

# **Avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur le Dossier 2005 Argile**

**Rapport DSU n° 106**

Document présenté par l'IRSN  
devant le groupe permanent chargé des installations  
destinées au stockage à long terme des déchets radioactifs  
les 12 et 13 décembre 2005

**DIRECTION DE LA SÛRETÉ DES USINES, DES  
LABORATOIRES, DES TRANSPORTS ET DES DÉCHETS**

## RÉSUMÉ

L'IRSN a évalué le Dossier 2005 Argile visant à montrer la faisabilité d'un éventuel stockage de déchets de haute activité et à vie longue dans la formation argileuse étudiée au moyen du laboratoire souterrain de Bure. L'IRSN a notamment examiné les points critiques pour la sûreté d'un éventuel stockage dans cette couche ainsi que l'identification et la prise en compte par l'ANDRA des incertitudes sur les données et phénomènes importants au regard des propriétés de confinement d'une installation de stockage.

**Pour ce qui concerne les données de base nécessaires à la définition d'un concept de stockage**, les données rassemblées par l'ANDRA concernant les déchets sont suffisantes, à ce stade du projet, pour estimer l'ordre de grandeur, d'une part du nombre et du volume des déchets générés dans le cadre des hypothèses de fonctionnement du parc électronucléaire actuel, d'autre part des caractéristiques des colis importantes pour la conception d'une installation de stockage. Par ailleurs, les données géologiques examinées laissent préjuger l'existence, dans la formation argileuse, de blocs sains de taille cohérente avec les modules de stockage de grande dimension envisagés par l'ANDRA. Selon les données hydrodynamiques et chimiques examinées, les propriétés de la formation argileuse ne devraient permettre que des transferts lents d'activité relâchée par les colis. De plus, il n'existe pas non plus d'indication, dans le secteur étudié, d'écoulements rapides dans les couches calcaires qui encadrent la formation argileuse ni d'échanges de fluides entre ces couches, à l'exception des zones de failles cartographiées. Ces dernières sont néanmoins exclues de la « zone de transposition » dans laquelle l'ANDRA considère que les formations géologiques possèdent des propriétés a priori favorables à l'implantation d'un stockage. En conséquence, l'IRSN considère, sur la base des éléments examinés, que la formation argileuse du Callovo-Oxfordien présente des propriétés intrinsèques favorables au confinement des déchets.

**Pour ce qui concerne les principales perturbations** d'origine interne (thermiques, hydriques, mécaniques, chimiques et liées au gaz) et d'origine externe (changements climatiques, érosion, séismes), l'IRSN estime sur la base des documents examinés que leurs effets ne devraient pas affecter de manière rédhibitoire la capacité de confinement d'ensemble de l'installation de stockage.

**Pour ce qui concerne la sûreté de l'exploitation du stockage**, les principes de conception retenus pour prendre en compte les risques liés au transfert des colis, à l'incendie, à la criticité et à l'occurrence d'un séisme sont globalement satisfaisants.

**Pour ce qui concerne l'évaluation de sûreté en phase de post-fermeture du stockage**, l'IRSN considère que l'ANDRA a réalisé une estimation des performances des différentes barrières (colis, barrières ouvragées, barrière géologique) d'un stockage cohérente avec l'état des connaissances. Les incertitudes sur l'évolution des performances de confinement des composants ouvragés du stockage (colis, conteneurs et surconteneurs, scellements) sont suffisamment prises en compte pour évaluer les conséquences des défaillances envisagées. À cet égard, sur la base des évaluations réalisées par l'ANDRA et par l'IRSN, il apparaît que les concepts de stockage envisagés devraient permettre de maintenir les conséquences radiologiques à des niveaux compatibles avec les objectifs définis dans la RFS III.2.f.

Aussi, au vu des documents examinés, l'IRSN estime qu'un stockage de déchets radioactifs dans la couche argileuse étudiée au moyen du laboratoire souterrain de Bure apparaît « faisable », dans la mesure où il n'a pas été identifié, à ce stade, d'élément rédhibitoire à l'établissement dans le futur de la « démonstration de sûreté » d'une telle installation. Si une décision de principe sur le stockage géologique devait être prise par le Parlement en 2006, l'IRSN considère qu'il n'existe pas d'obstacle à la recherche d'un site de stockage dans la zone de transposition définie par l'ANDRA.

Cependant, en cas de poursuite du projet, de nombreux compléments devront être apportés en vue d'aboutir à un dossier de demande de création d'un stockage. Parmi ces compléments, il conviendra en particulier, que le futur exploitant :

- définisse une stratégie de reconnaissance permettant en particulier d'identifier la fracturation possible dans la formation hôte et les couches géologiques qui l'encadrent ;
- améliore les connaissances hydrogéologiques en vue notamment de statuer sur la possibilité ou non que des transferts localisés, à l'échelle du secteur, puissent remettre en cause le caractère globalement homogène des écoulements dans les formations encadrant la couche hôte ;
- améliore la compréhension du comportement mécanique de la roche et les connaissances sur les propriétés physiques et chimiques des bétons dans leur état initial et évolué ;
- précise le dimensionnement des composants métalliques du stockage (chemisage des alvéoles, conteneurs et surconteneurs), des ouvrages de scellement ainsi que des soutènements des ouvrages de grande dimension;
- s'assure de l'efficacité du système de ventilation des alvéoles de déchets B et analyse les risques d'explosion dans ces alvéoles de stockage ainsi que dans les galeries attenantes. Il conviendra également de définir les dispositions permettant de remédier à une situation résultant de la chute d'un colis de déchets B lors de sa mise en place dans un alvéole.

Ces nouvelles études devront notamment s'appuyer sur des essais dans le laboratoire et sur des démonstrateurs d'ouvrages de stockage. De tels démonstrateurs devront également être destinés à conforter la possibilité de reprendre, de manière aisée, les colis de déchets sur des durées longues. En effet, l'IRSN n'exclut pas que les dispositions prévues actuellement par l'ANDRA puissent offrir cette possibilité, mais ne peut se prononcer en l'état actuel des connaissances sur le fait qu'elle soit d'ores et déjà acquise sur deux ou trois siècles.

# SOMMAIRE

<b>1 AVANT-PROPOS</b> .....	<b>11</b>
<b>2 LES DONNÉES DE BASE</b> .....	<b>12</b>
2.1 MODÈLE D'INVENTAIRE DES COLIS DE DÉCHETS.....	12
2.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE, GÉODYNAMIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DU SITE DE MEUSE/HAUTE-MARNE .....	14
2.2.1 Introduction .....	15
2.2.1.1 Terminologie .....	15
2.2.1.2 Investigations géologiques réalisées par l'ANDRA .....	16
2.2.2 Géologie .....	19
2.2.2.1 Les formations géologiques du secteur de Meuse/Haute-Marne .....	19
2.2.2.2 Cartographie et histoire structurale à l'échelle du secteur .....	22
2.2.2.3 Reconnaissance de la fracturation à l'échelle locale .....	26
2.2.2.4 Zone de transposition et stratégie de reconnaissance d'une zone de stockage .....	31
2.2.3 Stabilité géodynamique du site .....	33
2.2.3.1 Sismicité .....	33
2.2.3.2 Évolution climatique et géomorphologique passée, et géoprospective .....	36
2.2.4 Hydrogéologie.....	37
2.2.4.1 Caractérisations hydrogéologique et hydrogéochimique du secteur de Meuse/Haute-Marne .....	37
2.2.4.1.1 Hydrogéologie de l'Oxfordien .....	38
2.2.4.1.2 Hydrogéologie du Dogger .....	41
2.2.4.1.3 Hydrogéochimie des aquifères.....	41
2.2.4.2 Modèle conceptuel hydrogéologique .....	44
2.2.4.3 Simulation numérique.....	46
2.3 LA FORMATION HÔTE DU CALLOVO-OXFORDIEN .....	53
2.3.1 Caractéristiques géochimiques.....	53
2.3.2 Caractéristiques hydrodynamiques .....	56
2.3.2.1 Caractéristiques hydrodynamiques « de référence » du Callovo-Oxfordien.....	56
2.3.2.2 Origine et effets possibles des surpressions.....	57
2.3.3 Caractéristiques mécaniques .....	58
2.3.3.1 Comportement mécanique instantané .....	58
2.3.3.2 Comportement mécanique différé.....	61
2.4 CONCLUSION .....	63

<b>3 DÉMARCHE DE SÛRETÉ .....</b>	<b>65</b>
<b>4 DESCRIPTION DES CONCEPTS.....</b>	<b>67</b>
4.1 CONFIGURATION GÉNÉRALE DES INSTALLATIONS.....	67
4.2 LES COLIS DE STOCKAGE ET LES ALVÉOLES DE DÉCHETS B.....	69
4.3 LES COLIS DE STOCKAGE ET LES ALVÉOLES DE DÉCHETS C .....	70
4.4 LES COLIS DE STOCKAGE ET LES ALVÉOLES DE COMBUSTIBLES USÉS .....	71
<b>5 ÉVOLUTIONS DES COMPOSANTS DU STOCKAGE .....</b>	<b>73</b>
5.1 PERTURBATIONS THERMIQUES.....	73
5.2 TRANSITOIRES HYDRIQUES ET DEVENIR DES GAZ .....	78
5.3 PERTURBATIONS MÉCANIQUES.....	83
5.3.1 Définitions .....	83
5.3.2 EDZ initiale .....	83
5.3.3 Effets du chargement thermo-mécanique.....	87
5.3.4 Comportement visco-plastique de la zone endommagée .....	89
5.4 PERTURBATIONS CHIMIQUES .....	91
5.4.1 Évolution des matériaux argileux.....	91
5.4.2 Évolution des matériaux cimentaires .....	94
5.4.3 Corrosion des matériaux métalliques .....	97
5.5 CONCLUSION .....	101
<b>6 ÉVALUATION DE SÛRETÉ EN PHASE DE CONSTRUCTION, D'EXPLOITATION, DE RÉVERSIBILITÉ ET DE FERMETURE .....</b>	<b>102</b>
6.1 FONCTIONNEMENT NORMAL DE L'INSTALLATION .....	103
6.1.1 Organisation des activités de construction, d'exploitation et de fermeture du stockage....	103
6.1.2 Système de ventilation .....	106
6.1.3 Système de transfert et de manutention des colis.....	109
6.1.4 Évaluation dosimétrique .....	116
6.2 ANALYSE DES RISQUES .....	117
6.2.1 Risques d'origine interne.....	117
6.2.1.1 Risques de chute de colis lors de leur manutention .....	117
6.2.1.2 Risques d'incendie et d'explosion .....	119
6.2.1.3 Risques de criticité.....	123
6.2.2 Risques d'origine externe : effets des séismes .....	126
6.3 PHASES DE RÉVERSIBILITÉ .....	127
6.4 CONCLUSION .....	130

<b>7 ÉVALUATION DE SÛRETÉ EN PHASE DE POST-FERMETURE .....</b>	<b>132</b>
7.1 ÉVOLUTION DES PERFORMANCES DE CONFINEMENT DES BARRIÈRES DU STOCKAGE.....	132
7.1.1 Les colis de déchets.....	132
7.1.1.1 Les colis de déchets vitrifiés.....	132
7.1.1.2 Les colis de combustibles irradiés .....	134
7.1.1.3 Les colis de déchets B .....	135
7.1.2 Les conteneurs de déchets.....	139
7.1.2.1 Les compléments de colisage des déchets B .....	139
7.1.2.2 Les conteneurs et surconteneurs de déchets exothermiques.....	139
7.1.3 Les barrières ouvragées argileuses .....	140
7.1.4 La barrière géologique.....	149
7.2 ANALYSE DES RISQUES .....	149
7.2.1 Risques d'origine interne.....	149
7.2.2 Risques d'origine externe : séismes .....	152
7.3 RÔLE DES BARRIÈRES DU STOCKAGE SUR LA SÛRETÉ GLOBALE .....	153
7.3.1 Évaluation des scénarios d'évolution du stockage .....	154
7.3.2 Enseignements de l'évaluation de performance .....	160
7.4 CALCULS D'IMPACT DOSIMÉTRIQUE.....	162
7.5 CONCLUSION .....	168
<b>8 CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>169</b>
<b>ANNEXES TECHNIQUES.....</b>	<b>173</b>
Annexe T1 - Données relatives au modèle d'inventaire des colis de déchets.....	175
Annexe T2 - Analyse statistique réalisée par l'IRSN de la fracturation mineure à inframétrique à l'échelle du secteur .....	179
Annexe T3 - Méthode sismique 3D haute résolution appliquée au site de Tournemire (Aveyron) .....	183
Annexe T4 - Hydrogéologie.....	187
Annexe T5 - Modélisation des interactions béton/argile réalisées par l'IRSN.....	207
Annexe T6 - Valeurs des paramètres retenus par l'ANDRA pour les scénarios d'évolution du stockage .....	219
Annexe T7 - Simulations de la migration de radionucléides réalisées par l'IRSN .....	223
Annexe T8 - Performances de confinement des barrières d'une installation de stockage des déchets radioactifs (BENIPA).....	229
<b>ANNEXES ADMINISTRATIVES .....</b>	<b>233</b>
Liste des documents transmis par l'ANDRA et références bibliographiques .....	237
<i>Les annexes administratives ne sont pas disponibles pour le format informatique du présent rapport.</i>	



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Échelles considérées pour le site de Meuse/Haute-Marne (d'après [5]).	16
Figure 2 - Position des forages ANDRA à l'échelle du secteur [5].	18
Figure 3 - Position des forages ANDRA à l'échelle du laboratoire [5].	18
Figure 4 - Log stratigraphique synthétique (d'après [5]). Nomenclature des différents zonages et faciès au niveau du laboratoire.	20
Figure 5 - Carte géologique du Sud du secteur (d'après [5]).	21
Figure 6 - Structures sur la sismique 3D de Bure (d'après [88]).	27
Figure 7 - Forages FRF EST210 et EST211 [5].	30
Figure 8 - Cartographie de la zone de transposition de l'ensemble des propriétés de confinement de la formation du Callovo-Oxfordien (d'après [5]). Cadre fin noir : Figure 3.	31
Figure 9 - Méthode de calcul utilisée par l'ANDRA pour définir les spectres finaux en surface, identique pour chacun des niveaux SMS et SMPP ; exemple du spectre SMP (niveau SMPP) [95].	34
Figure 10 - Localisation des horizons poreux dans le forage EST201 [12].	39
Figure 11 - Cartes piézométriques de l'Oxfordien mesurée (a) et simulée (b) [5].	47
Figure 12 - Cartes piézométriques du Dogger (Bathonien supérieur et moyen) mesurée (a) et simulée (b) [5].	47
Figure 13 - Évolution possible des trajectoires dans l'aquifère des calcaires oxfordiens du fait de l'évolution géomorphologique [5].	49
Figure 14 - Organisation générale du stockage [1].	68
Figure 15 - Conteneur de stockage standard de déchets B (illustration pour colis de type B2) [1].	69
Figure 16 - Alvéole de stockage de déchets B en configuration d'exploitation (gauche) et scellé (droite) [2].	70
Figure 17 - Principe du surconteneur de déchets C [1].	71
Figure 18 - Alvéole de stockage de déchets C en configuration d'exploitation (gauche) et scellé (droite) [2].	71
Figure 19 - Colis de stockage de grand diamètre, 4 assemblages UOX ou URE [1].	72
Figure 20 - Alvéole de combustibles usés en configuration d'exploitation (gauche) et scellé (droite) [2].	73
Figure 21 - Évolution de la charge thermique des colis vitrifiés [4].	74
Figure 22 - Évolution de la charge thermique des combustibles usés [4].	74
Figure 23 - Charge thermique des différentes zones de stockage [3].	76
Figure 24 - Évolution verticale de la conductivité thermique des argilites du Callovo-Oxfordien mesurée sur les échantillons des forages EST104 et HTM102 [5].	77
Figure 25 - Évolution verticale de la conductivité thermique des argilites du Callovo-Oxfordien mesurée sur les échantillons du forage EST205 [5].	77
Figure 26 - Schéma conceptuel de la zone endommagée (Lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0235).	85
Figure 27 - Fracturation en « chevrons » observée à -490 m et modélisation (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-235).	86
Figure 28 - Contraintes thermo-mécaniques superposées sur une déformée amplifiée 1000 fois [49].	87

Figure 29 - Neutralisation des principales phases cimentaires [59].	96
Figure 30 - Séparation des circuits d'exploitation et de travaux de construction [2].	104
Figure 31 - Principe de ventilation [2].	106
Figure 32 - Principe de ventilation d'une sous-zone de stockage de déchets C [2].	107
Figure 33 - Principe de ventilation d'un alvéole de déchet B [2]. Coupe longitudinale d'un alvéole en attente de scellement (à gauche). Coupe longitudinale et section du fond d'un alvéole vide (à droite).	108
Figure 34 - Système de sécurité du puits de transfert des colis [2].	110
Figure 35 - Transfert d'une hotte de déchets C [2] et accostage de la hotte par la navette sur la tête d'alvéole [32].	111
Figure 36 - Mise en alvéole d'un colis de stockage de déchets B [2]. Rotation et translation du stockeur dans le sas ; manutention du colis à proximité de sa position finale.	113
Figure 37 - Mise en alvéole d'un colis de stockage de déchets C [2]. Principe de fonctionnement du robot pousseur et illustration du processus d'extraction de la hotte et de mise en place du colis dans l'alvéole.	113
Figure 38 - Mise en alvéole d'un colis de stockage de combustibles usés (type CU1) [2]. Schématisation d'un aéroporteur et principe de fonctionnement des coussins d'air.	114
Figure 39 - Perméabilité longitudinale équivalente des scellements de puits « <i>estimation prudente</i> » [30].	143
Figure 40 - Modèle schématique de fonctionnement d'une saignée mince [30].	144
Figure 41 - Perméabilité équivalente des scellements de galerie à coupures hydrauliques [30].	144
Figure 42 - Schéma de représentation des principales évolutions chimiques d'un bouchon d'alvéole de combustibles usés et d'un scellement de galerie [54].	147
Figure 43 - Exutoires « à l'actuel » et « à 1 Ma » retenus pour les évaluations d'impact [75].	163

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Nombre et activité des colis à la mise en stockage synthétisés et volume estimé par l'IRSN à partir des données du modèle d'inventaire ([6] et lettre ANDRA/DSQE/DIR/03-210 du 25 novembre 2003).....	13
Tableau 2 - Forages ANDRA. ....	17
Tableau 3 - Exutoires et temps de transfert obtenus par les modélisations ANDRA [5] [75] [109].....	51
Tableau 4 - Résultats du calage IRSN. ....	52
Tableau 5 - Détermination semi-quantitative de la composition minéralogique moyenne de l'ensemble du Callovo-Oxfordien [13].....	54
Tableau 6 - Compositions chimique de l'eau interstitielle des argilites du Callovo-Oxfordien au droit du laboratoire et exemple des incertitudes [50]. ....	55
Tableau 7 - Valeurs de coefficient de diffusion effective et de porosité des argilites du Callovo-Oxfordien et plages de variations associées [13].....	56
Tableau 8 - Découpage du Callovo-Oxfordien en unités mécaniquement homogènes [5]. ....	59
Tableau 9 - Flux annuels de colis et ordres de grandeur de durée de mise en stockage [2]. ....	69
Tableau 10 - Ordre de grandeur des masses de fer, des moles d'hydrogène produites et des volumes occupés pour un alvéole représentatif des différents types de déchets [3]. ....	81
Tableau 11 - Extensions de l'EDZ initiale [3]. ....	84
Tableau 12 - Éléments de dimensionnement des (sur)conteneurs de déchets exothermiques et du chemisage d'un alvéole de stockage. ....	97
Tableau 13 - Vitesses de corrosion en stockage des alliages métalliques présents dans les déchets retenues par l'ANDRA [7]. ....	136
Tableau 14 - Débits de dose maximum calculés par l'ANDRA à l'exutoire Saulx pour le scénario d'évolution normale [4]. ....	155
Tableau 15 - Exutoires et temps de transfert estimés au moyen du modèle hydrogéologique utilisé pour les évaluations d'impact [74] [75]. ....	164



Par lettre DGSNR/SD3/n°0525 du 5 août 2005 (cf. Annexe A1 du présent rapport), le Directeur général de la sûreté nucléaire et de la radioprotection demande au Président du groupe permanent d'experts pour les installations destinées au stockage à long terme des déchets radioactifs (GPD), l'avis et les recommandations du groupe d'experts qu'il préside sur la version préliminaire du Dossier 2005 Argile transmis par lettre ANDRA-DG/05-0125 du 3 juin 2005, relatif à l'évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. La lettre DGSNR/SD3/n°0525 précitée précise que cet examen devra notamment permettre de se prononcer sur :

- « les points critiques pour la sûreté d'un éventuel stockage dans la couche d'argile étudiée au moyen du laboratoire souterrain de Bure, au stade actuel des connaissances ;
- l'identification et la prise en compte des incertitudes dans l'analyse de sûreté de l'ANDRA ;
- les conclusions qu'elle tire des deux points précédents quant aux recherches et travaux qu'il conviendrait de poursuivre ou d'engager pour être en mesure de statuer à l'avenir, si une décision de principe sur le stockage géologique était prise par le Parlement en 2006, sur la possibilité de mise en oeuvre industrielle d'une installation de stockage sûre dans cette couche d'argile ».

Enfin, la lettre DGSNR/SD3/n°0525 précitée indique que cet examen devra « tenir compte plus particulièrement des objectifs fixés par la RFS III.2.f et des points importants de l'analyse de sûreté qui ont été mis en évidence lors des différentes réunions du groupe permanent organisées entre 2000 et 2004 et repris dans les lettres de suite ».

## **1 AVANT-PROPOS**

Dans le présent rapport l'IRSN évalue le Dossier 2005 Argile que l'ANDRA a établi dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 relative à la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue.

Les études et recherches de l'ANDRA ont été synthétisées en plusieurs étapes ponctuées par l'élaboration de trois dossiers principaux : un Dossier de demande d'autorisation d'installer et d'exploiter un laboratoire souterrain sur le site de Bure, le Dossier 2001 Argile qui constitue un rapport intermédiaire relatif à la faisabilité d'un stockage en formation géologique profonde en couche argileuse sur ce site et le Dossier 2005 Argile. Les deux premiers dossiers ont fait l'objet d'évaluations par l'IRSN, présentées respectivement le 24 mars 1997 et le 24 juin 2003 devant le groupe permanent « déchets ».

Par ailleurs, des rapports intermédiaires (options initiales de conception, référentiels géologiques et modélisation hydrogéologique, programme de recherche et d'investigation, comportement mécanique d'un stockage, phénomènes géochimiques régissant le relâchement et le transport de radionucléides) ont également fait l'objet d'évaluations par l'IRSN présentées devant le groupe permanent « déchets » et ont permis d'analyser en détail de nombreux travaux qui constituent des éléments de base du Dossier 2005 Argile. L'historique des principales remarques et demandes formulées par la DGSNR à la suite de ces différents examens est rappelée en Annexe A2 du présent rapport. Le récapitulatif du déroulement de l'instruction du Dossier 2005 Argile (transmission des documents, réunions techniques...) est présenté dans l'Annexe A3 du présent rapport.

L'évaluation par l'IRSN du Dossier 2005 Argile s'appuie en grande partie sur les analyses précédemment réalisées. Le présent rapport n'a pas vocation à rappeler le détail de ces analyses mais en intègre les résultats en vue de présenter de manière synthétique les points saillants relatifs à la sûreté d'une éventuelle installation de stockage dans la formation argileuse étudiée dans le laboratoire souterrain de Bure.

