3.1 du volume 4 du présent rapport).

TABLEAU DE TRAÇABILITE DES PRINCIPALES EVOLUTIONS

Le tableau suivant précise les paragraphes qui présentent des évolutions ainsi que leur origine qui peut être de différente nature :

- évolution réglementaire : mise en cohérence avec les évolutions de réglementation post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- instruction technique avec l'ASNR : intégration de précisions apportées à l'ASNR en cours d'instruction technique en lien avec le contenu du dossier de DAC ;
- cohérence dossier : mise en cohérence entre pièces du dossier de DAC ;
- cohérence DR0 : mise en cohérence avec le dossier DR0 déposé post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence dossier de chiffrage : mise en cohérence avec le dossier de chiffrage déposé post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence dossiers PNGMDR : mise en cohérence avec les dossiers en réponse au PNGMDR déposés post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence politique énergétique : mise à jour de l'inventaire de réserve et des études de sûreté associées pour tenir compte des évolutions de politique énergétique. Ces éléments ont été communiqués à l'ASNR dans le cadre de l'instruction technique ;
- cohérence planning : intégration de la mise à jour de la date de mise en service annoncée post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence conditionnement : mise en cohérence avec les évolutions de conditionnement des colis primaires annoncées par les producteurs post-dépôt initial du dossier de DAC.

Paragraphe actualisé		Actualisation liée à								
		Évolution réglementaire	Instruction technique avec l'ASNR	Cohérence dossier	Cohérence DR0	Cohérence dossier de chiffrage	Cohérence dossiers PNGMDR	Cohérence politique énergétique	Cohérence planning	Cohérence conditionnement
2.3.1	Les écoulements à l'actuel		X							

Paragraphe actualisé		Actualisation liée à								
		Évolution réglementaire	Instruction technique avec l'ASNR	Cohérence dossier	Cohérence DR0	Cohérence dossier de chiffrage	Cohérence dossiers PNGMDR	Cohérence politique énergétique	Cohérence planning	Cohérence conditionnement
2.3.2	L'évolution des écoulements sur le prochain million d'années		X							
3.3.1	L'évolution géochimique du Callovo-Oxfordien		X	X						
3.3.3	L'évolution chimique des alvéoles HA		X							
3.4.3	Les ouvrages de fermetures			X						
5.2.3	Le transitoire chimique		X							

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1	Les différentes échelles du site	9
Figure 1-2	Bloc diagramme géologique 3D du site de Meuse/Haute-Marne	11
Figure 1-3	Épaisseur (mètre) du Callovo-Oxfordien sur la ZIOS (comptée entre les surfaces SNC et LS0) (cf. Fiche 2.5 « La profondeur et l'épaisseur du Callovo-Oxfordien sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1))	20
Figure 1-4	Profondeur (mètre) du milieu géométrique du Callovo-Oxfordien sur la ZIOS (comptée par rapport à la topographie) (cf. Fiche 2.5 « La profondeur et l'épaisseur du Callovo-Oxfordien sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) » du « Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques » (1))	21
Figure 2-1	Scénarios « enveloppes » des évolutions possibles du climat suivant les hypothèses sur les activités anthropiques	42
Figure 2-2	Fonctionnement hydrogéologique du système aquifère multicouche à l'échelle du secteur de Meuse/Haute-Marne	47
Figure 2-3	Champs des écoulements observés dans les formations du Dogger (à gauche) et de l'Oxfordien carbonaté (à droite)	48
Figure 2-4	Modèle hydrogéologique actualisé : comparaison entre les charges hydrauliques mesurées et celles simulées pour l'Oxfordien et le Dogger	49
Figure 2-5	Taux de surrection tectonique et amplitude de l'érosion et de la sédimentation à 1 Ma (scénario géodynamique « phénoménologique » à gauche et scénario géodynamique « maximaliste » à droite)	51
Figure 2-6	Dates et points (pixel) d'apparition de l'affleurement de l'Oxfordien supérieur (à gauche) et du Dogger supérieur (à droite) dans le cas du scénario d'évolution géodynamique maximaliste	52
Figure 2-7	Trajectoires hydrauliques dans l'Oxfordien moyen et le Dogger selon un scénario d'évolution géodynamique phénoménologique et maximalistes – particules relâchées à t = 400 000 ans – en jaune valeurs basses de porosité cinématique, en bleu, valeurs hautes de porosité cinématique	54
Figure 2-8	Évolution de la ligne d'iso-gradient de charge vertical zéro à travers la formation du Callovo-Oxfordien selon un scénario d'évolution géodynamique « phénoménologique » (à gauche) et un scénario d'évolution « maximaliste » (à droite)	55
Figure 3-1	Distribution spatiale de la conductivité thermique moyenne perpendiculaire à la stratification à l'échelle de la ZIOS	59
Figure 3-2	Évolutions temporelles des flux de chaleur traversant le toit et le mur du Callovo-Oxfordien au droit d'un quartier de stockage de colis HA et du quartier pilote HA	62
Figure 3-3	Évolutions temporelles de la température en différents points autour d'un alvéole de stockage de colis HA2	63
Figure 3-4	Distribution et évolution temporelle des températures autour d'alvéoles de colis CSD-C	64
Figure 3-5	Distribution et évolution temporelle des températures autour de l'alvéole de stockage de colis PIVIC en fonction de la présence ou non d'autres colis exothermiques dans les alvéoles voisins	65