Dans l'objectif qui vient d'être mentionné, l'IRSN a organisé son évaluation de la manière suivante :

- les données de bases constitutives du Dossier 2005 Argile sont examinées en premier lieu, en particulier pour ce qui concerne l'état des connaissances relatif, d'une part à l'inventaire des colis de déchets, d'autre part aux caractéristiques générales du site (caractéristiques géologique, géodynamique et hydrogéologique du site de Meuse/Haute-Marne ; caractéristiques géochimiques, hydrodynamiques et mécaniques de la formation hôte du Callovo-Oxfordien). Les conclusions que l'ANDRA établit à partir de ces dernières données sur les propriétés de confinement de la formation hôte sont également examinées (chapitre 2 du présent rapport) ;
- la démarche de conception d'un stockage et de sûreté mise en œuvre par l'ANDRA à partir de ces données de base est ensuite évaluée (chapitre 3) ;
- après une description des concepts de stockage envisagés par l'ANDRA pour ce qui concerne les différentes catégories de déchets B, C et de combustibles usés (chapitre 4), les principales perturbations (thermiques, hydriques, mécaniques et chimiques) susceptibles d'affecter l'ensemble des différents composants du stockage pendant la phase d'exploitation et après sa fermeture sont analysées (chapitre 5) ;
- l'IRSN évalue ensuite, au vu de l'ensemble des points précédents, les éléments présentés par l'ANDRA sur la sûreté d'une éventuelle installation de stockage durant sa phase d'exploitation (chapitre 6). Cette évaluation traite en particulier des conditions de fonctionnement de l'installation et de réversibilité du stockage ;
- enfin, l'IRSN évalue, pour la phase de post-fermeture, les éléments du Dossier 2005 Argile relatifs à l'évolution des performances de confinement des composants du stockage et à leur influence sur la sûreté d'ensemble de l'installation. Les facteurs influençant l'impact dosimétrique que le stockage est susceptible de délivrer sont également examinés (chapitre 7).

L'IRSN présente, sur la base de ces différents éléments ses conclusions sur la faisabilité d'un stockage dans les formations argileuses et sur les points qu'il serait nécessaire d'approfondir dans l'éventualité d'une poursuite d'un projet de stockage géologique dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien (chapitre 8).

## **2 LES DONNÉES DE BASE**

### **2.1 MODÈLE D'INVENTAIRE DES COLIS DE DÉCHETS**

Le modèle d'inventaire utilisé par l'ANDRA pour les études de faisabilité du stockage, décrit dans le document en référence [6], a été élaboré afin de disposer de données simplifiées relatives aux colis de déchets et de combustibles irradiés. À cette fin, l'ANDRA a défini des « *colis types* » théoriques sur la base des données, recueillies auprès des producteurs, relatives :

- aux différents colis de déchets existants,
- aux colis de déchets et de combustibles irradiés susceptibles d'être produits à partir des combustibles irradiés existants et des déchets existants non conditionnés (ou à reconditionner),
- aux colis de déchets et de combustibles irradiés susceptibles d'être produits à partir des combustibles irradiés déchargés dans le futur.

Ces données servent à définir les caractéristiques physico-chimiques, radioactives, géométriques et thermiques des « colis types ». Des marges sont prises par l'ANDRA par rapport aux données des producteurs, par exemple sur les prévisions du nombre de colis de déchets B à produire. Par ailleurs, pour la plupart des « colis-types » comprenant plusieurs familles de caractéristiques différentes, l'ANDRA a reconstitué un inventaire dit « nominal » en retenant, pour valeur d'activité de chaque radionucléide, la valeur maximale rencontrée parmi les inventaires radiologiques moyens des différentes familles. Par ailleurs, l'ANDRA a procédé, en suivant la même approche, à un premier inventaire quantitatif des espèces chimiques susceptibles d'être relâchées par les colis, en particulier des espèces agressives, toxiques et complexantes.

Pour tenir compte de l'ensemble des colis de déchets et de combustibles irradiés, existants et futurs, susceptibles d'être stockés, l'ANDRA fait l'hypothèse du fonctionnement du parc électronucléaire actuel sur une période de quarante ans (58 réacteurs, 400 TWh/an, 45 000 tmlt déchargées), auxquels s'ajoutent les déchets produits par l'amont et l'aval du cycle (usines COGEMA), les déchets des centres de recherches et ceux de la propulsion nucléaire (CEA) (voir Annexe T1).

Par ailleurs, l'ANDRA a estimé les déchets produits dans le cadre de quatre scénarios de traitement des combustibles irradiés. L'ANDRA fait l'hypothèse d'un traitement de l'ensemble des combustibles produits (scénario S1A), étudie le cas où seuls les MOX ne sont pas traités et où les déchets vitrifiés possèdent des puissances thermiques plus ou moins élevées (environ 1 100 W dans le scénario S1B et environ 900 W dans le scénario S1C) et, enfin, considère le stockage direct de la majorité des combustibles déchargés (scénario S2). Selon l'ANDRA, ces scénarios permettent d'examiner la capacité d'une architecture de stockage à s'adapter à différents modes de gestion envisageables de l'aval du cycle électronucléaire. Le nombre, le volume, l'inventaire radiologique et la puissance thermique des « colis types » estimés par l'ANDRA selon ces 4 scénarios de traitement du combustible sont présentés dans le Tableau 1.

INVENTAIRE DES COLIS	SCÉNARIO S1A			SCÉNARIO S1B			SCÉNARIO S1C			SCÉNARIO S2		
	Nombre	Volume* (m <sup>3</sup> )	Activité (Bq)	Nombre	Volume* (m <sup>3</sup> )	Activité (Bq)	Nombre	Volume* (m <sup>3</sup> )	Activité (Bq)	Nombre	Volume* (m <sup>3</sup> )	Activité (Bq)
COMBUSTIBLES	0	0	0	5 400	10 800	9,7E+18	5 400	10 800	9,7E+18	17 500	102 500	9,5E+19
DÉCHETS VITRIFIÉS	36 320	6 330	7,9E+19	36 220	6 320	8,7E+19	42 470	7 410	9,9E+19	14 680	2 550	3,1E+19
DÉCHETS « B »	195 420	78 890	7,2E+18	192 720	78 400	6,8E+18	192 720	78 400	6,8E+18	163 870	70 870	3,1E+18
TOTAL	231 740	85 220	8,6E+19	234 340	95 520	1,0E+20	240 590	96 610	1,2E+20	196 050	175 920	1,3E+20

\* Volume des colis primaires pour les déchets de type B et C et volume des colis de stockage pour les combustibles irradiés

Tableau 1 - Nombre et activité des colis à la mise en stockage synthétisés et volume estimé par l'IRSN à partir des données du modèle d'inventaire ([6] et lettre ANDRA/DSQE/DIR/03-210 du 25 novembre 2003).

L'IRSN considère que l'ANDRA a effectué un travail important pour élaborer le modèle d'inventaire utilisé dans le Dossier 2005 Argile. Ce modèle apparaît, au stade actuel, suffisant pour évaluer la faisabilité d'un stockage, dans la mesure où il permet d'estimer l'ordre de grandeur, d'une part du nombre et du volume des déchets générés dans le cadre des hypothèses évoquées précédemment (fonctionnement du parc actuel), d'autre part des caractéristiques des colis importantes pour la conception d'une installation de stockage, notamment des caractéristiques thermiques et radiologiques. L'IRSN souligne toutefois que, même si des marges ont été prises par l'ANDRA dans l'estimation de l'inventaire par rapport aux prévisions des producteurs, il est difficile de se prononcer sur son caractère enveloppe. En effet, les conditions d'exploitation du parc

(augmentation de la production d'énergie, mise en œuvre de nouveaux combustibles, allongement de la durée de vie des centrales...) et les modes de conditionnement des déchets (spécifications de production, développement de nouveaux types de colis...) sont susceptibles d'évoluer. L'ANDRA a anticipé ces évolutions de conditionnement en fonction des informations fournies par les producteurs, cependant, ces développements industriels sont encore sujets à de larges incertitudes. Ce point concerne notamment la production éventuelle par COGEMA de colis de déchets vitrifiés ou bitumés selon de nouvelles spécifications permettant, par rapport aux opérations actuelles, d'augmenter notablement l'activité par colis (augmentation de la borne curium des déchets vitrifiés, vitrification des solutions issues du traitement de combustibles MOX, conditionnement par bitumage des boues STE2). Pour ce qui concerne les scénarios de gestion future des combustibles envisagés par EDF (augmentation du taux de combustion moyen) et leurs variantes, il convient de noter que l'ANDRA, considérant comme « hypothétique » la mise en œuvre par EDF de gestions de combustibles entraînant leur irradiation au-delà de  $60 \text{ GW.j.t}^{-1}$  (4,95 % d'enrichissement en  $^{235}\text{U}$ ), gestion dite « HTC2 », ne l'a pas prise en considération dans son inventaire [6]. Toutefois, il faut souligner que les assemblages dits « MOX parité », pris en considération par l'ANDRA, sont pénalisants du point de vue de la puissance thermique par rapport aux combustibles « HTC2 ». On peut également noter que la production de déchets de réacteurs de type EPR n'est pas prise en considération dans l'inventaire. Aussi, en cas de poursuite d'un projet de stockage en couche géologique argileuse après les échéances fixées par la Loi du 30 décembre 1991, il importera que l'ANDRA vérifie périodiquement l'adéquation entre les hypothèses du modèle d'inventaire et les autorisations délivrées aux producteurs en termes de production et de conditionnement de déchets. En vue du dimensionnement définitif de la future installation de stockage, il importera également que les principales incertitudes affectant les prévisions de production des déchets et les caractéristiques des colis soient présentées.

## 2.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE, GÉODYNAMIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DU SITE DE MEUSE/HAUTÉ-MARNE

La connaissance de la barrière géologique du Callovo-Oxfordien s'acquiert au travers de l'étude géologique de la formation, et du contexte géologique, géodynamique et hydrogéologique du site, à une échelle englobant les exutoires potentiels des eaux susceptibles d'être affectée par d'éventuels relâchements provenant d'une installation localisée dans la formation argileuse.

Après une introduction spécifiant la terminologie utilisée dans ce rapport et rappelant l'historique des investigations menées par l'ANDRA sur le site de Meuse/Haute-Marne, ce chapitre est consacré (1) à l'analyse du contexte géologique à l'échelle du secteur puis du laboratoire, (2) à l'estimation de la stabilité géodynamique future du site sur la base d'une étude de la géodynamique passée, en termes de sismicité, de géomorphologie et de climat, et enfin (3) à l'examen du contexte hydrogéologique du site de Meuse/Haute-Marne et de sa modélisation.

## 2.2.1 INTRODUCTION

### 2.2.1.1 Terminologie

En règle générale, la nomenclature retenue par l'ANDRA pour désigner les différentes échelles d'investigation des contextes géologiques et hydrogéologiques du site de Bure, les structures tectoniques et leurs directions, est utilisée dans le présent rapport.

L'« **échelle régionale** » désigne l'ensemble du bassin de Paris et englobe les échelles suivantes (Figure 1).

L'« **échelle du secteur** » comprend :

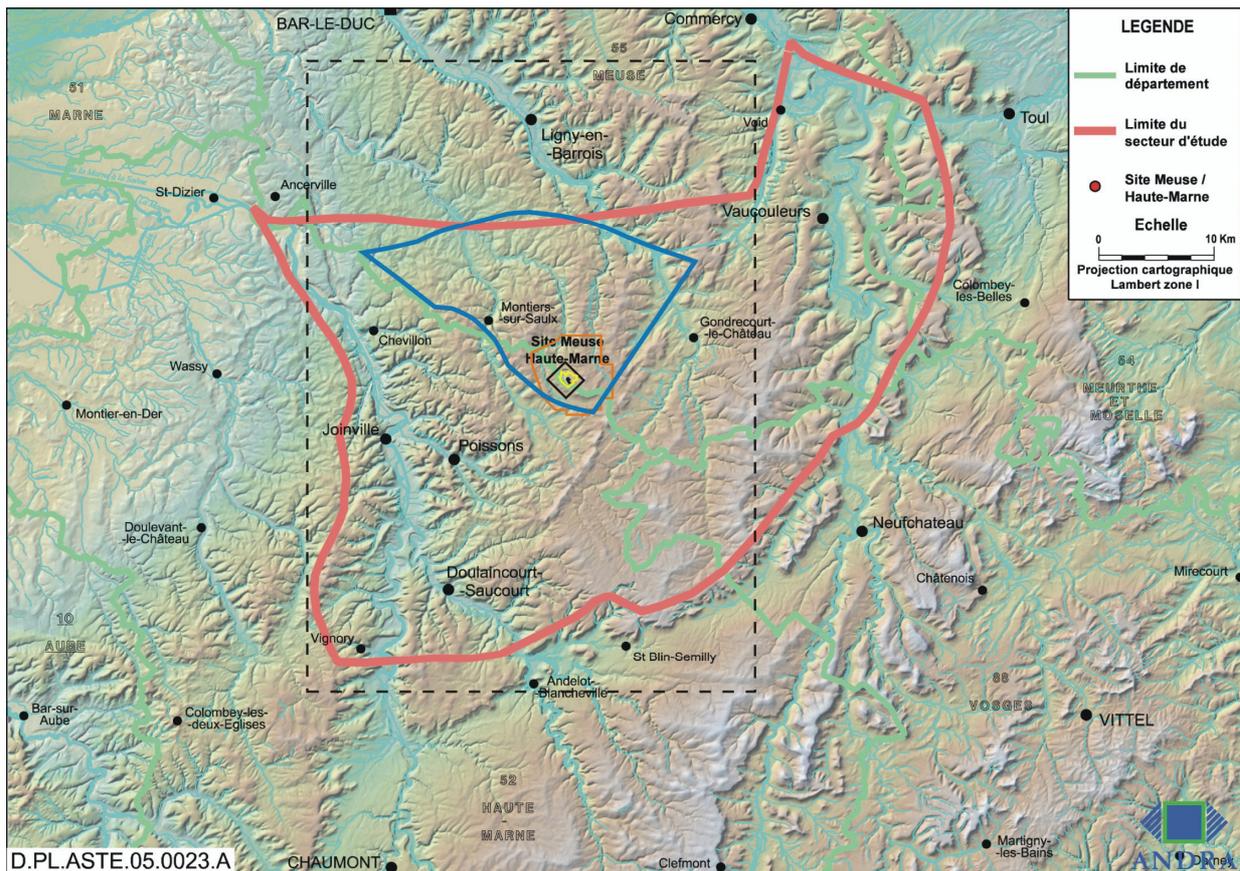
- à l'Ouest les failles de la Marne, à l'Est les failles de Gondrecourt et les affleurements de l'Oxfordien calcaire, au Sud la rive gauche du Rognon, et au Nord la flexure d'Aulnois-en-Perthois ;
- le périmètre de protection rapprochée défini dans le dossier de demande d'autorisation d'installation et d'exploitation d'un laboratoire sur le site de l'Est DAIE (1996) ;
- le périmètre de droit exclusif de l'ANDRA.

L'« **échelle locale** » correspond à la zone délimitée par le laboratoire.

La « **zone de transposition** » est définie comme la zone du secteur dans laquelle les données acquises dans le laboratoire souterrain peuvent être transposées.

Pour ce qui concerne les objets structuraux pouvant être rencontrés lors des investigations :

- une diaclase désigne une fracture sans indice de mouvement, aux bords jointifs à l'œil nu ;
- une fente de tension désigne une fracture initialement ouverte dans la direction de la contrainte tectonique horizontale mineure, dont l'ouverture est colmatée ou non par des cristaux ou des sédiments ;
- un joint stylolitique désigne une discontinuité formée par pression-dissolution, sous l'effet de la compaction des terrains (joint horizontal) ou de contraintes tectoniques (joint oblique ou vertical) ;
- une faille désigne une fracture formée par cisaillement (mouvement relatif de ses bords), quelle que soit sa dimension. Elle est dite :
  - « **principale** » (ou régionale) lorsqu'elle présente un rejet vertical de plus de 10 m et/ou une extension horizontale de plus de 10 km,
  - « **secondaire** » si elle présente un rejet vertical de 5 à 10 m et/ou une longueur de 1 à 10 km,
  - « **mineure** » si elle a un rejet vertical de moins de 5 m et/ou une longueur de moins de 1 km.



**Figure 1 - Échelles considérées pour le site de Meuse/Haute-Marne (d'après [5]).**  
 En rouge : secteur ; en bleu : zone de transposition ; en orange : périmètre de protection rapprochée (DAIE de 1996) ; en trait noir : emprise de la sismique 3D ; en jaune : périmètre de droit exclusif de l'ANDRA ; point noir : échelle locale (laboratoire). Cadre en pointillés noirs : Figure 2 (cf. infra).

L'ANDRA désigne l'ensemble des failles de moins de 1 m de rejet vertical et/ou d'une longueur inférieure à l'hectomètre par le terme de « microfailles ». Pour les différents objets structuraux au sein de cette famille, l'IRSN préfère dans la suite de ce rapport les qualifier par leur longueur : failles « plurimétriques », « inframétriques »... Enfin, l'IRSN inclut les failles décrochantes (rejet vertical quasiment nul) dans cette nomenclature en considérant leur extension horizontale.

Dans le présent rapport, l'IRSN intitule les orientations des structures et des contraintes tectoniques de la manière suivante : E-W (lire Est-Ouest, N080-100°), N-S (Nord-Sud, N170-010°), NW (Nord-Ouest/Sud-Est, N130-140°), NE (Nord-Est/Sud-Ouest, N040-050°), ENE (Est-Nord-Est/Ouest-Sud-Ouest, environ N060°), WNW (Ouest-Nord-Ouest/Est-Sud-Est, environ N120°), NNE (Nord-Nord-Est/Sud-Sud-Ouest, environ N030°), et NNW (Nord-Nord-Ouest/Sud-Sud-Est, environ N150°).

### 2.2.1.2 Investigations géologiques réalisées par l'ANDRA

La cartographie géologique, réalisée initialement par l'ANDRA en 1994, couvrait une surface de 700 km<sup>2</sup>. Cette cartographie s'appuyait sur des observations classiques de terrain, des analyses géomorphologiques et les données des campagnes sismiques pétrolières réalisées entre 1978 et 1989. Entre 1994 et 1997, 34 profils du Bassin Houiller Sarro-Lorrain ont été retraités et calés sur 11 forages, quatre forages de reconnaissance géologique dont deux profonds (forés au moins jusqu'au Dogger) et carottés ont été réalisés dans le secteur, et trois forages de reconnaissance géologique ont été réalisés dans l'emprise du laboratoire (Tableau 2).

Forage	Année	Type	Implantation	Formation atteinte	Longueur	Caractéristiques	
HTM102	1994	Pétrolier	Cirfontaines-en-Ornois	Lias	1101	sub-horizontale, carotté	
HTM105	1994	Pétrolier	Cirfontaines-en-Ornois	Kimméridgien	102	sub-horizontale	
MSE101	1994	Pétrolier	Morley	Bajocien	922	sub-horizontale, carotté	
EST103	1995	(SPH)	laboratoire	Dogger	526	sub-horizontale	
EST104	1996	(SPH)	laboratoire	Callovo-Oxfordien	530	sub-horizontale	
EST106	1996		laboratoire	Kimméridgien	150	sub-horizontale	
EST107	1996		Cirfontaines-en-Ornois	Callovo-Oxfordien	425	sub-horizontale	
EST201	2000	SPH	laboratoire	Dogger	410	sub-horizontale	
EST202	2000	SPH	Lot2	laboratoire	150	sub-horizontale	
EST203	2000	SPH		laboratoire	Oxfordien	410	sub-horizontale
EST204	2000	avant PPA	Lot3	laboratoire	508	sub-horizontale, carotté	
EST205	2000	avant PAX		laboratoire	Callovo-Oxfordien	510	sub-horizontale, carotté
EST206	2000	SPH	Lot2	laboratoire	55	sub-horizontale	
EST207	2004	FRF	UP3	laboratoire	575	sub-horizontale	
EST208	2004	FRF		laboratoire	Callovo-Oxfordien	488	sub-horizontale
EST209	2004	FRF	UP2	laboratoire	800	oblique, carotté	
EST210	2004	FRF	UP1	laboratoire	1088	oblique, carotté	
EST211	2004	FRF		laboratoire	Callovo-Oxfordien	921	oblique, carotté
EST212	2003	FRF		laboratoire	Callovo-Oxfordien	536	sub-horizontale
EST311	2003	FSP	F1	Demange-aux-eaux	379	sub-horizontale	
EST312	2003	FSP		Demange-aux-eaux	Dogger	612	sub-horizontale
EST313	2003	FSP		Demange-aux-eaux	Oxfordien	115	sub-horizontale
EST321	2003	FSP	F2	Montreuil-sur-Thonnance	491	sub-horizontale	
EST322	2003	FSP		Montreuil-sur-Thonnance	Dogger	710	sub-horizontale
EST331	2003	FSP	F3	Cirfontaines-en-Ornois	335	sub-horizontale	
EST342	2003	FSP		Nomécourt	748	sub-horizontale	
EST351	2003	FSP	F5	Effincourt	502	sub-horizontale	
EST361	2004	FRF	UP2	Saudron (laboratoire)	1494	oblique, carotté	
EST362	2004	SPH		Saudron (laboratoire)		sub-horizontale	
EST363	2004	FRF	UP2	Saudron (laboratoire)	535	sub-vertical	

Tableau 2 - Forages ANDRA.

En 1999, une campagne de sismique 3D d'environ 4 km<sup>2</sup>, dont les premiers résultats ont été présentés en 2001, a contribué à préciser la connaissance de la géologie à l'échelle locale.

En 2000, l'ANDRA a engagé des recherches cartographiques, structurales et microtectoniques complémentaires, sur un périmètre d'environ 350 km<sup>2</sup> au Sud du laboratoire [85]. La méthode de cartographie des failles combine l'analyse des profils sismiques 2D préexistants, l'analyse morphostructurale et les observations lithologiques et structurales sur le terrain. Sept forages hydrogéologiques et géochimiques ont servi au suivi de la perturbation hydraulique (forages SPH) due au creusement des puits : deux préexistants, quatre réalisés en 2000 dans l'emprise du laboratoire, et un réalisé en 2004 à proximité du laboratoire (Tableau 2 et Figure 3).

En 2003, les résultats de la sismique 3D de 1999 ainsi que six profils sismiques 2D de 1994-1997 ont été retraités, et le modèle structural a été consolidé par une réinterprétation de l'ensemble des sections sismiques 2D, ce qui a permis une mise en cohérence du tracé cartographique des failles avec leur géométrie profonde [93]. Sept nouveaux « forages scientifiques profonds » (FSP) ont également été réalisés (Tableau 2 et Figure 2), afin notamment de reconnaître l'hydrogéologie du secteur. En 2003-2004, huit « forages de reconnaissance de la formation » (FRF) dont quatre obliques ont été creusés pour préciser la géologie et l'hydrogéologie, et améliorer la caractérisation géomécanique de la formation hôte, (Tableau 2 et Figure 3) dans l'emprise du périmètre de droit exclusif de l'ANDRA (Figure 1).

Enfin, les puits d'accès principal (PPA) et auxiliaire (PAX) du laboratoire ont été réalisés entre 2000 et 2004. Une niche a été creusée à 445 m de profondeur en 2004 à partir du PPA et des galeries sont en cours de construction à partir du PAX à 490 m de profondeur.

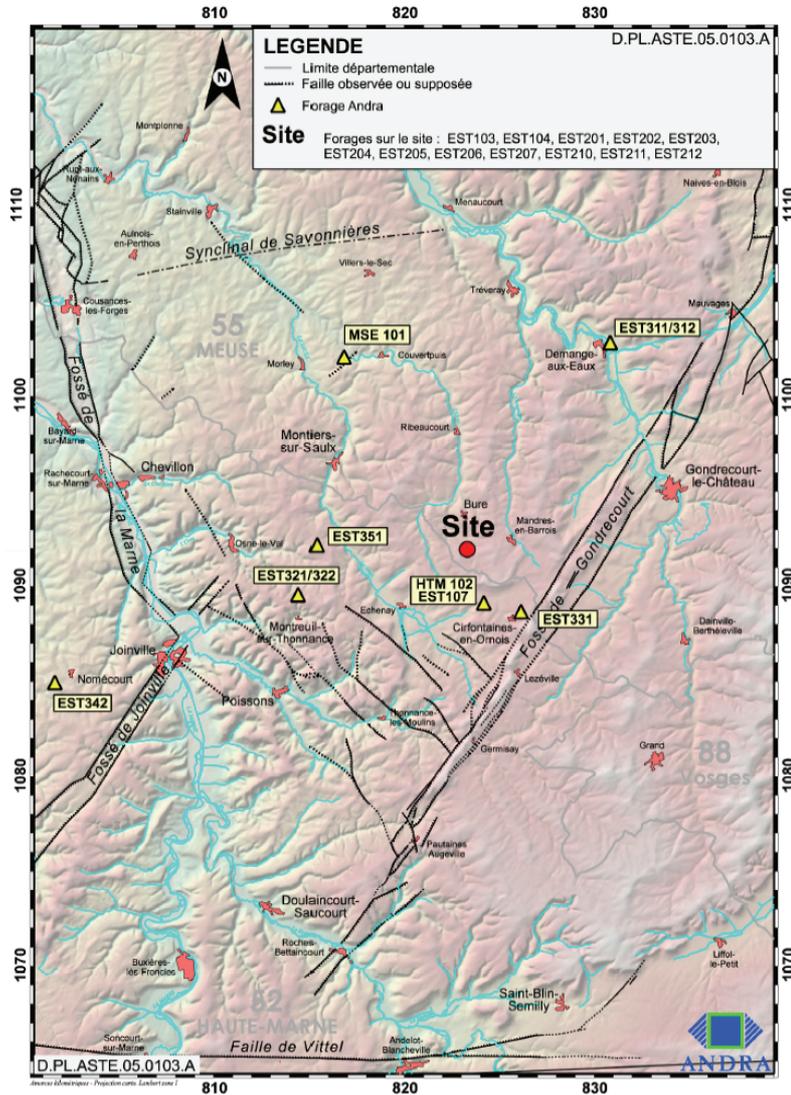


Figure 2 - Position des forages ANDRA à l'échelle du secteur [5].

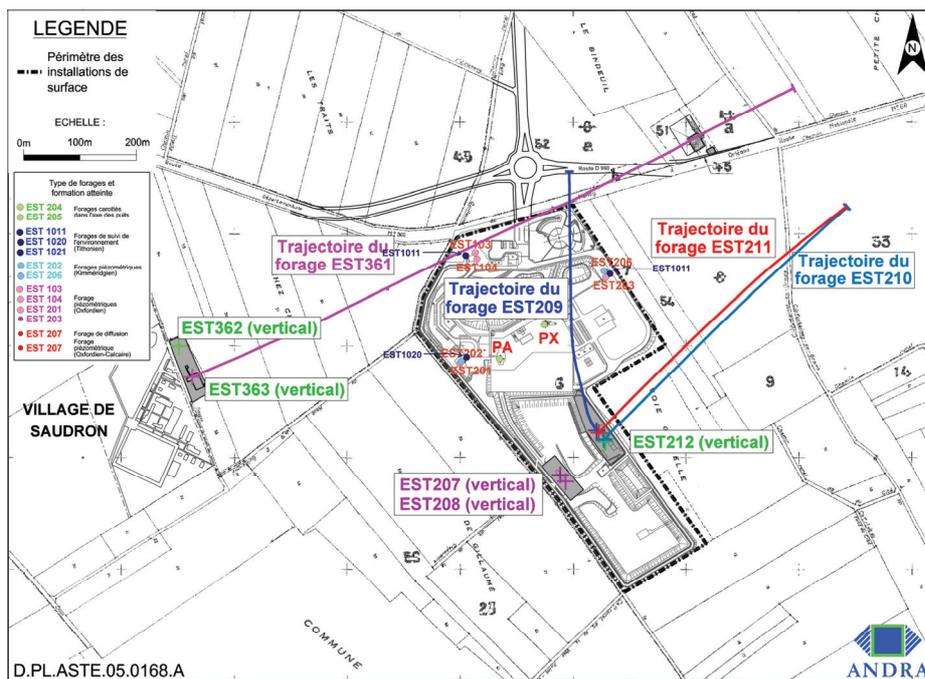


Figure 3 - Position des forages ANDRA à l'échelle du laboratoire [5].

## 2.2.2 GÉOLOGIE

L'analyse par l'IRSN de la géologie du site de Meuse/Haute-Marne est structurée en quatre parties :

- les propriétés des formations géologiques du site et leur potentiel en ressources naturelles,
- l'évaluation des connaissances relatives au cadre géologique à l'échelle du secteur, comprenant la reconstitution des paléocontraintes et la caractérisation des structures principales et secondaires,
- l'évaluation des connaissances à l'échelle du laboratoire comprenant les structures sédimentaires et tectoniques locales,
- les conditions d'extrapolation de ces connaissances à l'échelle de la zone dite de transposition.

### 2.2.2.1 Les formations géologiques du secteur de Meuse/Haute-Marne

La formation du Callovo-Oxfordien, située à environ 490 m de profondeur, est localisée stratigraphiquement entre deux formations calcaires « encaissantes », le Dogger en dessous, surmontant le Lias argileux, le Trias salifère et le Paléozoïque, et l'Oxfordien au-dessus, qui est surmonté par les marnes du Kimméridgien et les calcaires du Barrois (Figure 4).

La formation du Callovo-Oxfordien, dont l'ANDRA [5] a reconstitué la géométrie 3D à partir des données de forages (Tableau 2) et de sismique 2D et 3D, présente une épaisseur de 110 à 160 m dans le secteur. Les séquences inférieure (C2b) (cf. Figure 4) et médiane (C2c) s'approfondissent et s'épaississent vers le Nord. La séquence supérieure (C2d), se terminant avec la mise en place de la plateforme carbonatée sus-jacente, s'amincit légèrement vers le Nord, alors qu'elle montre un léger épaississement à l'intersection de la terminaison méridionale du système de failles de Metz avec les failles de la Marne (Figure 5). Cet épaississement peut indiquer un jeu synsédimentaire ténu de ces failles [147]. La formation du Callovo-Oxfordien est décalée par les failles de Poissons, de Gondrecourt et de Joinville (Figure 5). Entre ces failles, l'ANDRA considère que la formation du Callovo-Oxfordien présente une grande homogénéité lithologique, qu'elle explique par des conditions calmes de dépôt des argilites.

L'IRSN remarque que les investigations réalisées confortent ses appréciations antérieures, détaillées dans le rapport DES n° 393 présenté les 3 octobre et 7 novembre 2001 lors des réunions du groupe permanent « déchets » consacrées à l'examen du référentiel géologique du site de Bure, et dans le rapport DSU n° 32 présenté le 8 juin 2004 lors de la réunion du groupe permanent « déchets » consacrée à l'examen des phénomènes géochimiques dans un stockage en formation géologique sur le site de Bure, à savoir que la formation hôte présente, en l'état actuel des connaissances, une « *continuité latérale remarquable des principaux niveaux repères au sein de la formation hôte argilo-carbonatée* » (rapport DES n° 393).

L'IRSN considère également que les données sédimentologiques, minéralogiques et pétrographiques apportées par l'ANDRA sur les formations calcaires encaissantes confortent son avis émis lors de l'analyse du référentiel géologique de 1999 selon lequel ces « *formations sédimentaires présentent une certaine variabilité lithologique horizontale qui a des conséquences sur la variabilité des propriétés physiques des roches* » (rapport DES n° 393 précité). La variabilité lithologique, et en particulier la géométrie des horizons poreux (chapitre 2.2.4.1 du présent rapport), est essentiellement liée aux conditions de dépôt des sédiments. L'ANDRA [5] a développé des reconstitutions paléogéographiques des environnements de dépôts des formations encaissantes que l'IRSN estime être d'une grande qualité, et qui permettent d'extrapoler, à partir des données acquises, la répartition des lithologies pour ces formations.

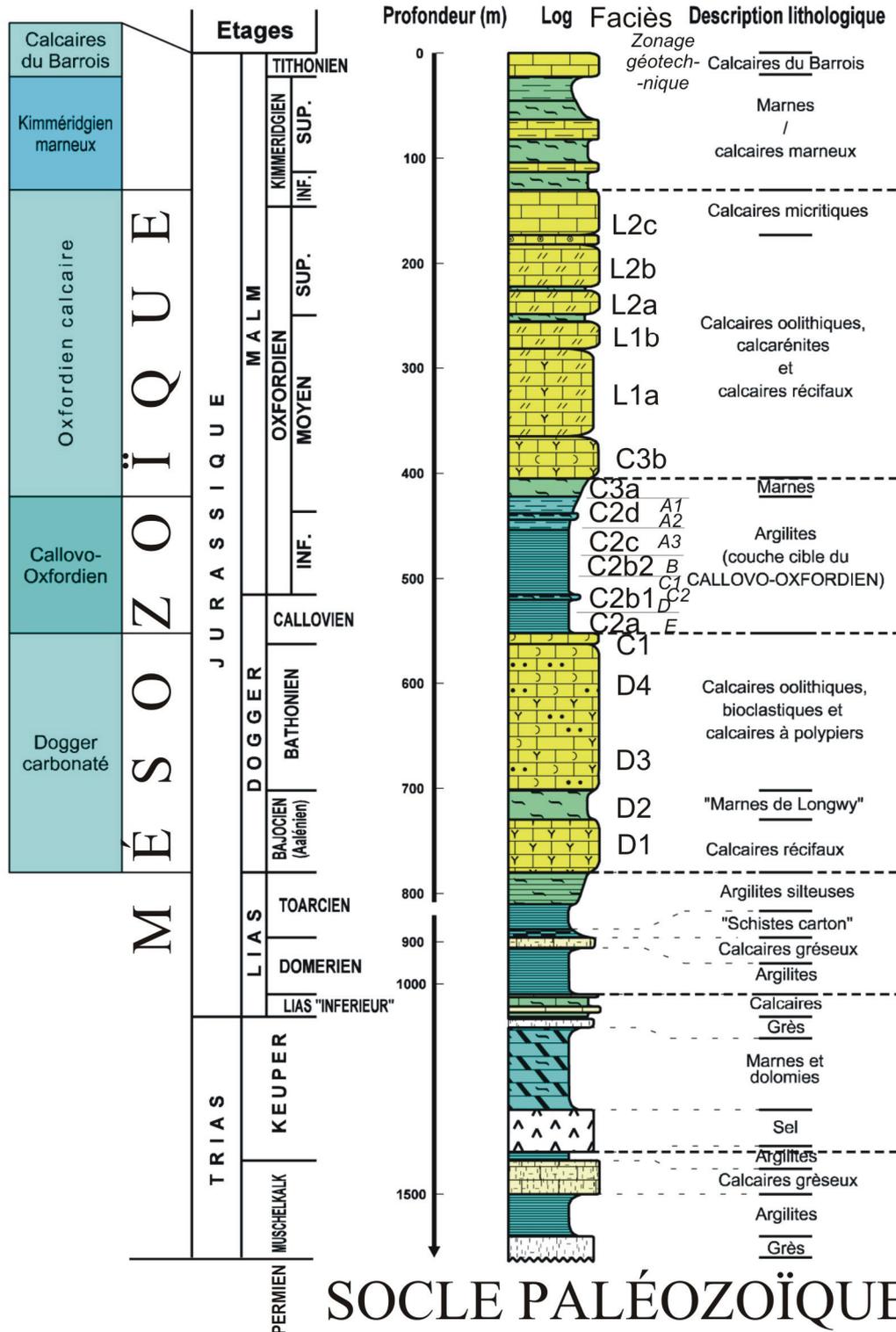
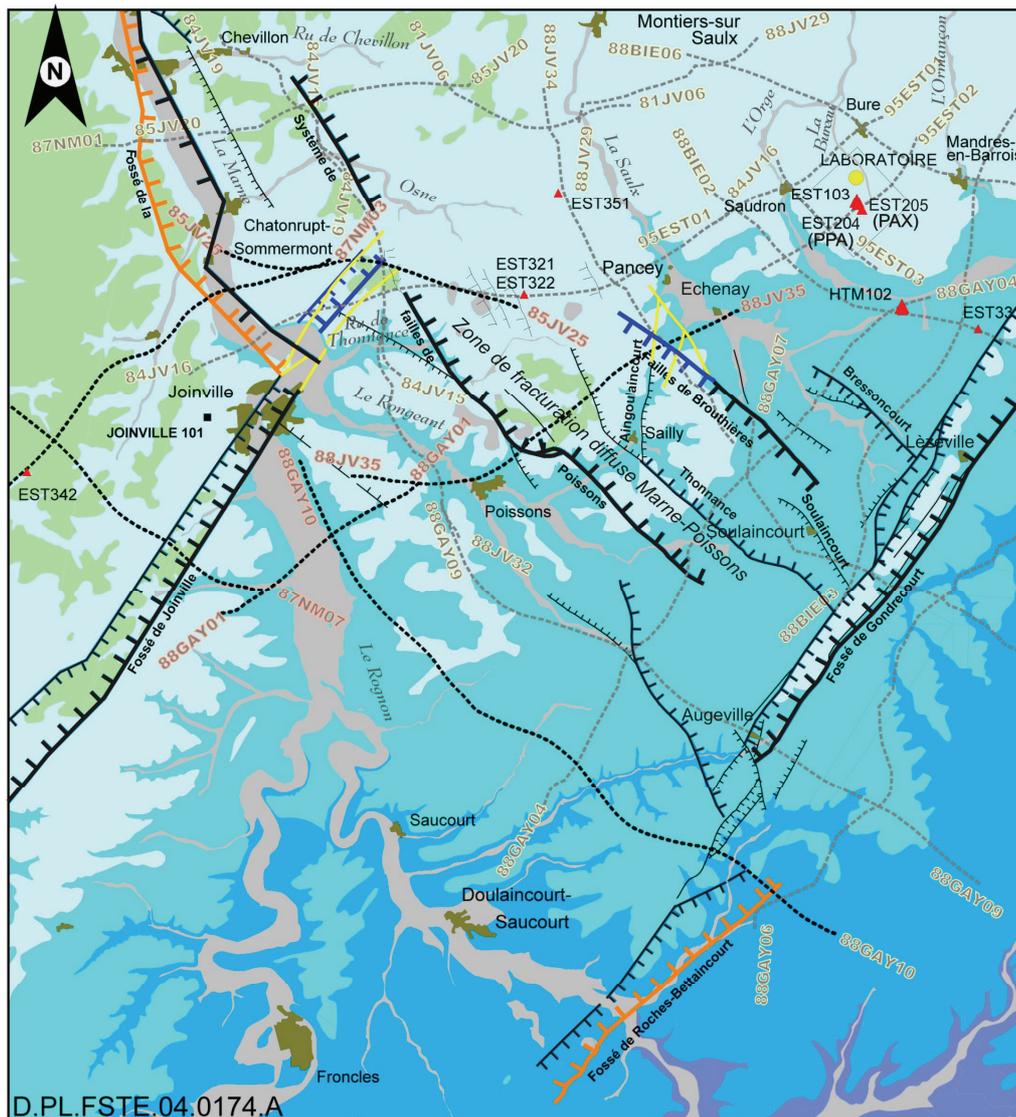


Figure 4 - Log stratigraphique synthétique (d'après [5]). Nomenclature des différents zonages et faciès au niveau du laboratoire.



LEGENDE

- Faïlle**
  - Principale {
  - Secondaire
  - Mineure
  - Tracé non retenu après mise en cohérence 2002-2003
  - Nouveau tracé retenu en 2004 pour la carte géologique
- Faïlle enracinée dans le socle
- Faïlle de couverture

- Forage pétrolier
- Forage Andra
- Profils sismiques
- Profils sismiques 2003
- Géologie**
  - Alluvions
  - Crétacé
  - Tithonien
  - Kimméridgien
  - Oxfordien
  - Callovien

Echelle : 0 km 4 km

Figure 5 - Carte géologique du Sud du secteur (d'après [5]).

**Cadre régional et ressources naturelles**

Dans le Dossier 2005 Argile [5], l'ANDRA rappelle le schéma de l'évolution géodynamique régionale du Paléozoïque à l'actuel, la géométrie du bassin permo-carbonifère et la géologie du substratum, qu'elle avait présentés dans le référentiel géologique de 1999 [83]. L'ANDRA précise l'évolution géodynamique régionale des épisodes d'érosion (en particulier au Crétacé inférieur et à l'Eocène), et l'origine possible du volcanisme du Massif Central et d'Eifel (Allemagne) depuis l'Oligocène terminal. L'IRSN estime que les interprétations de l'ANDRA sont fondées et décrivent de manière satisfaisante le contexte géologique régional du site de Meuse/Haute-Marne.

Pour ce qui concerne l'existence de ressources naturelles exceptionnelles à l'aplomb du site de Meuse/Haute-Marne, dans le référentiel géologique de 1999 [83], l'ANDRA concluait que « *la zone ne montre pas d'indication d'une ressource naturelle exceptionnelle : l'absence de séries westphaliennes (principales roches mères des hydrocarbures et séries les plus riches en charbon) à l'aplomb du site, la profondeur importante du Stéphaniens [...], le faible potentiel en charbon de cette séquence stéphaniens, les faibles possibilités d'alimentation en hydrocarbures de la zone par une éventuelle roche mère stéphaniens, l'absence de structuration tectonique susceptible de créer un piège à hydrocarbures au Trias et en profondeur* ». Le rapport DES n°393 précité confirmait en 2000 qu'aujourd'hui le site ne présente pas de ressource naturelle connue aujourd'hui (gazière, pétrolière, minière ou charbonnière) exploitable dans les conditions actuelles. Par ailleurs, sur la base des explorations détaillées par l'ANDRA en 2005, l'IRSN considère comme l'ANDRA qu'il n'existe pas de potentiel géothermique rentable à l'aplomb du site, même dans l'aquifère du Trias (le plus producteur), pour des raisons de salinité excessive des aquifères et de leur faible capacité de production d'eau.

### **2.2.2.2 Cartographie et histoire structurale à l'échelle du secteur**

L'évaluation de la sûreté d'un éventuel stockage en formation géologique profonde nécessite une connaissance préalable détaillée des volumes rocheux non perturbés par les phénomènes tectoniques. Ces processus tectoniques sont à l'origine de l'apparition dans les formations sédimentaires de discontinuités (failles ou diaclases) susceptibles, d'une part de mettre en communication la formation hôte du stockage et les formations adjacentes potentiellement aquifères, d'autre part de modifier localement les propriétés mécaniques de la formation hôte.

#### **Reconstitution des paléocontraintes et de l'évolution structurale à l'échelle du secteur**

La reconstitution des champs de contraintes successifs subis par la série mésozoïque depuis son dépôt, basée sur l'analyse des failles inframétriques à mineures relevées dans le secteur, permet d'interpréter la fracturation observée dans l'ensemble des forages et ouvrages et d'apprécier le type de fracturation susceptible d'être rencontré dans les zones non directement observables.

La reconstitution présentée par l'ANDRA est cohérente avec le schéma classique d'évolution des paléocontraintes du Nord-Ouest de l'Europe, et compatible avec divers travaux réalisés dans l'Est de la France (e.g., [148], [156], [149]) :

- l'extension mésozoïque liée à l'ouverture de l'océan Téthys se manifeste dans le secteur par des failles normales localement synsédimentaires. L'extension orientée NE du Bajocien (vers 165 Ma) est localement marquée. L'extension majeure oxfordienne à tithonienne (150-140 Ma) est orientée E-W [146]. À la fin du jurassique (135 Ma), l'extension s'oriente NNW. Des épisodes d'extension ont pu perdurer jusqu'au Crétacé supérieur (65 Ma) ;
- du Crétacé supérieur au Paléocène, la phase laramide (75-57 Ma) correspond à une compression décrochante NNW (c'est-à-dire un état de contraintes compressif selon NNW et extensif selon ENE) ;
- à l'Eocène-Oligocène (46-25 Ma), le champ de contraintes, attribué aux épisodes pyrénéo-provençal et de rifting Ouest européen, aurait varié dans le temps et dans l'espace entre une compression décrochante successivement NNE puis NE, et une extension successivement WNW puis NW ;
- après des épisodes transitoires de compression décrochante ENE [148] [152] et d'extension NE [147] à l'Oligocène-Miocène (20 Ma), les compressions alpines *stricto sensu* sont orientées WNW, puis NW (Miocène-Pliocène, 12,5-10 Ma), puis NNW (Pliocène à actuel, depuis 3,5 Ma).

La succession des paléocontraintes retenue par l'ANDRA est en accord avec les résultats des investigations menées par l'IRSN [152]. L'ANDRA considère que les paléocontraintes reconstituées par l'analyse des failles inframétriques à mineures observées dans les puits au niveau du Kimméridgien [11] et de l'Oxfordien [12], décrites dans le chapitre 2.2.2.3 du présent rapport, sont attribuables aux épisodes pyrénéo-provençal et alpin. L'IRSN souligne

que ces résultats sont cohérents avec la succession des paléocontraintes, indiquant une légère prépondérance des jeux décrochants sur les jeux normaux dans le secteur ([90] volume 1 figure 13 ; développé en Annexe T2 au présent rapport).

Il est à noter que l'importance relative attribuée aux phases tectoniques extensives et décrochantes conditionne la proportion de failles décrochantes susceptibles d'exister, celles-ci étant plus difficiles à cartographier que les failles normales par des observations de surface comme au moyen de techniques de sismique-réflexion qui privilégient l'identification des rejets verticaux. Lors de la réunion du groupe permanent « déchets » du 11 janvier 2000 consacrée au référentiel géologique sur la base du rapport DES n° 393, l'ANDRA attribuait à la phase extensive oligocène un rôle dans les déformations régionales plus important que celui estimé par l'IRSN. En 2005, l'ANDRA considère toujours que « *la tectonique oligocène demeure un évènement régional marquant* » ([5] chapitre 9) qui a ouvert les réseaux de failles de Gondrecourt, Roches-Bettaincourt et Joinville et leur a donné leur structure en « *fossés* » (suivant les mêmes mécanismes de formation que les fossés de la Bresse et du Rhin, [5] chapitre 8), alors que la compression pyrénéo-provençale NE est un « *épisode décrochant assez discret qui ne crée jamais de structures majeures* » ([5] chapitre 9). L'IRSN observe que l'ANDRA s'appuie sur des travaux qui ont soit porté sur des superficies très vastes telles que l'ensemble de la France [148] ou l'Est de la France [149], soit sur la Bourgogne [150] ou la vallée du Rhône [174] qui, du fait de leur proximité des fossés de la Bresse et du Rhin, présentent des caractéristiques tectoniques différentes de celles du site de Meuse/Haute-Marne. Sur ce site, peu des structures tectoniques observées sur le terrain ou en forages (inframétriques à mineures) sont attribuables, de manière formelle, à une extension durant l'Oligocène à l'échelle du laboratoire (cf. Annexe T2, [12] et chapitre 2.2.2.3 du présent rapport), du secteur ([90] page 27, [152]), de même qu'en Lorraine [156], alors que de nombreuses structures tectoniques sont attribuables au champ de contraintes décrochant NNE à NE dans le secteur (cf. Annexe T2 au présent rapport). Ce champ de contraintes décrochant pourrait avoir provoqué une ouverture des structures de Gondrecourt, de Roches-Bettaincourt et de Joinville, s'apparentant à de grandes **fentes de tension** [85] [147] [152]. Certains auteurs [151] considèrent que les épisodes décrochant pyrénéo-provençal NE et extensif oligocène NW appartiennent à la même phase tectonique majeure à l'échelle Ouest-européenne, localement extensive et régionalement décrochante. **Aussi, l'IRSN estime que les observations de terrain ne permettent pas de corroborer le rôle majeur attribué par l'ANDRA à l'extension oligocène dans la structuration régionale, et en déduit que les failles n'ont pas nécessairement toutes un rejet vertical significatif.** L'IRSN souligne l'importance de cette dernière conclusion, qui justifie que les futures études de terrain devront s'attacher en particulier à identifier les structures de faible rejet vertical (structures décrochantes) qui pourraient le cas échéant recouper l'ensemble de la série sédimentaire.