Figure 3-6	Évolution de la température dans les scellements en fonction de leur position au sein de l'architecture de l'installation souterraine	66
Figure 3-7	Illustration des écoulements d'eau dans le Callovo-Oxfordien avant et après la création des ouvrages	68
Figure 3-8	Illustration schématique de la désaturation autour des ouvrages ventilés	68
Figure 3-9	Représentation schématique de l'évolution temporelle de la resaturation des principaux composants de l'installation souterraine en après fermeture	73
Figure 3-10	Représentation schématique de l'évolution temporelle des pressions maximales de gaz dans les différentes zones de l'installation souterraine en après fermeture	74
Figure 3-11	Bilan de la répartition de la quantité totale d'hydrogène produit entre les encaissants supérieur et inférieur du Callovo-Oxfordien après un million d'années	74
Figure 3-12	Les principaux facteurs pilotant les écoulements et le transfert convectif des solutés dans le système de stockage après saturation et retour à un nouvel équilibre hydraulique	76
Figure 3-13	Le rôle hydraulique des scellements en après fermeture - comparaison de profils et des cartographies de charge hydraulique entre une configuration avec et sans scellements	77
Figure 3-14	Représentation schématique de l'alvéole HA avant la rupture du conteneur de stockage	83
Figure 3-15	Représentation schématique de l'alvéole HA après perte d'étanchéité du conteneur	84
Figure 3-16	Représentation schématique de l'évolution de l'alvéole HA à très long terme	85
Figure 3-17	Représentation conceptuelle de la fracturation induite autour des ouvrages dans le Callovo-Oxfordien suivant leurs orientations par rapport aux contraintes principales horizontales (Armand et al., 2014 (16)) : (à gauche) selon σh, et (à droite) selon σH	89
Figure 3-18	Représentation schématique de la zone endommagée autour des ouvrages dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien	90
Figure 3-19	Auto-colmatage des argilites observé par microtomographie X (diamètre des échantillons 1 cm)	92
Figure 3-20	Évolution mécanique d'un alvéole MA-VL : cas du stockage direct de colis en acier, à échelle de (a) quelques dizaines d'années (b) quelques centaines d'années (c) quelques milliers d'années (d) quelques dizaines de milliers d'années (e) 10^5 ans environ (f) quelques 10^5 ans	95
Figure 3-21	Représentation schématique de la zone endommagée autour d'un alvéole de stockage HA	97
Figure 3-22	Flambement monolobe d'un liner en acier (Newhall Tunnel, Californie (21))	98
Figure 3-23	Représentation schématique de l'alvéole HA après flambement du chemisage	98
Figure 3-24	Bandes de cisaillement à 20 000 ans pour un revêtement posé à t0 + 6 mois : calculs 2D – galerie courante alignée à la contrainte principale majeure	102
Figure 4-1	Évolution dans le temps de la quantité de verre altéré associée aux différents régimes de vitesse d'altération	107
Figure 4-2	Relâchement des sels et des radionucléides suite à la reprise d'eau des déchets bitumés	110
Figure 4-3	Organisation des voies de transfert des radionucléides au sein de l'alvéole stockage HA pendant le transitoire hydraulique/gaz, et comparaison avec l'état tout saturé	113
Figure 4-4	Organisation des voies de transfert des radionucléides au sein de l'alvéole MA-VL pendant le transitoire hydraulique/gaz, et comparaison avec l'état tout saturé dès la fermeture du stockage	114