#### Cartographie structurale des failles principales et secondaires

Le rapport DES n° 514, présenté lors de la réunion du groupe permanent « déchets » du 19 novembre 2002 consacrée à l'examen du référentiel géologique révisé et de la modélisation hydrogéologique, indiquait que les travaux de cartographie réalisés en 2000 par l'ANDRA ont considérablement amélioré la carte structurale du secteur (Figure 5). Ainsi, au Sud du laboratoire, des failles principales et secondaires orientées NW ont été cartographiées, dont certaines recourent les structures NE à NNE de Gondrecourt ; ces résultats sont cohérents avec les conclusions des études réalisées par l'IRSN en 1999-2000, portant sur l'interprétation de 37 profils sismiques retraités, d'un modèle numérique de terrain « MNT » régional IGN au pas de 50 m, et d'un MNT local au pas de 5 m déduit de photographies aériennes. Ces failles orientées NW appartiennent à un réseau appelé par l'ANDRA « zone de fracturation diffuse Marne-Poissons », situé entre les structures de la Marne et de Gondrecourt, comprenant du Sud vers le Nord, les failles de Annonville, Poissons, Thonnance, Aingoulaincourt, Brouthières-Soulaincourt, et Bressoncourt, et la fracturation de dimension inférieure. L'ANDRA a précisé le schéma structural sur la base des études conduites en 2003 (réinterprétation de la sismique 2D et mise en cohérence de la cartographie et de la géométrie profonde des failles [92] [93]). Les quelques modifications cartographiques qui en découlent (terminaisons Nord des failles de Joinville, Sud des failles de la Marne, et Nord-Ouest de la faille de Brouthières ; Figure 5) n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN.

Cependant, la cartographie reste à préciser dans les zones détaillées ci-dessous.

Pour l'IRSN, les failles de la **zone de fracturation diffuse Marne-Poissons**, présentant toutes un rejet vertical d'au moins 10 m, sont des failles principales selon la nomenclature de l'ANDRA (présentée dans le chapitre 2.2.1.1 de ce rapport) ; il convient donc de prêter une attention particulière à leur cartographie. Le rapport DES n°514 précité soulignait déjà la nécessité de préciser les relations spatiales entre la faille de Gondrecourt et la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons qui sont susceptibles de se recouper à quelques kilomètres à l'Est du laboratoire, afin de mieux comprendre les écoulements dans le secteur. Sur le MNT local réalisé par l'IRSN, des linéaments NW, corrélés aux accidents de Bressoncourt et de Soulaincourt, semblent en effet traverser la structure de Gondrecourt et pourraient constituer des courts-circuits entre les affleurements des roches aquifères à l'Est des failles de Gondrecourt et leurs exutoires à l'Ouest (tel que détaillé dans l'Annexe T4b du présent rapport). D'ailleurs, à l'issue de la campagne de cartographie réalisée en 2000, l'ANDRA [85] avait émis l'hypothèse de la prolongation des failles d'Augeville, Brouthières-Soulaincourt, Thonnance et Bressoncourt à l'Est des failles de Gondrecourt ; cette hypothèse n'avait néanmoins pas été retenue sur la carte géologique de 2000 (Figure 5). Comme elle l'avait indiqué dans le rapport DES n°514 présenté le 19 novembre 2002 lors de la réunion du groupe permanent « déchets » consacrée à l'examen du référentiel géologique révisé et de la modélisation hydrogéologique, **l'IRSN estime donc nécessaire, en cas de poursuite d'un projet de stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien, de poursuivre la cartographie du secteur à l'Est des failles de Gondrecourt**, par exemple selon la méthodologie employée en 2000. En outre, les forages EST321 (à 380 et 411 m), EST322 (à 296 m), et EST351 (à 391 m et 298 m) ont recoupé des fractures karstifiées drainantes mais sans pour autant que des rejet verticaux importants aient été observés (d'après un enregistrement vidéo). L'ANDRA attribue ces fractures à une « *microfracturation* » [5], alors que l'IRSN considère qu'il n'est pas possible d'exclure qu'elles soient associées à des failles à rejet décrochant dominant. En effet, ces fractures, situés dans le prolongement des failles de Thonnance pour les forages EST321 et EST322, et de Brouthières-Soulaincourt pour le forage EST351, sont situées dans une zone brouillée sur le profil sismique 84JV16, qui pourrait s'interpréter comme l'indice de la présence de failles sub-sismiques (rejet vertical proche de la limite de détection : environ 5 m pour la sismique 2D) (Figure 5). Lors de la réunion préparatoire du 8 novembre 2005, l'ANDRA a indiqué oralement qu'à l'issue d'un retraitement récent de ce profil sismique, il n'apparaissait plus de zones brouillées. Cette nouvelle donnée sera à examiner par l'IRSN dans une phase ultérieure du projet sur la base d'un document présentant les différents éléments relatifs à ce dernier retraitement. L'IRSN ajoute que l'existence de structures secondaires à faible rejet ne peut pas être écartée dans le secteur étudié dans la mesure où les failles de la zone diffuse Marne-Poissons ont probablement, à l'image de la faille de Poissons [93], un rejet décrochant dominant, les rendant difficiles à détecter sur la sismique 2D. Enfin, le forage AEP 5035 d'Echenay présente un fort débit d'eau à très faible minéralisation au Kimméridgien [16] qui indique une communication directe avec la surface (fracturation). L'ensemble de ces éléments conduit l'IRSN à considérer qu'il est vraisemblable que **les failles de Thonnance et de Brouthières-Soulaincourt se prolongent plus au NW que ne l'indique l'ANDRA.**

À l'échelle du secteur, l'ANDRA indique que : « *si on exclut les grandes structures tectoniques (failles de la Marne, fossé de Gondrecourt...) qui bordent la zone reconnue [...], aucune faille importante à déplacement vertical n'a été mise en évidence dans la formation du Callovo-Oxfordien, ni dans les horizons sus-jacents de l'Oxfordien, ni dans la partie supérieure du Dogger sous-jacent* » ([5] présentation générale ; [1] chapitre 3). Les investigations réalisées par l'ANDRA ne mettent effectivement pas en évidence ce type de faille ; cependant l'IRSN observe que, d'une part en dehors des environs du site et la zone diffuse Marne-Poissons, le maillage des profils sismiques 2D est lâche et irrégulier, et que d'autre part les mauvaises conditions d'affleurement sur le plateau du Barrois (Figure 5) rendent difficile la détection des failles en surface. Ainsi, dans la **partie Nord du secteur, correspondant à la quasi-totalité de la zone de transposition** (présentée au chapitre 2.2.2.4 du présent rapport), les profils sismiques sont trop éloignés les uns des autres pour permettre de déterminer l'extension des quelques structures décelées. Pour ces raisons, et en cohérence avec la reconstitution des phases tectoniques ayant affecté le secteur d'étude, **l'IRSN considère que les moyens mis en œuvre par l'ANDRA pour cartographier la partie du**

Nord du secteur ne permettent pas de conclure à l'absence de failles secondaires de faible rejet dans cette zone.

### Profondeur des failles

L'existence ou non d'un enracinement des failles participe à l'évaluation de l'aléa sismique d'un site, l'énergie potentiellement libérée lors d'un séisme dépendant de la surface de la faille et donc de sa longueur et de sa profondeur.

Or, l'enracinement des structures peut être difficile à déterminer, le socle (désignant les roches cristallines antérieures au Permien, par opposition à la couverture sus-jacente) étant mal discernable sur les profils sismiques de l'ANDRA du fait des paramètres utilisés qui ne sont pas adaptés à l'identification de telles structures. Ainsi, la plupart des profils sismiques recoupant les structures de Gondrecourt, Joinville et de la zone diffuse Marne-Poissons ne présentent pas un signal sismique suffisamment précis pour exclure, ainsi que le fait l'ANDRA [5] [92], à un éventuel enracinement de ces structures sous le Permien (profils 82TOUL06, 88GAY07 et 88GAY09 pour les structures de Gondrecourt, 84JV16 et 87NM07 pour les parties centrale et Sud de Joinville), ou conclure au découplage des failles de la zone diffuse Marne-Poissons au niveau du Keuper (couche salifère).

Pour ce qui concerne les failles de Gondrecourt, selon l'ANDRA, l'extension liasique aurait engendré un épaissement des évaporites du Keuper à l'emplacement des futures failles, qui auraient été initiées en décrochement dans la couverture durant la phase de compression pyrénéenne, et auraient joué en failles normales durant la phase oligocène. L'IRSN estime que l'épaississement du Keuper pourrait aussi être dû à un bourrage survenu lors du jeu de la faille en décrochement. Par ailleurs, dans le prolongement Sud des failles de Gondrecourt, les failles de Roches-Bettaincourt, orientées NE à ENE, présentent une structure en fleur ancrée sur une faille de socle ; l'IRSN estime que la presque-continuité des failles de Roches-Bettaincourt avec les failles de Gondrecourt pourrait traduire un enracinement profond de Gondrecourt, au moins à sa jonction avec ces dernières.

Enfin, des failles orientées NW de dimension au moins kilométrique, non détectées sur les profils sismiques 2D, ont été décelées par sismique 3D au Nord de la zone diffuse Marne-Poissons. L'IRSN estime, ainsi que cela est développé dans le chapitre 2.2.2.3 du présent rapport, qu'il est vraisemblable que deux d'entre elles sont ancrées dans le socle.

Sur la base de ces éléments, l'IRSN considère que l'hypothèse d'un enracinement dans le socle des failles de Gondrecourt, de Joinville, de la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons ainsi que de certaines structures identifiées dans l'emprise de la sismique 3D, devrait être retenue, à ce stade des études, pour l'estimation de l'aléa sismique. L'IRSN note que si cette hypothèse n'est pas privilégiée par l'ANDRA, elle a néanmoins été partiellement prise en compte dans l'estimation de cet aléa (analysé dans le chapitre 2.2.3.1 du présent rapport).

En conclusion, l'IRSN estime que la succession des épisodes tectoniques méso-cénozoïques présentée par l'ANDRA est suffisante pour la construction d'un modèle structural de secteur, mais que l'importance attribuée à l'extension oligocène n'est pas justifiée au regard de la prépondérance des failles à jeu décrochant dominant dans le secteur. Par ailleurs, l'IRSN considère que le schéma structural du secteur présenté par l'ANDRA dans le Dossier 2005 argile constitue une base suffisante pour permettre une première évaluation de l'aléa sismique et des circulations hydrauliques à l'échelle du secteur, bien que certaines incertitudes affectant l'enracinement des structures, puissent avoir une incidence sur ces évaluations. Dans l'éventualité d'une poursuite des études après 2006, l'IRSN estime qu'il conviendra d'accorder une attention particulière à l'identification à l'échelle du secteur d'éventuelles structures décrochantes, plus difficiles à détecter en profondeur que les failles normales. Il sera également nécessaire de préciser la continuité des failles aux extrémités de la zone diffuse Marne-Poissons et de poursuivre la cartographie des structures dans le Nord du secteur (zone de transposition). Il faudra enfin préciser la géométrie profonde des failles, notamment celle de Gondrecourt, de Joinville, et de celles identifiées dans la zone diffuse Marne-Poissons.

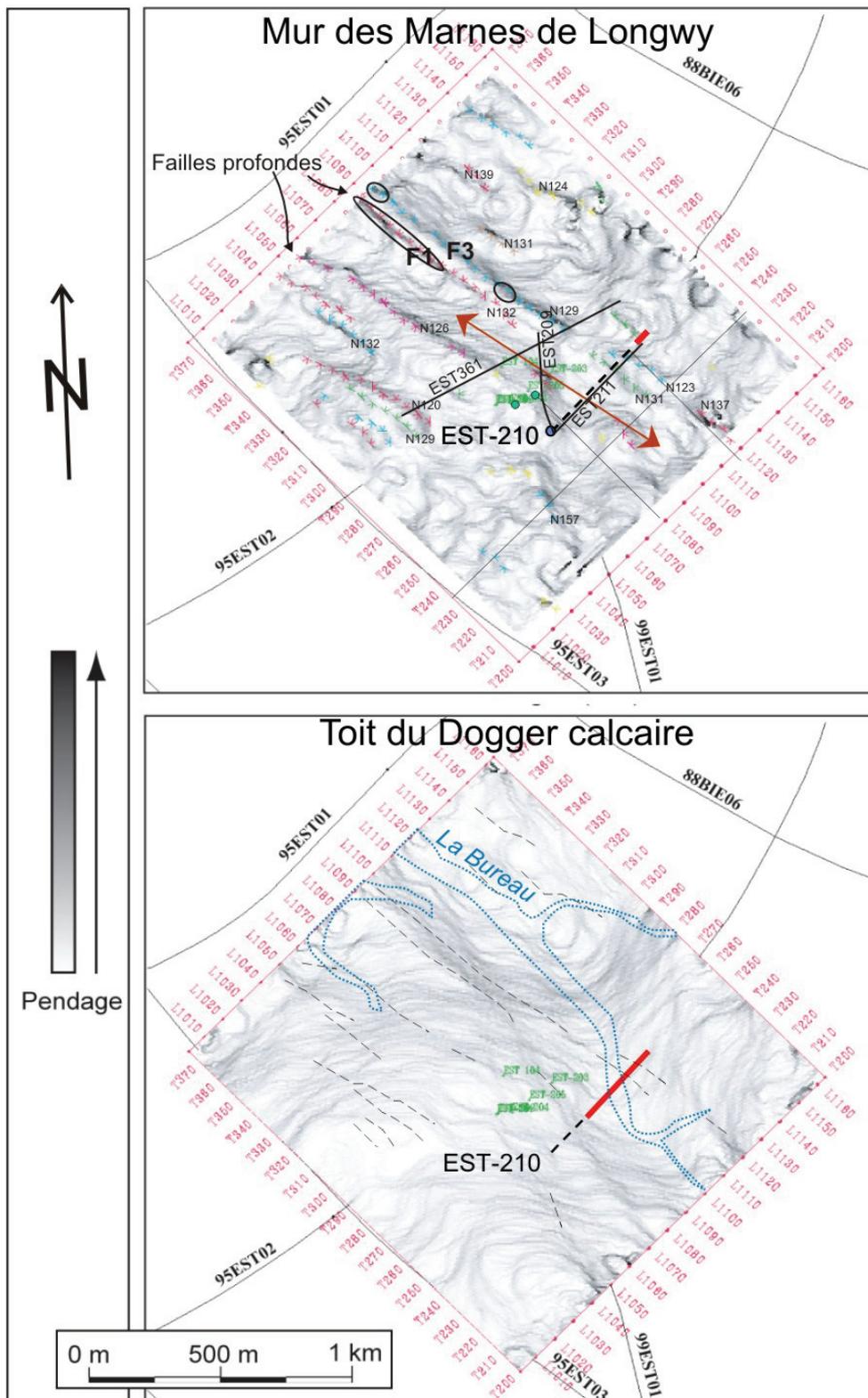
### **2.2.2.3 Reconnaissance de la fracturation à l'échelle locale**

L'IRSN a focalisé son analyse à la fois sur les résultats et sur les méthodes de caractérisation de la fracturation à l'échelle du laboratoire, effectuée au moyen de reconnaissance sismique 2D et 3D et par des observations dans les puits et les forages inclinés (FRF). La mise au point de méthodes, nécessaire pour une reconnaissance éventuelle d'un futur stockage, est examinée dans le chapitre 2.2.2.4 du présent rapport relatif à la zone de transposition.

À la suite de l'évaluation par le groupe permanent « déchets », en 1997, du dossier de demande d'autorisation d'installation et d'exploitation d'un laboratoire sur le site de l'Est (DAIE), sur la base du rapport DES n°297 présenté le 10 mars 1997 lors de la réunion du groupe permanent « déchets », et conformément à la demande de l'annexe 4 de la lettre DSIN-FAR/SD1/n°11970/97 du 10 décembre 1997, l'ANDRA a réalisé en décembre 1999 une campagne de géophysique sismique 3D sur une superficie de 4,35 km<sup>2</sup> autour du laboratoire souterrain de Bure (Figure 1). Un premier traitement en 2000, présenté par l'ANDRA lors de l'audition du 10 janvier 2001 devant la commission nationale d'évaluation (CNE) montrait des structures sismiques orientées N120° espacées de 200-300 m, et d'autres plus ténues orientées N160° situées dans un couloir N-S, subverticales, affectant les formations du Trias (Rhétien) au Dogger moyen (Bathonien inférieur). Les deux structures N120° les plus marquées, appelées F1 et F3, sont situées dans le Nord-Est de l'emprise de la sismique (Figure 6b). Aucun signal sismique marquant la présence de structures n'était visible dans les formations du Callovo-Oxfordien et de l'Oxfordien.

Les résultats de cette campagne ont été examinés par l'IRSN en 2001 et 2002 (rapport DES n°393 présenté les 3 octobre et du 7 novembre 2001 lors de la réunion du groupe permanent « déchets » consacrée à l'examen du référentiel géologique, et rapport DES n°514 présenté le 19 novembre 2002 lors de la réunion du groupe permanent « déchets » consacrée à l'examen du référentiel géologique révisé et de la modélisation hydrogéologique du site de Bure). À l'issue de ces évaluations, l'IRSN considérait, sur la base des informations disponibles, qu'il n'était pas possible d'exclure l'hypothèse d'une origine synsédimentaire des structures détectées mais constatait, comme l'ANDRA [88], que ces failles, présentant un pendage quasiment vertical, pouvaient être associées à des jeux décrochants. Par ailleurs, une campagne de sismique 3D (détaillée en Annexe T3 au présent rapport) réalisée en 2001 par l'IRSN sur la station expérimentale de Tournemire (Aveyron ; tunnel IRSN dans les argilites du Toarcien), destinée à tester l'aptitude de cette méthode géophysique à identifier la fracturation d'un massif argileux, montrait qu'une fracture de faible rejet vertical (2 à 3 m), repérée dans les calcaires sous-jacents en sismique 3D et observée in situ dans les argilites, n'était pas détectée dans la formation argileuse par l'imagerie sismique, pourtant de très haute définition et visant la zone concernée. L'IRSN concluait, lors de la réunion du groupe permanent « déchets » du 19 novembre 2002 (rapport DES n°514 précité), qu'il n'était pas possible d'exclure que, dans l'emprise du laboratoire, certaines des structures identifiées dans les calcaires du Dogger se poursuivent dans les formations sus-jacentes du Callovo-Oxfordien et de l'Oxfordien.

En 2003, l'ANDRA a retraité la sismique 3D (corrections statiques, élévation de la fréquence de 100 à 140 Hz, et du rapport signal sur bruit). Le rejet minimal de faille détectable est compris entre 2,5 et 4 m selon les formations [5]. Ce retraitement n'a pas fait apparaître de nouvelle structure ; il a en revanche fait disparaître certaines anomalies sismiques. L'ANDRA indique qu'un profil sismique vertical (PSV) réalisé en 2004 dans le forage EST210 (résolution sismique verticale de 2,5 m) a permis de déterminer les vitesses sismiques, donc de convertir les unités de temps de l'image sismique en unités de profondeur, et ainsi de recalibrer le bloc sismique 3D.



Pendages en nuances de gris. 95 EST01, 95EST02, BIE06 : profils sismiques 2D. F1, F3 : voir texte.  
 Au mur des marnes de Longwy : les orientations sont données par rapport au Nord. Les zones entourées présentent un rejet de 5 m ou plus (déduit de [88]).  
 Au toit du Dogger, les lignes en tirets noirs indiquent les failles localisées au mur des marnes de Longwy, les lignes en pointillés bleus indiquent les cours d'eau de surface.

Figure 6 - Structures sur la sismique 3D de Bure (d'après [88]).

En 2004, constatant que l'orientation N120° des structures sismiques n'est pas une direction structurale répandue dans le secteur, l'ANDRA a retenu une nouvelle interprétation de la structure F1 (Figure 5), sur la base de l'analyse du PSV [15]. Dans le Bajocien, celle-ci a la forme d'une ride d'environ 2,5 m de haut et 30 m de large, que l'ANDRA attribue à une formation récifale, similaire aux faciès récifaux forés dans le faciès D1 (Figure 4) du forage EST210 vers 610-630 m de profondeur, ou à ceux observés à l'affleurement dans les calcaires bajociens au Sud de Neufchâteau (Figure 1). L'ANDRA indique que cette formation récifale a pu être initiée au-dessus d'une structure N120° du Lias, correspondant à un paléorelief, une flexure ou une faille [15]. L'ANDRA conclut que la structure F1 s'arrête sous le niveau ligniteux du Bathonien, sous le forage EST210.

La fracturation a également été reconnue à l'échelle du laboratoire par carottage et imagerie des parois des forages FRF, et par observation des parements des puits (PPA et PAX).

Dans le Dogger, dans les forages EST210 (faciès D1 à D4) et EST211 (faciès D4) (Figure 7), l'ANDRA [15] a relevé des diaclases, des fentes et quelques joints stylolitiques verticaux d'orientations préférentielles NW à NNW et NE. Ces fractures sont plus nombreuses dans les faciès calcaires (D1, D3 et D4), notamment à l'aplomb de la structure F3 ; elles sont rares dans le faciès D2 des marnes de Longwy. Aucune faille n'a été observée ni sur les carottes ni sur l'imagerie FMI du forage EST210.

Dans le Callovo-Oxfordien, recoupé par les forages verticaux EST207, EST208 et EST363 et inclinés EST209, EST211 et EST361, et par les puits PPA et PAX, la fracturation est rare [13]. Des diaclases décimétriques NW sont principalement présentes dans le forage EST211. Des joints stylolitiques et des fentes de tension que l'ANDRA attribue à la diagenèse (compaction des sédiments après leur dépôt) sont localisés à la limite entre les faciès C2c et C2d matérialisée par un banc plus carbonaté. L'ANDRA attribue également les septarias (i.e., concrétions calcaires affectées de fissures radiales cristallisées) à la diagenèse, ainsi que les failles normales inframétriques ou fentes à cristallisation de célestine car elles présentent des faibles pendages et des orientations variables et sont parfois associées à des pistons de compaction couverts de célestine.

Dans l'Oxfordien, dans les puits PPA et PAX [12] [94], les fractures, préférentiellement orientées NW à NNW ou NE, sont essentiellement des diaclases et des joints stylolitiques verticaux, rarement cicatrisés par de la calcite (60 à 95 % des mesures montrent des structures non cicatrisées [12], et quelques fentes de tension. Les rares microfailles, de continuité généralement inframétrique, sont généralement décrochantes (27 dextres orientées NW, NNW et NE à ENE ; 16 sénestres N-S), exceptionnellement normales (4 NW et NE) ou inverses (2 ENE) [12]. Les fractures sont principalement regroupées dans cinq zones où elles forment des alignements pluridécimétriques de structures [12]. Une venue d'eau est apparue sur une diaclase N137° vers 200 m dans le PAX, une autre dans un faisceau de microfailles décrochantes NW à 262 m dans le PPA [12].

**L'IRSN relève que le retraitement des données de la campagne de sismique 3D est de grande qualité et apporte, avec les observations effectuées en forage et dans les puits, des informations précises pour la construction du modèle géologique local.**

L'IRSN constate en particulier que les diaclases et fentes présentes dans le Dogger du forage EST210 sont majoritairement orientées NW, et plus nombreuses à l'aplomb de l'anomalie sismique F3 ([5] ; Figure 7). Dans l'Oxfordien, l'IRSN note la présence de failles inframétriques orientées NW, en particulier un faisceau de décrochements dextres dans le PPA vers 262 m. En outre, l'IRSN observe sur les plans de la sismique 3D des niveaux poreux Hp4 et Hp7 de l'Oxfordien [88], à l'aplomb des structures sismiques F1-F3, la persistance ténue d'anomalies NW sous forme d'ondulations parallèles aux vallées sus-jacentes (La Bureau et ses affluents ; Figure 5 et Figure 6), qui pourraient soit correspondre à des structures géologiques, soit à des artéfacts de traitement (anomalies de basse fréquence parallèles au dispositif de mesure sismique, ou de haute fréquence liées à une ondulation de longueur d'onde d'environ 2 km [88]). Dans le Callovo-Oxfordien, les structures (diaclasses et fentes à célestine) relevées dans le forage EST211 (Figure 7) sont plus rares et largement réparties dans tous les faciès sauf le plus plastique, C2b2. L'IRSN constate, sur la base de son examen des carottes sur le site de Bure lors de la visite technique 4 octobre 2005, que les fentes à célestine et à stries normales du Callovo-Oxfordien sont effectivement

des structures de compaction, et qu'aucune faille même inframétrique ne semble attribuable à la tectonique. En revanche, les diaclases dans ce forage ont une morphologie très plane (qui n'est a priori pas caractéristique de cassures provoquées par les forages) et une orientation préférentielle NW qui est une des directions majeures des fractures d'origine tectonique du secteur (l'autre direction majeure étant NE, voir Annexe T2 du présent rapport). De même, dans les carottes des forages de la niche (445 m) et des galeries (490 m) que l'IRSN a examinées le 8 octobre 2005, une majeure partie des fractures situées dans la zone présumée endommagée par le creusement présente cette orientation NW. Enfin, l'IRSN a observé sur la carotte extraite du forage SUG-1101 (forage horizontal dans la direction N065 réalisé à 490 m de profondeur depuis le front de taille de la galerie GMR) une zone métrique déstructurée avec cisaillements. L'ANDRA a oralement indiqué lors de la réunion préparatoire du 8 novembre 2005 que ce phénomène pouvait avoir une origine purement mécanique due au croisement de fractures « en chevrons » en amont du front de taille (voir chapitre 5.3.2 du présent rapport). L'IRSN ne dispose pas aujourd'hui d'éléments suffisants pour confirmer ou infirmer cette hypothèse. Toutefois, parmi les hypothèses qui permettraient d'expliquer l'ensemble des observations précitées, l'IRSN s'interroge sur une éventuelle origine tectonique des structures observées dans le Callovo-Oxfordien, hormis celles clairement attribuable à la compaction. Dans cette hypothèse, les épisodes tectoniques passés auraient pu provoquer un endommagement ténu du massif argileux, microscopique ou partiellement cicatrisé, qui se matérialiserait sous forme d'une fracturation préférentiellement orientée lorsque les galeries sont creusées (effet du déconfinement). L'IRSN considère que cette hypothèse méritera d'être examinée dans une phase ultérieure, sur la base des résultats qui seront acquis dans le laboratoire souterrain.

Sur la base des éléments présentés ci-avant, l'IRSN conclut à **l'absence de structure transmissive dans le Callovo-Oxfordien dans la zone reconnue par les forages FRF dans l'emprise de la sismique 3D**. De plus, quelle que soit l'origine de la fracturation observée dans le Callovo-Oxfordien, il n'a pas été identifié d'effet sur la perméabilité « en grand » de la formation argileuse [15].

Il reste néanmoins à expliquer le fait que le Dogger et l'Oxfordien sont fracturés par la tectonique de manière localisée (failles secondaires, et faisceaux de structures inframétriques), alors que le Callovo-Oxfordien ne l'est que très peu, et de manière plus distribuée. À cet égard, l'IRSN considère qu'un phénomène de fracturation différentielle, qui n'est pas incompatible avec l'interprétation de l'ANDRA concernant les structures observées en sismique 3D à l'aplomb du laboratoire (formations récifales scellées au Bathonien coiffant des failles ou flexures du Lias [15]) pourrait constituer une explication plausible de l'organisation de la fracturation dans les formations du site de Bure. Ce phénomène traduit une fracturation s'exprimant de manière différente dans les calcaires de comportement mécanique cassant et dans les argiles, plus plastiques. En appui de cette hypothèse, l'IRSN constate, comme l'ANDRA [12], que la densité de la fracturation observée à l'échelle du laboratoire semble dépendre de la proportion de carbonates : les fractures sont d'autant plus rares que la proportion argileuse des couches est importante (marnes du faciès L2a, argiles du L1b-L2a, faciès C2b2, cf. Figure 4). Ce phénomène de « fracturation différentielle » est bien connu à l'échelle inframétrique (e.g., [154], [155]). Dans le cas de Tournemire, celui-ci a été mis en évidence à l'échelle plurihectométrique. Les forages dans les calcaires du Carixien, sous jacents à la couche argileuse, ont en effet intercepté une faille normale synsédimentaire réactivée en décrochement (Annexe T3 au présent rapport) associée à une mince zone fracturée ; cette structure se poursuit dans les argiles du Toarcien sus-jacent mais de manière plus diffuse matérialisée par une zone de 20 m de large constituée de fractures à stries décrochantes ténues (le mouvement étant réparti sur de nombreux plans) ; cette zone fracturée affecte de manière plus nette les calcaires de l'Aalénien-Bajocien et s'élargit en s'estompant vers la surface. **Compte tenu de l'ensemble des éléments présentés ci-avant, l'IRSN considère que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien possède vraisemblablement un fort potentiel d'amortissement de la fracturation ce qui permet de supposer qu'il existe, dans cette couche, des blocs sains d'une taille compatible avec les projets de concepts présentés par l'ANDRA.**

**Pour autant, il est difficile de conclure qu'aucune partie de la zone de transposition dans le secteur ne présentera un endommagement dans le Callovo-Oxfordien aussi faible que celui constaté dans les forages FRF**

du laboratoire. En effet, l'IRSN observe que les structures détectées par la sismique 3D présentent les mêmes caractéristiques structurales (direction et inclinaison) que les failles de la zone diffuse Marne-Poissons. Dans le Bajocien inférieur, les structures F1 et F3 présentent une extension au moins kilométrique (compte tenu de leur prolongation éventuelle en dehors de l'emprise de la sismique 3D) et des rejets verticaux dépassant 5 m dans la moitié Nord-Ouest (visibles sur la planche 5.16 dans [88]). Enfin, l'IRSN a observé lors de l'instruction (visualisation de la sismique sur station de travail, présentée par l'ANDRA le 8 septembre 2005), comme l'ANDRA ([88] page 23), que la structure F1 et celle située au Sud-Ouest de F1 (Figure 6) sont enracinées dans le socle dans le Nord du bloc sismique. L'IRSN considère donc, à ce stade, que les structures décelées par la sismique 3D sont des failles secondaires qui s'apparentent à la famille des failles de la zone diffuse Marne-Poissons, et de dimension, a priori, comparable à celles reconnues aux abords des forages EST321-322 dans cette zone. Or ces dernières ont une influence hydraulique sur l'ensemble de la pile sédimentaire (chapitre 2.2.4.1.3 du présent rapport), suggérant qu'elles affectent le Callovo-Oxfordien. Pour l'IRSN, la coexistence, à quelques kilomètres, de failles d'origine similaire mais ayant une influence différente sur la formation hôte incite à la prudence quant à l'extrapolation à une échelle large des données acquises dans le laboratoire.

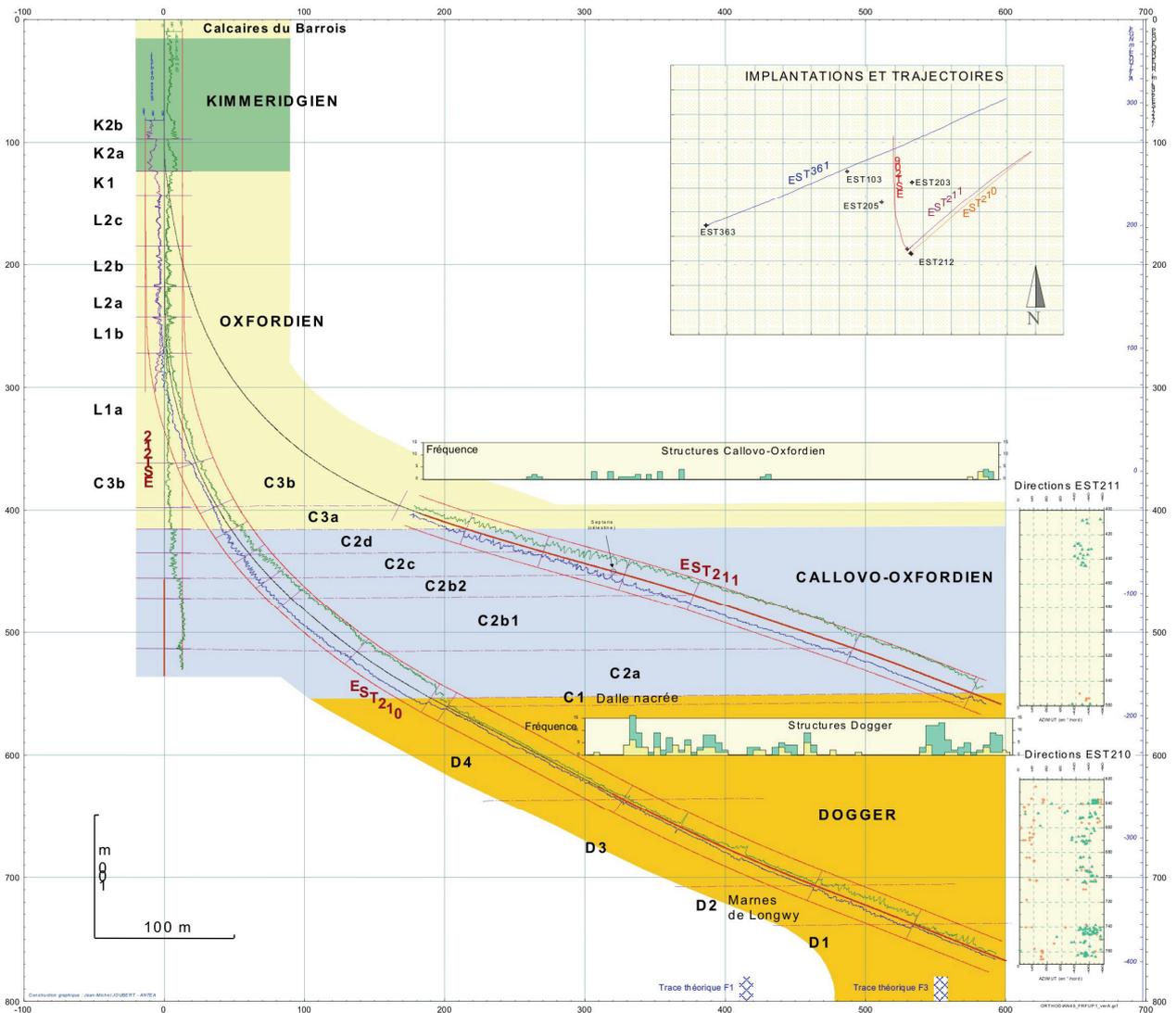
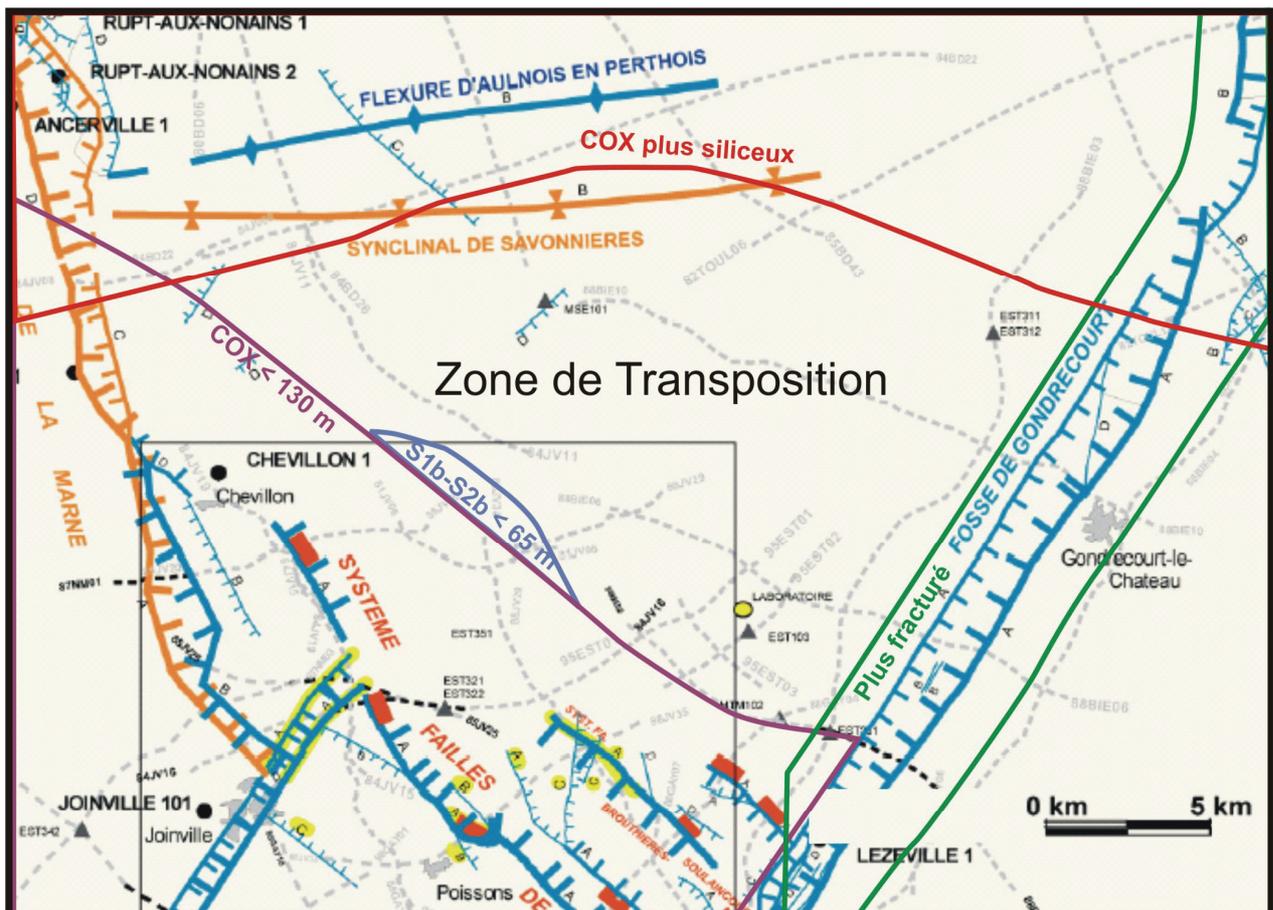


Figure 7 - Forages FRF EST210 et EST211 [5].

### 2.2.2.4 Zone de transposition et stratégie de reconnaissance d'une zone de stockage

L'ANDRA [5] a défini la zone de transposition comme la zone dans laquelle les données acquises dans le laboratoire souterrain peuvent être transposées. Elle est délimitée par l'ANDRA [3], au Sud par la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons et par une épaisseur minimale de 130 m de la formation (HTM102), à l'Ouest par une profondeur maximale de 630 m de la formation, au Nord par l'apparition d'incursions plus silteuses dans les argilites autour du synforme d'Aulnois, à l'Est par les failles principales de Gondrecourt avec une zone de garde de 1,5 km (Figure 8). L'ANDRA [5] ajoute qu'« au stade actuel il ne s'agit pas de déterminer très précisément une zone où la transposition est possible, mais d'en délimiter les contours pour une analyse de la variabilité régionale des différents facteurs géologiques influant sur les propriétés de la formation du Callovo-Oxfordien ». L'IRSN n'a pas de commentaire sur la définition de ces limites par l'ANDRA.



#### Classement absolu des structures :

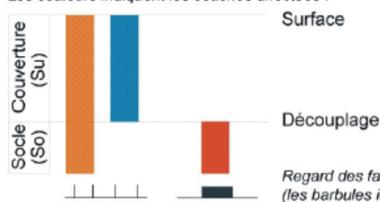
##### Extension cartographique

L'épaisseur des traits indique le caractère :

- Principal (P) ( $L > 10$  km)
- Secondaire (S) ( $1 < L < 10$  km)
- Mineur (M) ( $l \sim 1$  km)

##### Enracinement

Les couleurs indiquent les couches affectées :



#### Indice de fiabilité :

##### A : Très fiable

(tracé bien contraint, calé sur les profils sismiques)

##### B : Fiable

(tracé relativement contraint, éventuellement décalé par rapport au profil, continuité et prolongement latéraux à préciser)

##### C : Peu fiable

(tracé non contraint, extrapolé, non observé sur les profils ou décalé par rapport aux profils)

##### D : Non vérifié

(tracé datant des années 1970, et/ou non vérifié sur un profil sismique, et/ou établi uniquement d'après les données de surface)

— Modifications par rapport au tracé cartographique de 2002

Figure 8 - Cartographie de la zone de transposition de l'ensemble des propriétés de confinement de la formation du Callovo-Oxfordien (d'après [5]). Cadre fin noir : Figure 3.

L'IRSN considère qu'actuellement aucun des éléments acquis par l'ANDRA ne va à l'encontre de la transposabilité des données du laboratoire souterrain à l'ensemble de cette zone, mais tient cependant à nuancer l'affirmation de l'ANDRA selon laquelle « *la transposition [...] repose [...] sur l'exploration détaillée d'une zone géographique couvrant environ 700 km<sup>2</sup>* » [5], et que « *toutes les recherches effectuées pour détecter des failles secondaires éventuelles n'en ont pas mis en évidence. La modélisation géologique conduit à considérer que cette situation est extrapolable à l'ensemble de la zone de transposition* » [28]. Ainsi que développé dans les chapitres précédents, l'IRSN constate en effet que la zone de transposition ne bénéficie pas de la précision cartographique au Sud du laboratoire (Figure 8). L'IRSN considère par ailleurs que les caractéristiques du Callovo-Oxfordien déterminées à l'aplomb des failles décelées par la sismique 3D ne peuvent pas être généralisées à l'ensemble des structures comparables susceptibles d'être reconnues dans la zone de transposition ; l'état de la fracturation du Callovo-Oxfordien à l'aplomb de failles mineures à secondaires ne pourra être caractérisé qu'au cas par cas. L'IRSN note cependant que la couche argileuse a de fortes aptitudes d'amortissement de la fracturation, ce qui constitue une propriété favorable au confinement des déchets. De plus, l'ANDRA a développé des techniques performantes et complémentaires qui permettent de détecter des structures pouvant éventuellement nécessiter des adaptations des concepts de stockage pour en limiter les effets. À cet égard, l'évaluation présentée au chapitre 7 du présent rapport tend à montrer que des dispositions particulières telles qu'envisagées par l'ANDRA en cas de découverte d'une structure transmissive minimisent son incidence sur la sûreté du stockage. **Il n'existe donc pas de point rédhibitoire à la poursuite d'une recherche d'un site de stockage dans la zone de transposition. Si l'objectif de remise à une échéance décennale d'un rapport de sûreté supportant une demande de construction d'un stockage était retenu en 2006, l'IRSN considère qu'un tel rapport devra être basé sur la caractérisation d'un site de stockage définitif. Dans cette hypothèse, l'IRSN considère qu'une stratégie de reconnaissance permettant cette caractérisation devra être définie.**

Concernant ce dernier point, l'ANDRA indique dans sa lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0198 du 19 septembre 2005 qu'elle a mis au point une palette d'outils opérationnels complémentaires adaptés à l'investigation du milieu géologique : cartographie, forages verticaux et inclinés, sismique-réflexion 2D et 3D. L'ANDRA ajoute que les investigations futures et leur enchaînement dépendront des décisions et autorisations qui lui seront accordées en 2006. Lors de sa présentation du Dossier 2005 Argile devant le groupe permanent « déchets », le 25 octobre 2005 et devant la CNE, le 9 Novembre 2005, l'ANDRA a indiqué à titre d'exemple que dans la décennie à venir, une première étape pourrait être de poursuivre la cartographie de la zone de transposition par cartographie de terrain par forages et sismique 2D, et une seconde étape serait de réaliser une sismique 3D dans l'emprise des sites les plus pertinents, avant de retenir un site et de soumettre un dossier de demande de construction d'un stockage.

L'IRSN estime que l'ANDRA a effectivement montré l'efficacité et la complémentarité des outils utilisés sur le laboratoire pour l'investigation d'un futur stockage. L'IRSN ajoute que l'analyse géomorphologique (topographie et réseau de drainage) pourrait également s'avérer nécessaire à la reconnaissance des structures en surface, en particulier sur le plateau du Barrois (Figure 5).

L'IRSN considère que les grandes lignes tracées par l'ANDRA pour la reconnaissance future d'un site de stockage potentiel sont pertinentes. L'IRSN signale cependant que la détectabilité de structures secondaires par la sismique 3D dans les formations argileuses reste encore à démontrer, ainsi qu'il peut être déduit des travaux effectués par l'IRSN dans la station expérimentale de Tournemire. La sismique 3D est néanmoins particulièrement efficace pour détecter des structures mineures dans des formations calcaires. Aussi l'IRSN considère que l'emploi de cette technique, couplée avec une reconnaissance de la formation argileuse au moyen de forages obliques réalisés à l'aplomb des indices sismiques les plus marqués dans les formations sous-jacentes, devrait permettre de rassembler des données suffisantes pour évaluer les caractéristiques structurales des sites sélectionnés.

## 2.2.3 STABILITÉ GÉODYNAMIQUE DU SITE

### 2.2.3.1 Sismicité

Conformément à l'avis formulé par l'IRSN lors de la réunion du groupe permanent « déchets » le 11 janvier 2000 (rapport DES n°393 présenté les 3 octobre et 7 novembre 2001 lors des réunions du groupe permanent « déchets » consacrées à l'examen du référentiel géologique du site de Bure), l'ANDRA a implanté un réseau régional de surveillance sismologique composé de trois stations en 2001, afin de compléter la connaissance des contextes néotectonique et sismotectonique du site. Un accéléromètre a été installé en surface au niveau du laboratoire et il est prévu d'en installer un à 490 m de profondeur (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0205 du 26 septembre 2005), afin d'évaluer l'atténuation des ondes sismiques sur le site de Bure.