Figure 4-5 Comparaison des voies de transfert « stockage » (avec et sans prise en compte du transitoire de resaturation) et du Callovo-Oxfordien 114
Figure 4-6 Représentation schématique de la fraction massique de ^{14}C ayant transité vers les différentes voies de transfert possibles que sont le Dogger et l'Oxfordien, notamment via les puits/descenderies (résultats avec une spéciation du ^{14}C sous forme de $^{14}CO2$) 116
Figure 4-7 Sensibilité du débit molaire d'iode 129 sortant des liaisons surface-fond à la longueur des galeries de liaison principales MA-VL 118
Figure 4-8 Cartographie sur la ZIOS des temps de maximas de débit molaire de radionucléides 1D (en années) par diffusion des radionucléides mobiles (type I129) dans le Callovo-Oxfordien, selon un stockage de 10 mètres d'épaisseur et implanté en milieu de couche 121
Figure 4-9 Historiques de débit molaire en radionucléides au toit du Callovo-Oxfordien 122
Figure 4-10 Historiques de débit massique en substances toxiques chimiques au toit du Callovo-Oxfordien 122
Figure 4-11 Historiques de débit molaire en iode 129 dans le milieu géologique : toit et mur du Callovo-Oxfordien, toits de l'Oxfordien et du Kimméridgien, dans le Dogger (dans la zone de fracturation diffuse) 123
Figure 4-12 Comparaison des débits molaires en sortie de Callovo-Oxfordien avec et sans considération des effets de la surpression hydraulique 124
Figure 5-1 Synthèse de la répartition des voies de transfert dans les composants ouvragés et le milieu géologique depuis le colis jusqu'aux exutoires - Bilan normé par rapport à l'inventaire initial 142

Tableaux

Tableau 3-1 Estimation du rayon d'influence hydraulique au voisinage des ouvrages de liaison surface-fond au droit de la formation de l'Oxfordien (évaluation analytique) 69

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo. Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-LST-AMOA-TR0-0000-20-0001.

2 Stockage réversible profond - Étape 2009. Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation de surface. Andra (2010). Document N°DCOM/DIR/10-0106. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/391.pdf.

3 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification des choix d'architecture souterraine. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-AF0-0000-19-0001.

4 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.

5 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 (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0009.

6 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. Les matériaux argileux remaniés. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-RAP-AMOA-GE0-0000-20-0004.

7 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. L'évolution du site de Cigéo sur le prochain million d'années du fait des évolutions géodynamiques et des effets en grand du stockage. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-GE0-0000-20-0001.

8 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 (2025). Document N°CG-TE-D-RAP-AMOA-GE0-0000-20-0003.

9 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 (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-GE0-0000-20-0002.

10 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. Les expérimentations scientifiques et technologiques menées au centre de Meuse/Haute-Marne. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-TR0-0000-20-0002.