L'ANDRA a estimé l'aléa sismique en suivant une approche différente de la méthode déterministe utilisée classiquement. Un spectre de réponse (mouvement en fonction de la fréquence) est déterminé par pondération de différents spectres associés à des sources sismiques locales et régionales. Toutes les hypothèses prises en compte (type de zonage sismotectonique, magnitude et profondeur des séismes) sont pondérées suivant des choix d'expert et permettent, selon l'ANDRA, d'intégrer une partie des incertitudes relatives à ces hypothèses.

Pour estimer l'aléa sismique sur la durée de la **phase d'exploitation-observation** (séculaire à pluriséculaire), un spectre appelé « **spectre SMS** » est déterminé selon la méthode détaillée ci-dessous, que l'ANDRA assimile au spectre du **séisme majoré de sécurité (SMS)** défini, dans la RFS 2001-01 pour les installations nucléaires de base de surface, comme un séisme de magnitude équivalente à celle du séisme du catalogue historique susceptible d'engendrer les mouvements sismiques les plus forts sur le site (SMHV), augmentée de 0,5.

Pour la **phase de post-fermeture** du stockage (jusqu'à un million d'années), un spectre de réponse appelé « **spectre SMP** » (« séisme maximal proposé ») est déterminé selon la méthode détaillée ci-dessous, que l'ANDRA assimile au **séisme maximum physiquement possible (SMPP)**, préconisé par la RFS III.2.f. Ce séisme est caractérisé selon l'ANDRA par une magnitude dite « **magnitude maximale** », définie comme « *la magnitude au delà de laquelle la probabilité d'observer un séisme plus fort est nulle* » [95].

L'ANDRA a développé **trois modèles sismotectoniques MS1, MS2 et MS3** afin de pallier le manque de connaissance sismotectonique. Chacun diffère d'une part par son « **zonage** » (sectorisation de la France selon les caractéristiques des failles, la récurrence des séismes...) qui permet à l'ANDRA de retenir plusieurs SMS dans la zone comprenant le site de Meuse/Haute-Marne, et d'autre part par son mode de calcul des magnitudes des SMPP. Le modèle MS1 est basé sur le zonage publié par le BRGM (bureau des recherches géologiques et minières), auquel sont ajoutées les failles principales du secteur. La magnitude du SMPP associée à chaque faille est calculée d'après la longueur de la faille, à partir de lois d'échelle classiques (la surface du plan de faille déterminant l'énergie libérée lors de l'activation). Le modèle MS2 est basé sur le zonage AFPS-EPAS (association française de génie parasismique-évaluation probabiliste de l'aléa sismique ; [157]). Les magnitudes des SMPP sont calculées à partir du catalogue de sismicité en ajoutant 0,3 à la valeur de la magnitude du SMS. Le modèle MS3 a fait l'objet d'un zonage créé spécifiquement pour le projet Meuse/Haute-Marne [95] [96]. Les magnitudes des SMPP sont tirées d'un calcul statistique complétant le catalogue historique vers les grandes magnitudes (méthode de Kijko, [162]).

Le procédé de détermination des spectres de réponse SMS et SMP des séismes pour les phases d'exploitation et de post-fermeture suit un arbre logique présenté Figure 9.

L'IRSN n'a pas de commentaire sur les séismes SMS retenus par l'ANDRA pour les trois modèles sismotectoniques. Le spectre de réponse en surface retenu par l'ANDRA pour la **phase d'exploitation** est le spectre minimal forfaitaire calé à 0,1 g comme le préconise la RFS 2001-01 pour les installations de surface, car il est plus pénalisant que le spectre SMS final (Figure 9) obtenu après pondération des spectres des trois modèles (poids de 0,4 pour MS1, 0,2 pour MS2, 0,4 pour MS3). Bien que l'ANDRA ne justifie pas cette pondération, l'IRSN considère

le choix du spectre forfaitaire calé à 0,1 g est acceptable car il englobe les spectres de réponse les plus pénalisants parmi les sources SMS retenues.

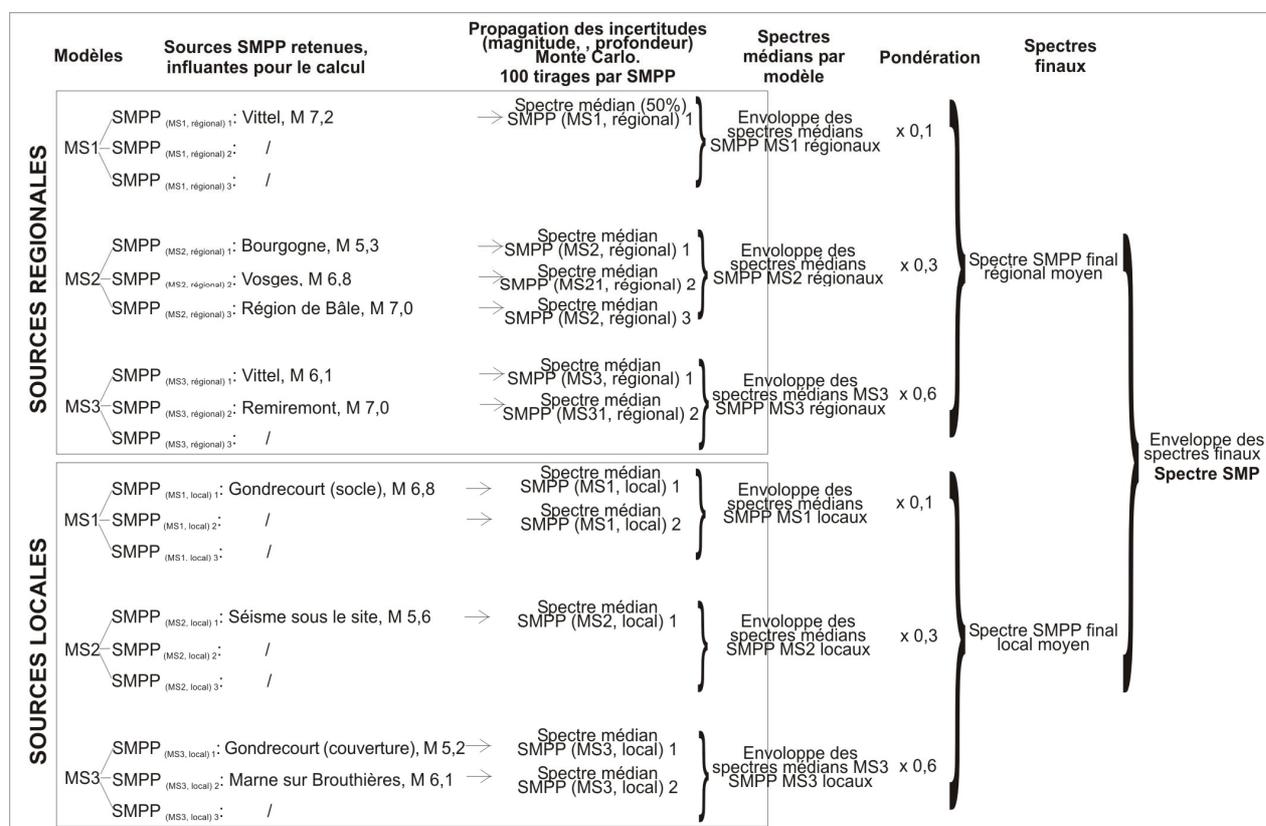


Figure 9 - Méthode de calcul utilisée par l'ANDRA pour définir les spectres finaux en surface, identique pour chacun des niveaux SMS et SMPP ; exemple du spectre SMP (niveau SMPP) [95].

Pour le spectre de réponse en surface pour la phase de post-fermeture, l'ANDRA a calculé le spectre SMP en pondérant les spectres SMPP locaux et régionaux de chacun des trois modèles, avec des poids de 0,1 pour MS1, 0,3 pour MS2 et 0,6 pour MS3, et obtient un spectre SMP calé à 0,21 g.

Pour ce qui concerne les séismes SMPP retenus pour chacun des modèles sismotectoniques, l'IRSN considère que l'estimation des SMPP de MS1 est acceptable et cohérente avec la RFS III.2.f, qui propose un calcul sur des bases physiques, alors que les modèles MS2 et MS3 dépendent du catalogue de sismicité historique, que l'IRSN estime peu adapté à des estimations sur de longues périodes associées à l'évaluation de la sûreté des stockages géologiques. Pour le modèle MS2, il est difficile de se prononcer sur le fait que l'accroissement systématique des magnitudes des SMS couvre la magnitude des séismes maximaux susceptibles de se produire en un million d'années ; cette estimation des SMPP n'est donc pas en accord avec la définition donnée par l'ANDRA d'une « magnitude maximale ». Enfin, le modèle MS3 est fondé sur des connaissances néotectoniques et paléosismiques, quasi-inexplorées dans la région.

D'un point de vue global, l'IRSN considère que la méthode de détermination du spectre SMP basé sur trois modèles sismotectoniques visant à compenser le manque de connaissance est intéressante car elle tient compte de sources d'information différentes. En revanche, la pondération des résultats des trois modèles présentée par l'ANDRA ne repose sur aucun argument réellement pertinent. L'IRSN constate que le modèle MS1 ne possède qu'un poids de 0,1 dans le calcul, du fait que l'ANDRA qualifie ce modèle comme une « borne maximale envisageable, peu réaliste » [5]. Les SMPP retenus par l'ANDRA dans ce modèle (et influant sur le calcul du spectre) concernent la faille de Vittel (magnitude M 7,2) en champ lointain, et les failles Gondrecourt (M 6,8) en champ proche (Figure 9), toutes considérées comme enracinées dans le socle. L'IRSN considère qu'il n'y a actuellement pas de données

montrant que ces estimations soient particulièrement irréalistes, compte tenu des incertitudes sur les très longues périodes considérées et du fait que l'enracinement des failles de Gondrecourt dans le socle (retenue par l'ANDRA à titre d'hypothèse pénalisante) n'est pas exclu (cf. chapitre 2.2.2.2 de ce rapport).

Pour l'estimation des **spectres en profondeur**, l'ANDRA retient un facteur d'atténuation de 1,5 en se basant sur le document [161], selon lesquels, pour un même séisme, les spectres de réponse en pseudo-vitesses calculés en profondeur présentent des amplitudes atténuées par rapport à la surface, dans une proportion variant de 1,5 à 10 selon la profondeur et la période spectrale considérée. L'IRSN constate cependant que cette étude est basée sur des séismes survenus hors du secteur de Bure (formations présentant des vitesses sismiques différentes). Des estimations préliminaires effectuées par l'IRSN, pour une profondeur de 475 m et avec un modèle de vitesse adapté au site (profil de sol dans [99]), suggèrent que l'amplification surface/profondeur serait voisine de 1 pour les plus hautes fréquences (pas d'atténuation). L'IRSN considère donc que, au stade actuel des connaissances, le facteur d'atténuation de 1,5 retenu par l'ANDRA est surestimé pour les hautes fréquences. L'IRSN note cependant que les lois d'atténuation des ondes sismiques pourront éventuellement être précisées, dans le cas où surviendrait un séisme, en comparant les spectres enregistrés sur le site par les accéléromètres installés en surface et en profondeur.

Par ailleurs, l'ANDRA a évalué les temps de retour des séismes SMPP retenus à partir de l'estimation de la vitesse du mouvement sur les failles, et a entrepris une démarche probabiliste pour valider ces temps de retour calculés.

L'ANDRA a fait le choix de ne pas mener « *d'étude spécifique de paléosismicité [...] car elle a retenu d'entrée l'hypothèse que les failles sont actives* » (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0205 du 26 septembre 2005). L'IRSN souligne que la faille de Vittel porte une signature morphologique nette qui peut être due à une activité paléosismique ; des études de paléosismicité auraient permis de préciser les magnitudes et d'estimer des temps de retour des séismes.

L'ANDRA estime que les vitesses de failles de la région Meuse/Haute-Marne « *ne peuvent être qu'inférieures à celles des failles actives du fossé du Rhin, région connue pour son activité sismotectonique* » (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0205), qui sont au minimum de 0,03 à 0,05 mm/an [158] [159] [163]. L'IRSN considère que la plus faible sismicité des failles de Meuse/Haute-Marne est vraisemblable, mais elle ne pourrait vraiment être confirmée que par des études de paléosismicité. L'ANDRA retient une vitesse entre  $10^{-4}$  et  $10^{-3}$  mm/an pour les failles de Vittel et de la Marne, et de moins de  $10^{-4}$  pour les failles de Gondrecourt et de la zone diffuse Marne-Poissons. Pour des séismes de magnitude 6,1 associés aux failles de la Marne et de 5,2 associés à des failles de couverture de type Gondrecourt (séismes SMPP du modèle MS3), l'ANDRA obtient des temps de retour respectivement de  $3 \cdot 10^5$  à  $5 \cdot 10^5$  ans et de  $5 \cdot 10^5$  ans. Sur la base d'une approche probabiliste, l'ANDRA [5] retient que l'événement niveau SMPP survient une fois au cours de la période post-fermeture. Pourtant, il est indiqué dans [96] que « *les spectres probabilistes à 100 000 ans sont très proches des caractéristiques du spectre SMPP déterministe médian. Ce spectre SMPP correspond donc sensiblement à une période de retour de 100 000 ans* ». L'IRSN considère que les estimations faites par l'ANDRA fournissent des ordres de grandeur possibles des temps de retour de séismes de niveau SMP, mais que des données manquent (paléosismicité ou géodésie) à ce stade pour en confirmer le bien-fondé. En tout état de cause, ces estimations seront affectées d'une très grande incertitude. Aussi, l'IRSN considère qu'il convient plutôt de privilégier une approche consistant à postuler l'occurrence de séismes majorants durant la période de post-fermeture du stockage (par exemple en retenant les spectres régional et local les plus pénalisants), et d'en étudier les effets éventuels sur la sûreté de ce dernier (cf. chapitre 7.2.2 du présent rapport).

En conclusion, l'IRSN considère que le spectre SMS calé à 0,1g retenu par l'ANDRA pour la phase d'exploitation-réversibilité est acceptable, mais que le mode de calcul du spectre SMP pour la phase de post-fermeture aboutit à un spectre en profondeur qui ne peut pas être considéré comme majorant. L'IRSN estime que les incertitudes sur l'estimation des SMPP et du spectre pénalisant qui peut en être déduit devront être réduites à l'avenir en précisant notamment la géométrie des failles et l'atténuation du spectre en profondeur.

Cependant, au regard du caractère probablement mineur des effets dynamiques du spectre SMS en profondeur sur les ouvrages d'un stockage (cf. chapitre 6.2.2 du présent rapport), et de la possibilité d'adapter la conception de l'installation de stockage pour pallier, a priori efficacement, les éventuels effets du SMP sur la barrière géologique (cf. chapitre 7 du présent rapport), l'IRSN considère que les incertitudes mentionnées ci-avant ne devraient pas être de nature, en l'état actuel des connaissances, à remettre en cause la sûreté d'une installation de stockage en cas de séisme.

### 2.2.3.2 Évolution climatique et géomorphologique passée, et géoprospective

L'ANDRA [5] a réalisé une étude de l'évolution du climat au Quaternaire, qui a fourni les informations nécessaires à la simulation de l'évolution climatique future (projet européen BIOCLIM), en fonction de l'insolation et de la teneur en CO<sub>2</sub>, principal gaz à effet de serre. Différents scénarii d'évolution naturelle ou perturbée par les activités humaines sont envisagés. L'IRSN considère que ces travaux sont d'une grande qualité. Dans l'éventualité de la poursuite des recherches de l'ANDRA en 2006, l'impact sur le climat des autres gaz à effet de serre, notamment le méthane, reste cependant à évaluer.

L'étude des effets du pergélisol et de l'isostasie lors des glaciations passées permet de proposer un scénario d'évolution des écoulements et de l'érosion (gélifraction, solifluxion, gélifluxion) lors des prochaines glaciations.

Par ailleurs, les études réalisées par l'ANDRA ont permis d'améliorer considérablement la connaissance de la géomorphologie régionale. La compréhension de l'évolution quaternaire du réseau hydrographique et de la géomorphologie en fonction du climat (glaciations), des phénomènes de surrection tectonique, d'isostasie et d'eustatisme a permis à l'ANDRA d'établir une carte des vitesses d'ablation des plateaux (1 à 3 m/10<sup>5</sup> ans) et d'incision des rivières (3 à 15 m/10<sup>5</sup> ans). Deux cartes topographiques géoprospectives sont calculées aux échéances de cinq cent mille ans et un million d'années, en admettant un maintien des valeurs d'incision actuelles maximales, estimées sur la base des évolutions récentes du réseau hydrographique et en considérant un taux de surrection tectonique égal, voire supérieur, à celui du dernier million d'années (80 à 100 m/10<sup>6</sup> ans).

L'IRSN estime que la prise en compte des **valeurs maximales** d'érosion, d'incision et de surrection du dernier million d'années est capitale, étant donné que les incertitudes sur ces valeurs, pourtant évoquées par l'ANDRA, ne sont pas quantifiées, et que l'hypothèse est prise d'un maintien du régime de contraintes actuel pour l'avenir. L'IRSN considère cependant que la validité de l'hypothèse prise d'un basculement E-W sans hétérogénéités locales de soulèvement pourrait être vérifiée, par exemple grâce à une nouvelle campagne de nivellement sur le secteur et une mise à jour des données existantes [160] [164].

L'IRSN admet que la seule **capture** envisageable à l'échéance du million d'années est celle de la tête de la vallée de la Saulx par le Rongean, et qu'elle ne devrait pas engendrer de modification majeure des vitesses d'incision et des directions d'écoulement du secteur. Par contre des **phénomènes de karstification de l'Oxfordien calcaire**, susceptibles de se produire sous une couverture de Kimméridgien de moins de 30 m d'épaisseur [5], pourraient favoriser des échanges entre vallées bien avant que des captures se produisent en surface. Des karsts existent à l'est des failles de Gondrecourt et d'autres pourraient se former à courte échéance à l'Ouest de ces failles avec l'érosion du Kimméridgien. Une karstification se développe déjà dans la vallée de la Thonnance, comme le montrent les structures mises en évidence dans le prolongement de la faille de Thonnance (forages EST321-322) et d'autres karstifications pourraient se produire aux abords des vallées (Rongean, Saulx, Orge, Ormançon) et être accélérées par la présence des failles de la zone diffuse Marne-Poissons.

En conclusion, l'IRSN considère que les modèles géoprospectifs à cinq cent mille ans et un million d'années présentés par l'ANDRA apparaissent concevables. Dans l'éventualité de la poursuite par l'ANDRA des études après 2006, des investigations complémentaires permettraient de préciser ces modèles géoprospectifs, telles qu'une étude des nivellements et la quantification des phénomènes de karstification dans l'Oxfordien calcaire.

## 2.2.4 HYDROGÉOLOGIE

L'élaboration d'un schéma d'écoulement des fluides dans le milieu géologique nécessite de prendre en considération tous les éléments susceptibles d'influencer les trajectoires et/ou les vitesses de transfert des solutés issus d'une éventuelle installation de stockage. Dans le présent chapitre, l'IRSN examine les résultats et les interprétations de l'ANDRA relatives à la caractérisation hydrogéologique et hydrogéochemie du secteur de Meuse/Haute-Marne. Le schéma conceptuel hydrogéologique découlant de cette caractérisation sous-tend la modélisation des écoulements, examinée au chapitre 2.2.4.3 du présent rapport, dont le but est d'appréhender les trajectoires possibles de radionucléides issus d'un éventuel stockage souterrain, leur dilution progressive dans les eaux des formations géologiques traversées ainsi que la localisation des exutoires et les temps de transfert associés.

La caractérisation et la modélisation hydrogéologique du site de Bure effectuées par l'ANDRA sont présentées dans le document [5] intitulé « *Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne* », ainsi que dans des documents techniques dont les références sont précisées au fil du texte.

### 2.2.4.1 Caractérisations hydrogéologique et hydrogéochemie du secteur de Meuse/Haute-Marne

Le secteur du laboratoire a fait l'objet d'une reconnaissance, depuis la surface, des comportements hydrauliques des différentes formations à l'aide de plusieurs campagnes de forage. Ces campagnes se sont déroulées à l'échelle du secteur et du laboratoire (cf. chapitre 2.2.1.2 du présent rapport). Un grand nombre de données hydrogéologiques et hydrogéochemie a ainsi été acquis pour les différentes formations allant de la surface au Dogger. La localisation des forages réalisés par l'ANDRA est présentée dans la Figure 2 et la Figure 3.

Les formations supérieures investiguées par l'ANDRA sont constituées, en surface, des calcaires du Barrois (aquifère à surface libre d'âge Tithonien) et du Kimméridgien sous-jacent (semi-perméable marneux affleurant dans la partie Sud-Est du secteur). Tous les horizons calcaires rencontrés au niveau du secteur (Barrois, Kimméridgien, Oxfordien et Dogger) présentent un certain degré de karstification à l'affleurement, qui disparaît rapidement lors du passage sous couverture. Les paramètres hydrodynamiques généraux des différentes formations sont résumés dans un tableau en Annexe T4-A au présent rapport. À l'exception des caractéristiques hydrogéologique et hydrogéochemie de l'Oxfordien et du Dogger, aquifères encaissants de la couche hôte, qui font l'objet d'une évaluation détaillée dans les chapitres suivants, les investigations réalisées par l'ANDRA concernant les formations supérieures n'appellent pas de remarque particulière de la part de l'IRSN.

Pour ce qui concerne la caractérisation des horizons sous-jacents du Dogger, à savoir le semi-perméable du Lias, et l'aquifère du Trias, aucune donnée n'est à ce jour disponible à l'échelle du secteur. L'IRSN regrette qu'aucun forage ANDRA n'ait atteint ces niveaux, étant donné l'apport de connaissance qui aurait pu être apporté par de telles investigations, notamment sur l'origine du sel mesuré dans le Dogger (cf. chapitre 2.2.4.1.3 du présent rapport), qui est une donnée importante pour le calage des modélisations et, en conséquence, pour la compréhension des écoulements souterrains. L'IRSN considère qu'il serait nécessaire d'acquérir de telles données à l'avenir, en cas de poursuite d'un projet de stockage géologique dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien.

### 2.2.4.1.1 Hydrogéologie de l'Oxfordien

L'Oxfordien constitue l'encassant supérieur de la couche hôte. Depuis le dernier référentiel géologique [83], où seuls 3 forages permettaient de caractériser cette formation, un grand nombre de mesures a pu être acquis, grâce à 7 forages répartis sur le secteur d'étude et 4 forages localisés sur le Laboratoire. Le rapport [12] intitulé « *Oxfordien calcaire – Rapport de synthèse* » résume les caractéristiques, notamment hydrogéologiques, de l'Oxfordien. La caractérisation hydrodynamique de cet aquifère repose sur la mise en oeuvre de diverses méthodes complémentaires comprenant des essais hydrauliques de courte durée (pompage global, diagraphies géochimiques, débitmétrie, tests entre obturateurs) ainsi que des mesures de diagraphies de porosité, des mesures de pression à long terme, des essais d'interférences hydrauliques et de traçage entre forages. **L'IRSN estime que la méthodologie retenue par l'ANDRA est pertinente et considère que la caractérisation qui en résulte est de bonne qualité.**

Les principales caractéristiques de l'Oxfordien sont présentées ci-après, tout d'abord au niveau du secteur, puis à l'échelle du laboratoire. Cette dernière, plus détaillée, s'appuie en outre sur la modélisation du suivi de la perturbation hydraulique induite dans cet aquifère par le forage des puits principal et auxiliaire d'accès au laboratoire souterrain.

**À l'échelle du secteur**, l'esquisse piézométrique établie par l'ANDRA indique des écoulements s'inscrivant dans un faisceau NW à SW (les trajectoires les plus au Sud du faisceau atteignant un point bas situé sur le cours de la Marne, près de Joinville), avec un gradient hydraulique moyen de l'aquifère de l'ordre de 0,4 % à 0,5 %, et un « dôme » piézométrique situé à proximité du laboratoire, coupé par le fossé de Gondrecourt. L'alimentation se fait principalement depuis les affleurements à l'Est et au Sud du site.

Pour ce qui concerne les paramètres hydrodynamiques de l'Oxfordien (cf. Annexe T4-A au présent rapport), les mesures de perméabilité obtenues au niveau du secteur sont plus faibles que celles mesurées dans le reste du bassin de Paris. L'ANDRA fait ainsi état d'une « zone de faible perméabilité » dans son schéma conceptuel (cf. chapitre 2.2.4.2 du présent rapport). Deux zones de transmissivité plus importante (d'un à trois ordres de grandeur), liées d'une part à une fracture sub-v verticale ouverte interceptée au niveau du forage EST321, et d'autre part à un mince niveau sédimentaire (zone à oolithes) dans le forage EST311 [12], ont néanmoins été mises en évidence, indiquant une certaine hétérogénéité de l'aquifère. La localisation des forages ANDRA est donnée dans la Figure 2 (chapitre 2.2.1.2 du présent rapport).

**À l'échelle du laboratoire** des analyses diagraphiques et géologiques ont été réalisées dans cet aquifère et ont permis d'identifier sept horizons poreux (Hp), qui sont des niveaux plus producteurs, de porosité supérieure ou égale à 18 % (cf. Figure 10 ci-après).

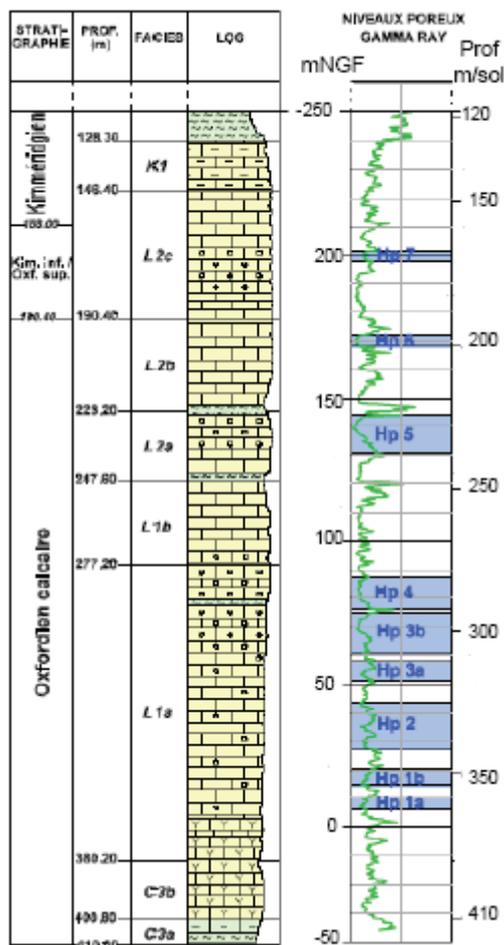


Figure 10 - Localisation des horizons poreux dans le forage EST201 [12].

Les données obtenues par l'ANDRA confirment la continuité et l'homogénéité à une échelle pluri-kilométrique des horizons supérieurs (Hp7 à Hp5) qui correspondent à des repères diagraphiques bien marqués, espacés de 15 à 35 m. Le niveau poreux intermédiaire Hp5 est situé à environ 40 m au-dessus des niveaux poreux Hp4 à Hp1, plus resserrés et épais que les horizons poreux supérieurs. Il est précisé, dans le rapport [110], que le rôle hydraulique de ces différents horizons poreux n'est pas exclusif, dans la mesure où des venues d'eau ont été détectées entre ces niveaux, à des profondeurs variant d'un forage à l'autre. Le rapport [110] conclut que la « *variabilité latérale [des venues d'eau] entre forages est cohérente avec un mode d'écoulement potentiel lié à des discontinuités du massif rocheux (diaclasses et joints). Elle pourrait représenter la manifestation, recoupée par les forages, de possibles connexions hydrauliques verticales entre niveaux poreux* ».

Pour ce qui concerne les charges hydrauliques individuelles de ces niveaux producteurs, les pressions mesurées à l'aide d'équipements multi-obturateurs avant le creusement des deux puits ont permis de montrer [12] que « *toutes les charges hydrauliques individuelles étaient comprises dans la gamme de 305 m NGF ± 1 m [et que] cette gamme étroite laisse supposer que les différents horizons producteurs sont connectés entre eux à plus ou moins grande distance* ». La charge hydraulique, globalement constante sur toute la hauteur de la couche calcaire montre pour l'ANDRA qu'il existe « *une connexion hydraulique entre strates sur toute la puissance de la formation* », qu'elle explique par des variations latérales de faciès et/ou des connexions d'origine structurale. L'ANDRA explique aussi cette homogénéité verticale de la charge hydraulique par « *une mise en charge unique aux affleurements (zone de karstification), ou au niveau d'une faille (rôle hydraulique du fossé de Gondrecourt) ou éventuellement par drainances verticales entre strates* ». Dans son modèle conceptuel, l'ANDRA privilégie cependant l'hypothèse d'une connexion sédimentaire.

L'analyse des rabattements observés dans les trois forages de suivi du fonçage des puits principal et auxiliaire a aussi permis de mettre en évidence des connexions entre les différents horizons poreux. Dans le rapport [12], l'ANDRA indique que ce suivi a permis de rassembler les horizons poreux « *en trois groupes, présentant des connexions entre eux et au moins partiellement isolés hydrauliquement des autres* ». Il s'agit des groupes Hp1-Hp4, Hp5 et Hp6-Hp7 (cf. Figure 10). L'ANDRA indique, dans le référentiel du site [5], que « *cette organisation hydraulique semble cohérente avec les caractéristiques chimiques des eaux. En effet, les niveaux Hp6 et Hp7 ont un faciès chimique bicarbonaté sulfaté magnésien alors que celui des niveaux Hp1-4 est bicarbonaté sulfaté sodique* ». Les interprétations des données géochimiques sont examinées au chapitre 2.2.4.1.3 du présent rapport.

La modélisation de la perturbation hydraulique induite par le fonçage des puits a été réalisée à l'aide du modèle dit « *de site* » de l'ANDRA, dont l'échelle se rapproche de celle du modèle hydrogéologique « *de secteur* » (31 km × 41 km). Le modèle « *de site* » diffère du modèle « *de secteur* » par une discrétisation des couches sus-jacentes à la formation hôte plus précise (représentation des niveaux poreux Hp1 à Hp7) afin de simuler, en régime transitoire, les rabattements engendrés dans l'aquifère Oxfordien par le fonçage des puits principal et auxiliaire du laboratoire, principalement dans le but de valider les paramètres hydrodynamiques utilisés à l'échelle du secteur. La simulation des rabattements, décrite en détail dans le rapport [106], a été effectuée individuellement pour chaque forage, chaque calage générant un jeu de paramètres spécifique. La représentation de la connexion verticale régnant entre les différents horizons poreux est simulée par l'introduction d'une anisotropie verticale des perméabilités, homogène sur toute l'extension du modèle.

Les résultats présentés dans le référentiel du site [5] sont issus du calage focalisé sur le forage EST201 (cf. Figure 3 du chapitre 2.2.1.2 du présent rapport pour la localisation des forages sur le site du laboratoire). Les résultats obtenus avec ce jeu de paramètres montrent une bonne restitution des rabattements dans les niveaux poreux du forage EST201, et dans les niveaux poreux inférieurs (Hp1-4) du forage EST203, alors que les rabattements dans les niveaux poreux du forage EST104 ne sont pas correctement reproduits.

**Compte tenu de l'ensemble des éléments mentionnés ci-avant, l'IRSN estime qu'il existe effectivement, au sein de l'Oxfordien, une composante dominante des écoulements selon une direction NW. Néanmoins, l'IRSN considère qu'il existe également une possibilité de circulations hétérogènes dans cette formation.** En effet, les résultats des modélisations réalisées par l'ANDRA ne restituent pas convenablement les rabattements mesurés dans les forages de suivi des perturbations ; cela est vraisemblablement dû au fait que l'ANDRA ne représente pas explicitement, dans son modèle, la connexion des horizons poreux par des structures drainantes. À cet égard, l'IRSN rappelle, ainsi que déjà indiqué dans le rapport DES n° 514 présenté lors de la réunion du groupe permanent déchets du 19 novembre 2002 et consacré à l'examen du référentiel géologique et de la modélisation hydrogéologique du site de Bure, qu'étant donné que le niveau poreux Hp5 est situé à environ 40 m au-dessus de l'ensemble Hp4-Hp1, il est peu probable que ces niveaux soient connectés entre eux du fait de variations latérales de faciès, mais plus probablement par des structures verticales (diaclasses ou fractures). Par ailleurs, l'IRSN a réalisé des simulations des rabattements observés dans les niveaux poreux lors du fonçage des puits. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de simuler la perturbation hydraulique de l'Oxfordien, simultanément pour les trois forages, en attribuant une perméabilité verticale faible aux couches séparant les niveaux poreux, associée à la présence de structures hydrauliquement conductrices (voir Annexe T4-D du présent rapport). L'hypothèse de structures drainantes permettrait aussi d'expliquer les venues d'eau en dehors des niveaux poreux. **L'IRSN considère donc qu'à l'échelle du laboratoire, le comportement hydraulique de l'aquifère de l'Oxfordien est influencé par la présence d'hétérogénéités, mais il demeure difficile d'apprécier, du fait d'un manque de données, si de telles hétérogénéités s'organisent en réseau à l'échelle du secteur et sont susceptibles de constituer un chemin préférentiel d'écoulement.** L'IRSN considère qu'il est important à l'avenir d'être en mesure de statuer sur la possibilité ou non que des transferts localisés, à l'échelle du secteur, puissent remettre en cause le caractère globalement homogène des écoulements déduit par l'ANDRA sur la base des données piézométriques aujourd'hui disponibles.

Lors de la réunion préparatoire du 8 novembre 2005, l'ANDRA a indiqué oralement que de nouvelles simulations des rabattements avaient été effectuées, générant un calage satisfaisant pour les trois forages simultanément. D'après l'ANDRA, les hypothèses de calage utilisées pour cette modélisation sont la présence de diaclases, de transmissivités comprises entre  $10^{-11}$  et  $10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, peu susceptibles de remettre en cause le caractère globalement homogène des écoulements précité. **L'IRSN n'exclut pas cette hypothèse mais considère qu'elle devra nécessairement être confirmée (ou infirmée) par l'acquisition de données complémentaires.**

#### **2.2.4.1.2 Hydrogéologie du Dogger**

En tant que formation sous-jacente de la couche hôte, le Dogger est une voie de transfert possible des radionucléides au même titre que l'Oxfordien. La caractérisation de cet aquifère a progressé depuis le référentiel géologique du site présenté par l'ANDRA en 2001 [83] ; le nombre de forages répartis à l'échelle du secteur est passé de 2 à 5 (forages FSP), auxquels d'ajoutent 2 nouveaux forages localisés sur le laboratoire (forages FRF).

Le Dogger comprend les aquifères du Bathonien et du Bajocien, séparés par la formation semi-perméable des marnes de Longwy. L'esquisse piézométrique établie par l'ANDRA fait apparaître un gradient de charge hydraulique très faible (entre 0,06 % et 0,2 %) se dirigeant vers l'Ouest pour la partie nord du secteur, et vers le Sud-Ouest pour la partie sud. Au droit du laboratoire, la charge hydraulique est d'environ 290 m NGF. Les paramètres hydrodynamiques généraux du Dogger sont présentés en Annexe T4-A au présent rapport. Cet aquifère est globalement très peu perméable, avec deux principales zones de production situées, au niveau du forage MSE101, à 20 m et 82 m sous le mur du Callovo-Oxfordien. L'ANDRA indique par ailleurs, dans le référentiel du site [5], que dans le Dogger, « *les écoulements sont limités à de petits horizons localisés à différents niveaux dans chaque forage. Une hypothèse pourrait être l'extrême chenalisation de ces écoulements, certaines zones étant déconnectées des autres* ». L'IRSN note que les propriétés de ces « *chenalisations* » sont encore mal connues et que, selon leur nature (sédimentaire ou structurale), elles peuvent avoir des incidences très différentes sur les vitesses d'écoulement.

L'IRSN signale par ailleurs qu'à l'heure actuelle, aucune des modélisations réalisées (que ce soit par l'IRSN ou par l'ANDRA) n'a permis de restituer simultanément les valeurs de charge et de salinité mesurées dans cet aquifère à l'échelle du secteur, malgré le faible nombre de mesures disponible, ce qui montre que le comportement des écoulements dans cet aquifère n'est pas encore complètement compris.

**Au vu des données acquises à l'échelle du secteur et sur le site du laboratoire, l'IRSN estime que l'aquifère du Dogger est très peu perméable et que cette propriété, associée à un faible gradient hydraulique, engendre des écoulements probablement très lents dans cette formation. Cette interprétation n'est cependant basée que sur un nombre très limité de mesures qui, de surcroît, ne peuvent pas être à l'heure actuelle reproduites de manière satisfaisante par les modélisations hydrogéologiques. L'IRSN considère donc qu'il faudra progresser dans la connaissance des écoulements dans la formation du Dogger pour confirmer si ceux-ci sont aussi lents que semblent indiquer les données piézométriques et de perméabilité. Il conviendra à cet égard d'évaluer, à l'instar de l'Oxfordien, si des écoulements hétérogènes (typiques des écoulements dominants dans des calcaires massifs) sont susceptibles d'être des chemins préférentiels de migration de solutés.**

#### **2.2.4.1.3 Hydrogéochimie des aquifères**

L'analyse des données géochimiques et isotopiques des eaux vient en appui de la conceptualisation du système hydrogéologique. Ces données, présentées dans le référentiel du site [5], proviennent de l'analyse d'échantillons d'eau prélevés dans les forages du laboratoire et les forages FSP du secteur. Ce chapitre est consacré à l'examen des interprétations de l'ANDRA de la chimie des eaux des formations sous couverture, au regard de l'origine des salinités mesurées dans les encaissants, des relations pouvant exister entre différents aquifères ainsi que de la détermination du temps de résidence des eaux.

L'IRSN observe en premier lieu, que les données géochimiques dans les eaux extraites des forages situés dans l'emprise du laboratoire ne montrent pas d'indices pouvant s'interpréter par la présence d'eaux récentes dans les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien, ceci pour un nombre important d'indicateurs géochimiques mesurés ( $\delta^{37}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ). Les très bonnes conditions de prélèvement qu'offrent les forages du laboratoire permettent en particulier d'écarter plus facilement les risques de contamination des eaux que dans le cas des forages FSP à l'échelle du secteur, pour lesquels les prélèvements s'effectuent depuis la surface.

Pour ce qui concerne les mesures de salinité des eaux, l'ANDRA indique qu'à l'échelle régionale, cette salinité est caractérisée dans le bassin de Paris par une « *variation spatiale tridimensionnelle* », avec des valeurs augmentant graduellement des affleurements vers le centre du bassin, mais aussi croissant avec la profondeur. L'ANDRA ajoute que des transferts verticaux de « *saumures triasiques vers l'aquifère du Dogger se sont effectués par advection rapide, à la faveur de failles* ». Cette interprétation n'appelle pas de commentaire de l'IRSN. L'observation des cartes de salinité à l'échelle du bassin de Paris montre en effet que les accidents tectoniques majeurs que sont les failles de Bray, d'Omey et de Champagne jouent un rôle important dans les transferts de fluides et de sel entre les aquifères du Trias et du Dogger, et probablement de l'Oxfordien.

A l'échelle du secteur, contrairement aux mécanismes régnant à l'échelle régionale, l'ANDRA montre que les teneurs en  $\delta^{37}\text{Cl}^1$  des eaux des calcaires de l'Oxfordien comme celles du Dogger sont presque toutes négatives<sup>2</sup>, avec une valeur décroissant avec la profondeur, suggérant un transport diffusif depuis les formations argileuses sous-jacentes. À cet égard, l'ANDRA indique notamment par lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0209 du 26 septembre 2005, qu'« *une origine du sel par diffusion depuis le Trias vers le Dogger au travers du Lias [...] est l'hypothèse la plus plausible dans le cadre du fonctionnement actuel du système hydrogéologique au niveau du secteur* ». L'IRSN constate que l'hypothèse d'acquisition des salinités des aquifères du Dogger et de l'Oxfordien par diffusion, respectivement depuis les formations argileuses du Lias et du Callovo-Oxfordien, est effectivement cohérente avec les données disponibles ( $\delta^{37}\text{Cl}$ , profils de chlore). L'IRSN note cependant un fort enrichissement en isotopes lourds et une salinité élevée dans les eaux des forages EST311 prélevées dans l'Oxfordien et EST312, MSE101 dans le Dogger. Ces enrichissements pourraient traduire l'existence d'eaux piégées par densité dans la cuvette formée par le synclinal de Savonnières.

Les données de salinité semblent donc indiquer que les argilites du Callovo-Oxfordien empêchent globalement les transferts convectifs entre ses deux formations encaissantes. Cette tendance est par ailleurs confirmée par l'interprétation des faciès géochimiques des eaux de ces formations. À l'échelle du secteur, les eaux du Dogger analysées par l'ANDRA présentent un faciès « *chloruré sulfaté-sodique* », se distinguant en effet généralement des eaux de l'Oxfordien, de faciès « *sulfaté-sodique à magnésien* ». Par ailleurs les eaux du Dogger et de l'Oxfordien sont généralement fortement minéralisées, suggérant l'absence d'échanges significatifs avec les eaux de surface.

L'IRSN constate toutefois que si les eaux des encaissants apparaissent globalement confinées, il existe néanmoins un certain nombre d'anomalies concernant des prélèvements effectués dans des forages situés à proximité de structures cartographiées (failles de la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons et failles de Gondrecourt). En effet, d'après les analyses effectuées par le groupe de recherche (GdR) FORPRO [175], les eaux des forages EST321 et EST351 prélevées dans l'Oxfordien présentent des valeurs de  $\delta^{37}\text{Cl}$  proches de 0<sup>3</sup> pour les chlorures dissous des eaux, suggérant la participation d'un transport convectif du chlore depuis les formations superficielles. Ces deux forages, situés dans la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons, présentent également des minéralisations plus

---

<sup>1</sup> La valeur du  $\delta^{37}\text{Cl}$  renseigne sur une éventuelle ségrégation entre les deux isotopes stables du chlore, le  $^{35}\text{Cl}$  et le  $^{37}\text{Cl}$ , du fait de leur différence de masse atomique. Ainsi, le  $^{37}\text{Cl}$ , plus lourd, migre plus lentement par diffusion que le  $^{35}\text{Cl}$ .

<sup>2</sup> Les valeurs de  $\delta^{37}\text{Cl}$  négatives sont caractéristiques de cette ségrégation des isotopes lourds du chlore, suggérant donc un transport diffusif depuis les formations argileuses.

<sup>3</sup> Des valeurs de  $\delta^{37}\text{Cl}$  proches de 0 suggèrent que les chlorures dissous ont une origine atmosphérique, acquise par transport d'embruns marins lors du processus d'évaporation océanique

faibles que dans le reste du secteur. C'est également le cas du forage EST331 situé à proximité des failles de Gondrecourt. Enfin, les eaux du Dogger prélevées dans le forage EST322 sont de faible salinité en comparaison des eaux prélevées dans le reste du secteur et présentent une composition isotopique plutôt représentative d'un mélange bipolaire entre les eaux de l'aquifère Oxfordien (sous couverture) avec celles de l'aquifère du Dogger [5].

Il est à noter que certaines données obtenues sur ces forages peuvent fournir des indications en apparence contradictoires. Ainsi, le forage EST331 présente des eaux faiblement minéralisées, indiquant une possible provenance superficielle des eaux. Mais les mesures de  $\delta^{37}\text{Cl}$  effectuées sur ces mêmes prélèvements présentent des valeurs négatives suggérant, à l'inverse, l'influence d'un transport diffusif sur le rapport isotopique, et donc un renouvellement faible de ces eaux. Par ailleurs, le forage EST322 est localisé dans une zone de gradient hydraulique ascendant (du Dogger à l'Oxfordien) peu compatible avec la possibilité d'obtenir le profil isotopique mesuré dans les eaux prélevées dans ce forage (qui suggère au contraire un transfert d'eau depuis l'encaissant supérieur).

L'IRSN signale que d'autres mesures ont été effectuées pour déterminer les temps de résidence des eaux prélevées dans ces mêmes forages ainsi que dans les forages EST311 et EST312 localisés dans la partie Nord-Est du secteur et le forage EST342 situé au Sud-Ouest de Joinville. Ces mesures, effectuées par différents laboratoires dans le cadre du GdR FORPRO [175], ont consisté en l'analyse des concentrations en  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^4\text{He}$  et  $^{36}\text{Cl}$  des eaux.

Concernant le  $^{14}\text{C}$  et le  $^3\text{H}$ , l'ANDRA conclut, dans le référentiel du site [5], à l'absence de radiocarbone dans tous les échantillons « protégés des contaminations atmosphériques ». L'ANDRA estime donc que les temps de résidence des eaux dans les aquifères sont systématiquement supérieurs à 40 000 ans. L'IRSN note cependant qu'il existe une contradiction entre ces conclusions et les résultats des mesures présentées dans le rapport [175] précité. À la suite d'une analyse détaillée des différents phénomènes ayant pu affecter les prélèvements, le rapport [175] signale que des teneurs en  $^{14}\text{C}$  supérieures à la limite de détection (0,5 pMC<sup>4</sup>) sont mesurées dans des prélèvements d'eau effectués dans 5 forages. Trois de ces prélèvements (EST351 à l'Oxfordien, EST322 et EST342 au Dogger) ont des teneurs comprises entre 0,5 et 1 pMC. L'ANDRA précise (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0235 du 23 novembre 2005) que d'après le rapport [175], « l'influence d'une faible contamination atmosphérique sur ces 3 échantillons à basses teneurs en  $^{14}\text{C}$  est probable et devra être testée par duplicata ». Concernant les deux autres prélèvements (EST331 à l'Oxfordien et EST312 au Dogger), dont les teneurs sont supérieures à 1 pMC, le rapport [175] indique que ces teneurs ne peuvent que difficilement être expliquées par une simple contamination. Néanmoins, une seconde analyse réalisée sur le forage EST331 a fourni une valeur très faible, suggérant « qu'il n'y a pas de venues d'eaux récentes dans le forage EST331 au niveau des calcaires oxfordiens et donc que l'anomalie de l'échantillon [...] relève d'une contamination atmosphérique non détectée, par exemple lors du prélèvement ». Pour ce qui concerne les forages EST311 et EST321, l'IRSN note, toujours selon les analyses présentées dans le rapport [175] précité, la présence de  $^3\text{H}$  dans les eaux prélevées dans l'Oxfordien, qui pourrait suggérer la présence d'eaux infiltrées à la faveur de la zone fracturée Marne-Poissons depuis la période d'explosions thermonucléaires aériennes des années 1950-1960. Toutefois, ces mesures de  $^3\text{H}$  sont en contradiction avec l'absence de radiocarbone constatée sur les forages EST321 et EST311, ce qui tend à confirmer l'hypothèse avancée par l'ANDRA d'une contamination en  $^3\text{H}$  lors du conditionnement du prélèvement. Les eaux prélevées dans le forage EST331 en revanche, présentent simultanément la présence de  $^{14}\text{C}$  et de  $^3\text{H}$ , qui, si elle n'est pas liée à une contamination, confirmerait la tendance indiquée par la faible minéralisation de ces eaux, et donc une possible infiltration des eaux de surface à la faveur des failles de Gondrecourt. **L'IRSN estime que d'une manière générale, les résultats des mesures de  $^{14}\text{C}$  et  $^3\text{H}$  dans les forages précités sont difficilement exploitables.**

Concernant le  $^{36}\text{Cl}$ , l'ANDRA a réalisé, au moyen de cet indicateur géochimique, une première estimation du temps de résidence des eaux dans l'Oxfordien. À cet égard, l'ANDRA indique (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0235 du 23 novembre 2005), que « l'échantillon d'eau pour lequel la datation [...] n'est pas sujette à caution est EST321 [...] ».