11 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. Le comportement hydrique et hydraulique du stockage et le devenir des gaz pendant la période d'exploitation réversible (zones de stockage HA et MA-VL). Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-HYD-0000-20-0001.

12 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 (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0007.

13 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 (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-19-0006.

14 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 (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0008.

15 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. État initial et évolution de la zone endommagée. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-GE0-0000-19-0005.

16 Armand, G., Leveau, F., Nussbaum, C., La Vaissière, R. de, Noiret, A., Jaeggi, D., Landrein, P., Righini, C. Geometry and Properties of the Excavation-Induced Fractures at the Meuse/Haute-Marne URL Drifts: Thermo-Hydro-Mechanical Effects in Clay Host Rocks for Radioactive Waste Repositories. Rock Mechanics and Rock Engineering (2014). Vol. 47, pp.21–41.

17 Bossart, P., Meier, P., Moeri, A., Trick, T., Mayor, J.C. Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. Engineering Geology (2002). Vol. 66, N°1-2, pp.19–38.

18 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. L'évolution des galeries en après-fermeture. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0010.

19 Heitz, D.,Trick, T.,Frieg, B.,Buehler, D. In situ Self-Sealing of the EDZ as a Consequence of Loading. Commission européenne (2003). Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories, European Commission Cluster conference and workshop, Luxembourg, 3-5 November 2003.

20 Bock, H., Dehandschutter, B., Martin, C., Mazurek, M., Haller, A. de, Skoczylas, F., Davy, C. Self-sealing of fractures in argillaceous formations in the context of geological disposal of radioactive waste. Nuclear Energy Agency (NEA) (2010). N°NEA 6184.

21 Berti, D., Stutzman, R., Lindquist, E., Eshghipour, M. Buckling of steel tunnel liner under external pressure. Journal of energy engineering (1998). Vol. 124, N°3, pp.55–89.

22 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 (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0005.

23 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. L'évolution phénoménologiques des scellements de Cigéo (après fermeture). Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0011.

24 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 combustibles usés en fonction des conditions d'environnement : synthèse des connaissances. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0010.

25 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 (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0015.

26 Peuget, S., Delaye, J.-M., Jégou, C. Specific outcomes of the research on the radiation stability of the French nuclear glass towards alpha decay accumulation. Journal of nuclear materials (2014). Vol. 444, N°1-3, pp.76–91.

27 Ebert, W.L., Hoburg, R.F., Bates, J. The sorption of water on obsidian and a nuclear waste glass. Physics and chemistry of glasses (1991). Vol. 32, N°4, pp.133-137.

28 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. Le comportement des déchets MA-VL. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0016.

29 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles. Le transfert des radionucléides. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-19-0004.

30 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances. Le comportement des combustibles usés. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0014.

31 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 (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-20-0033.

32 Dossier 2005 Argile. Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Andra (2005). Document N°CRPADP040002. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2017-12/266.pdf.

33 Dossier 2005 Granite. Intérêt des formations granitiques pour le stockage géologique. Andra (2005). Document N°PUBLI/19-2342. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2017-12/267.pdf.

34 Dossier 2005 Argile. Les recherches de l'Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue : résultats et perspectives. Andra (2005). Document N°DCOM/13-0225. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/265.pdf.

35 Dossier 2005 Argile. Tome architecture et gestion du stockage géologique. Andra (2005). Document N°PUBLI/15-2402. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/268.pdf.

36 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.

37 Dossier 2005 Argile. Tome évolution phénoménologique du stockage géologique. Andra (2005). Document N°CRPADS040025. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/269.pdf.

38 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-FER-0000-19-0045.

39 Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206. Association française de normalisation (Afnor) (2014), NF EN 206/CN.

40 Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Association française de normalisation (Afnor) (2012), NF EN 197-1.

41 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.

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
www.andra.fr

© Andra • 2026 • Conception-réalisation : www.kazoar.fr • Crédit illustration : Andra