---

<sup>4</sup> pMC : percentage of Modern Carbon

*Par contre, des corrections doivent être apportées pour les échantillons [issus des forages] EST351 et Hp6-7 [...]. Il en est de même pour l'échantillon [prélevé dans le forage] EST331 ».* Selon ces données, le temps de résidence des eaux à l'aplomb de ces forages serait de l'ordre de 200 à 800 ka. L'IRSN remarque que ces temps de résidence longs sont en contradiction avec la minéralisation faible des eaux prélevées dans ces forages, qui tend à montrer un renouvellement relativement rapide des eaux. Par ailleurs, l'IRSN rappelle que la mesure du  $^{36}\text{Cl}$  n'autorise une estimation du temps de résidence que si cet indicateur géochimique a évolué en système clos et si l'activité initiale de ce radionucléide au moment où le système se ferme est connue. Or, l'IRSN constate que l'ANDRA a négligé, d'une part la production radiogénique in situ par irradiation neutronique de  $^{36}\text{Cl}$ , d'autre part les mélanges éventuels avec du Cl aqueux transporté par diffusion depuis les formations argileuses (Callovo-Oxfordien et Lias) en considérant, en première approximation, que seule la décroissance radioactive explique les rapports  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  mesurés. Aussi, l'IRSN considère que les temps de résidence annoncés par l'ANDRA à partir des analyses de  $^{36}\text{Cl}$  ne peuvent être considérés comme fiables.

Enfin, une estimation de l'âge apparent des fluides a également été effectuée [175] à partir de la teneur en  $^4\text{He}$  dans ces fluides. L'IRSN constate que les âges apparents des eaux obtenus sont très élevés (de l'ordre de plusieurs millions d'années), mais considère qu'ils sont vraisemblablement entachés d'une grande incertitude. En effet, l'IRSN note la présence d'alcanes d'origine thermogénique dans le Callovo-Oxfordien (i.e. ayant subi des températures  $\geq 100^\circ\text{C}$ ). La présence de ces gaz, générés dans des formations dans lesquelles régnait une température bien supérieure à celle du Callovo-Oxfordien, indique une migration de gaz depuis les couches sous-jacentes à la formation hôte. Il est donc probable que l' $^4\text{He}$ , gaz rare, soit également issu de ces mêmes couches profondes. Les datations retenues par l'ANDRA n'étant fondées que sur l'hypothèse d'une production radiogénique in situ de l' $^4\text{He}$ , ne tenant par conséquent pas compte d'une probable contamination des eaux par une source supplémentaire d' $^4\text{He}$  issue des formations sous-jacentes et du socle, l'IRSN considère que les âges estimés au moyen de cet indicateur sont également sujets à caution.

En conclusion, l'IRSN considère qu'il est extrêmement difficile, sur la base des données acquises, d'estimer précisément les temps de résidence des eaux dans les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien. Si, de manière qualitative, les données acquises ne mettent pas en évidence, sur la plus grande partie du secteur étudié, des échanges convectifs entre les formations du Dogger, de l'Oxfordien et les formations superficielles, cette tendance n'est pas toujours confirmée dans les zones de failles cartographiées, notamment pour ce qui concerne la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons et les failles de Gondrecourt. Les données acquises dans ces zones peuvent conduire à des interprétations parfois contradictoires quant au rôle hydraulique exact de ces structures. L'IRSN constate néanmoins que parmi les données géochimiques mesurées, celles qui sont, a priori, les plus fiables (salinités, faciès chimique, compositions isotopiques des eaux) tendent à montrer que des eaux pourraient s'être infiltrées relativement rapidement à la faveur de ces structures depuis la surface jusqu'à l'aquifère de l'Oxfordien, ou depuis cet aquifère vers celui du Dogger. Le rôle hydraulique de telles structures pouvant être important pour comprendre les circulations de fluides à l'échelle du secteur, l'IRSN considère qu'il conviendra à l'avenir de le préciser par des investigations complémentaires.

#### **2.2.4.2 Modèle conceptuel hydrogéologique**

Le modèle conceptuel hydrogéologique défini par l'ANDRA repose sur un schéma général d'écoulement des fluides dans les aquifères du bassin de Paris gouverné par le pendage régulier des couches vers l'Ouest et le Nord-Ouest. Ce modèle représente une cuvette formée par une alternance d'horizons aquifères et semi-perméables, dont l'alimentation se fait à partir des affleurements situés à l'Est et au Sud du site. L'Oxfordien calcaire et le dogger comprennent respectivement 5 et 4 couches aquifères. Pour ce qui concerne la piézométrie des encaissants, les charges du Dogger, plus importantes que celles de l'Oxfordien dans la majeure partie du secteur, génèrent un

gradient d'écoulement ascendant. Il existe cependant, dans la partie Sud-Est du secteur (où se situe le laboratoire), une zone où ce gradient est inversé.

Au niveau du secteur, une « zone de faible perméabilité », cohérente avec les mesures relevées dans les forages ANDRA, a été retenue. Le modèle tient compte par ailleurs d'une zone de fracturation mineure (zone de fracturation diffuse Marne-Poissons) d'orientation NW, localisée au Sud-Ouest de la vallée de la Saulx, et limitée à l'Est par le fossé de Gondrecourt. Cette fracturation mineure a été générée statistiquement à partir de la répartition des failles régionales et secondaires du secteur. Enfin, un rôle hydraulique des failles n'a pas été retenu par l'ANDRA pour modéliser les écoulements. Les transferts verticaux se font donc principalement par drainance.

**L'IRSN considère que la conception générale du modèle hydrogéologique présentée par l'ANDRA est globalement cohérente avec les données acquises, hormis pour ce qui concerne le rôle hydraulique des structures reconnues.** En effet, à l'échelle du secteur, l'ANDRA suppose que les failles de Gondrecourt, de Joinville, de la Marne et de Poissons n'ont pas de rôle hydraulique. Or l'IRSN considère qu'à la lumière des données récentes de charges et de géochimie issues des forages du secteur, des transferts à l'aplomb de ces structures entre l'Oxfordien et le Barrois d'une part, l'Oxfordien et le Dogger d'autre part, ne peuvent être écartés. Aussi, l'IRSN considère que l'ANDRA aurait dû prendre en compte, à ce stade, un rôle hydraulique transmissif des failles majeures du secteur dans son modèle conceptuel. L'IRSN présente une interprétation du rôle hydraulique possible de ces structures dans l'Annexe T4-B au présent rapport et conclut qu'il pourrait être retenu, en l'état actuel des connaissances un rôle drainant :

- de la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons, verticalement entre la surface et l'Oxfordien, localement entre l'Oxfordien et le Dogger (zone de gradient descendant), et horizontalement dans l'Oxfordien et dans le Dogger ;
- des failles de Gondrecourt, au moins entre la surface et l'Oxfordien ;
- des failles de la Marne entre la surface et l'Oxfordien.

De plus, l'IRSN considère qu'un rôle drainant des grandes failles régionales, qui montrent une influence importante dans la répartition des salinités à l'Ouest du bassin de Paris, aurait dû également être pris en compte dans le modèle hydrogéologique.

Enfin l'IRSN estime que le modèle conceptuel hydrogéologique devra être précisé à l'avenir. En premier lieu, l'extension possible de la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons dans sa partie Sud-Est, au-delà des failles de Gondrecourt, devra être évaluée. L'IRSN considère également qu'il conviendra de mieux caractériser la zone Nord du site en vue de confirmer (ou d'infirmier) l'absence de failles secondaires qui pourraient influencer les écoulements notamment dans les formations encaissantes de la couche hôte. Enfin, il conviendra d'examiner plus précisément le rôle possible des connexions entre les horizons poreux de l'Oxfordien calcaire sur les écoulements dans cet aquifère. À cet égard, l'IRSN estime qu'il serait préférable de représenter explicitement ces horizons poreux dans la modélisation hydrogéologique réalisée à l'échelle du secteur plutôt que de conserver la représentation actuelle (5 couches aquifères, non séparées par des semi-perméables, correspondant aux unités stratigraphiques observées à l'échelle régionale). En effet, le choix d'une représentation ou d'une autre est susceptible d'avoir une incidence sur l'estimation des temps de transferts de solutés dans l'aquifère ainsi que sur la capacité de dilution de ce dernier.

### 2.2.4.3 Simulation numérique

La modélisation hydrogéologique sert à conforter le choix du modèle conceptuel établi à la suite de la caractérisation hydrogéologique et hydrogéochimique des formations présentes à l'échelle du secteur. Dans ce chapitre, l'IRSN examine les modèles « *phénoménologique* » et « *géoprospectif* » présentés par l'ANDRA qui servent de base à l'élaboration de son modèle utilisé pour évaluer les conséquences radiologiques sur l'environnement d'un stockage de déchets radioactifs. Ce chapitre décrit tout d'abord les différents aspects du modèle réalisé par l'ANDRA, à savoir ses caractéristiques générales, les résultats obtenus en termes de calage, l'analyse de sensibilité aux failles, la modélisation des contextes géoprospectifs, ainsi que les résultats obtenus. Il présente ensuite l'évaluation, par l'IRSN, de l'ensemble de ces points.

La modélisation des écoulements souterrains, présentée dans le référentiel du site [5], a été réalisée par l'ANDRA à différentes échelles à l'aide d'un modèle multicouche. Le modèle « *régional* », correspondant à une étendue de 400 km × 500 km, a pour but de déterminer les directions générales d'écoulement à l'échelle du bassin de Paris. Le modèle « *de secteur* », correspondant à une zone de 36 km × 49 km centrée sur le laboratoire, vise à modéliser les écoulements locaux avec une meilleure précision que le modèle précédent, et à déterminer l'emplacement des exutoires situés à proximité du laboratoire, ainsi que les vitesses de transfert et temps d'arrivée à ces exutoires. Ces deux modèles ont été fusionnés en un modèle « *région-secteur* », afin de les mettre en cohérence et d'affecter au modèle de secteur des conditions aux limites en accord avec les données issues du modèle « *régional* ».

Les valeurs de porosité et de perméabilité retenues dans le modèle « *régional* », pour les différentes lithologies, ont été déterminées au moyen de lois empiriques (lois de Kozeny-Carman et de Lucia<sup>5</sup>). À l'échelle du secteur, les perméabilités utilisées dans le modèle sont issues des mesures effectuées en forage. Les résultats de ces mesures ont en particulier conduit l'ANDRA à représenter une zone locale de faible perméabilité au niveau du secteur dans l'aquifère du Dogger.

Les écoulements à l'échelle régionale sont calés avec un écart moyen entre charges mesurées et simulées de l'ordre de 20 m. Pour ce qui concerne le calage obtenu à l'échelle du secteur [104], la simulation génère, pour la formation de l'Oxfordien, une piézométrie calée sur les mesures réalisées dans les forages du secteur avec un écart moyen de l'ordre de 6 m, hormis pour le forage EST342 (situé à l'Ouest de Joinville) qui présente un écart de 35 m. D'après ce rapport, « *la charge [de ce forage] semble contrôlée par les contraintes du modèle régional plus que par le modèle de secteur* ». Concernant le Dogger, l'écart moyen est de 8 m. Ces résultats sont présentés dans la Figure 11 et la Figure 12 ci-après.

---

<sup>5</sup> Pour chaque lithologie, la porosité est calculée en fonction de l'enfouissement, au moyen d'une loi empirique la reliant à la profondeur. Le calcul des perméabilités des lithologies non carbonatées est ensuite effectué à l'aide de la loi de Kozeny-Carman, en fonction de la porosité et de la surface spécifique des grains. Pour les perméabilités des lithologies carbonatées, le calcul est effectué à l'aide de la loi de Lucia, en fonction de la porosité et de la teneur en carbonates (d'après [5]).

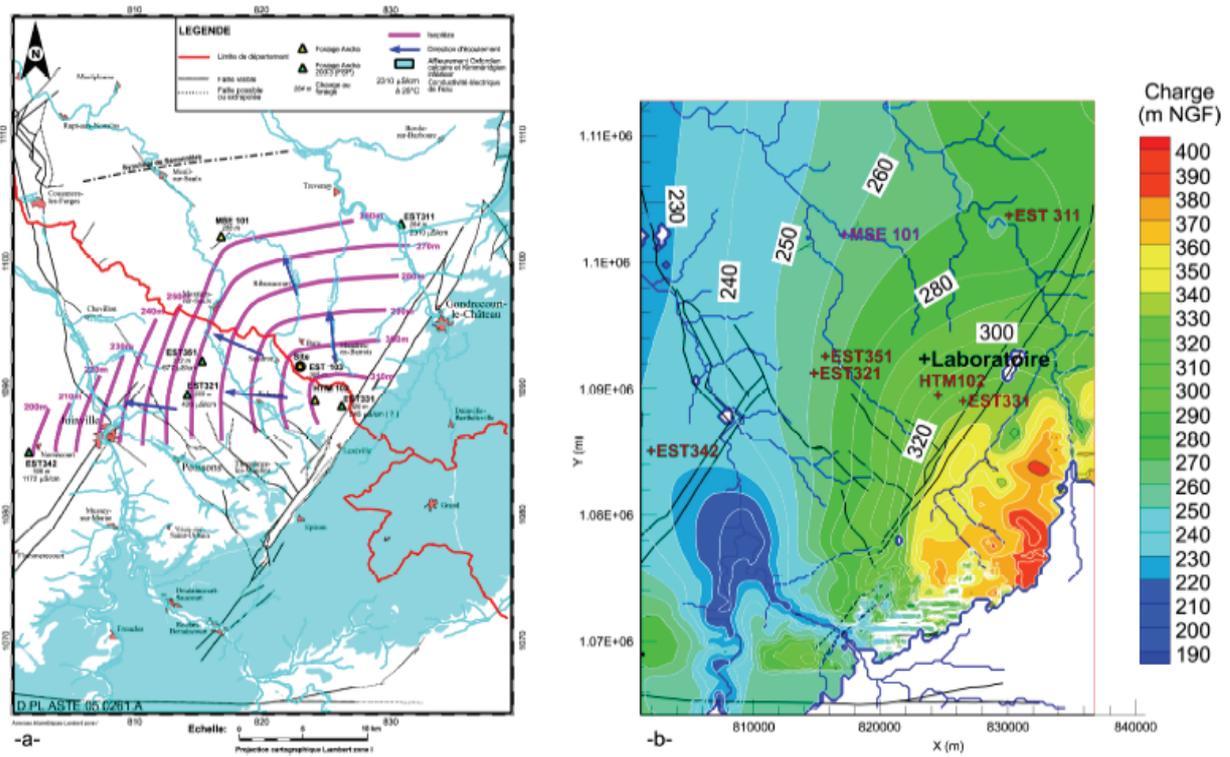


Figure 11 - Cartes piézométriques de l'Oxfordien mesurée (a) et simulée (b) [5].

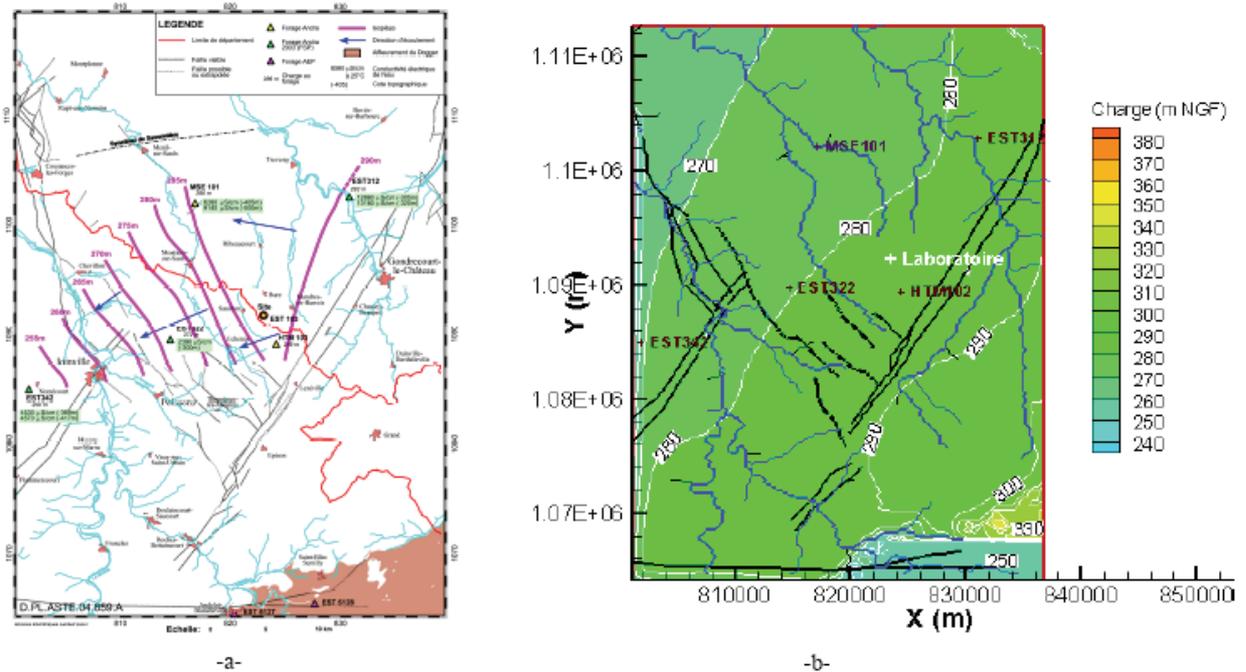


Figure 12 - Cartes piézométriques du Dogger (Bathonien supérieur et moyen) mesurée (a) et simulée (b) [5].

Lors de ce calage, l'ANDRA a modifié certaines hypothèses qui avaient été retenues en 2003 [103]. Afin de reproduire les fortes charges mesurées dans le Dogger à l'échelle du secteur, la zone de faible perméabilité a été étendue vers le NW et les perméabilités à l'affleurement ont été augmentées. Pour ce qui concerne l'Oxfordien, le calage du forage EST311, situé à proximité des failles de Gondrecourt, a été modélisé par l'introduction d'une transmissivité verticale élevée afin de « représenter la fracturation du Kimméridgien à l'affleurement ».

Comme indiqué précédemment, le modèle de l'ANDRA ne tient pas compte d'un rôle hydraulique des failles de la Marne, de Gondrecourt, de Joinville et de Poissons. L'ANDRA a néanmoins réalisé une analyse de sensibilité du comportement des écoulements vis-à-vis de cette fracturation. Cette analyse est présentée dans le référentiel du site [5], et détaillée dans le rapport [103]. Le modèle de référence utilisé pour cette analyse de sensibilité est le modèle hydrogéologique de l'ANDRA tel qu'il était calé en 2003 [104]. Celui-ci tient compte de la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons affectant l'Oxfordien et le Dogger, suppose un rôle de barrière hydraulique des failles de Gondrecourt, de Joinville et de Poissons, et un rôle hydraulique transmissif de la faille de la Marne (perméabilité verticale multipliée par 100).

Pour l'ANDRA, la suppression du rôle hydraulique des failles de Poissons, Gondrecourt et Joinville n'entraîne pas de modifications majeures des écoulements. La suppression du rôle hydraulique de la faille de la Marne (devenant ainsi « transparente ») montre en revanche que cette faille, « par son rôle de drain [...], impacte les écoulements à l'Ouest du secteur aussi bien dans l'Oxfordien que dans le Dogger ». L'ANDRA précise cependant (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0209 du 26 septembre 2005) que cette modification « n'affecte que localement les écoulements (influence sur une distance d'environ 3 kilomètres vers l'est). À l'échelle du secteur, les directions d'écoulement et les gradients associés ne sont pas significativement modifiés ».

La modélisation hydrogéologique des contextes géoprospectifs a été réalisée par l'ANDRA sur la base d'un modèle numérique de simulation de l'évolution géomorphologique sur 1 Ma (cf. chapitre 2.2.3.2 du présent rapport). Cette simulation, présentée par l'ANDRA dans le référentiel du site [5], sert de base au calcul des trajectoires d'écoulement et des temps de transfert dans ces contextes géoprospectifs. Elle est détaillée dans le rapport [109]. Il s'agit d'un modèle simplifié par rapport au modèle « région-secteur » présenté ci-avant. Il est constitué uniquement de 3 couches (toutes sus-jacentes au Callovo-Oxfordien), chacune affectée d'une valeur de perméabilité uniforme. Les simulations du transport de solutés réalisées avec ce modèle ont été effectuées sur la base de 3 surfaces topographiques différentes (scénarios « à l'actuel », à 500 ka et à 1 Ma).

**Sur la base du modèle « région-secteur », et du modèle géoprospectif, l'ANDRA a obtenu différents résultats.**

Les simulations réalisées avec le modèle hydrogéologique des contextes géoprospectifs indiquent que l'évolution géomorphologique devrait avoir des conséquences importantes sur les écoulements dans l'Oxfordien. L'ANDRA conclut qu'à l'échelle du secteur, une modification des trajectoires devrait intervenir dès 500 ka, et s'amplifier jusqu'à 1 Ma, entraînant une diminution des temps de transfert dans l'Oxfordien. La zone de gradient hydraulique ascendant à travers le Callovo-Oxfordien gagnerait en extension horizontale, et son intensité passerait de 0,2 à 0,4 m/m. Les résultats montrent que dans la configuration actuelle, 1/3 du panache atteindrait, entre 200 et 600 ka, l'exutoire Marne/Rognon, le reste se dirigeant vers le centre du bassin de Paris. Dans la configuration géomorphologique estimée à 500 ka, la moitié du panache atteindrait l'exutoire Marne/Rognon entre 100 et 400 ka, le reste se divisant entre un nouvel exutoire localisé dans la vallée de l'Ornain (sortie entre 300 et 500 ka) et des trajectoires régionales. Enfin, dans la simulation à 1 Ma, 1/4 du panache atteindrait la Saulx (au SW immédiat du site) entre 20 et 40 ka, 45 % du panache atteindrait l'exutoire Marne/Rognon entre 100 et 200 ka et 30 % du panache atteindrait l'Ornain entre 200 et 300 ka (cf. Figure 13 ci-après). Le Tableau 3 reprend ces résultats ainsi que, à titre de comparaison, ceux obtenus suite aux calculs des conséquences radiologiques sur l'environnement, évalués au chapitre 7.4 du présent rapport. Pour ce qui concerne le Dogger, l'ANDRA indique, dans le référentiel du site [5], que « les modifications géomorphologiques restent sans impact notable sur [cet] aquifère [et que] les conséquences hydrogéologiques paraissent faibles mais restent à préciser ».

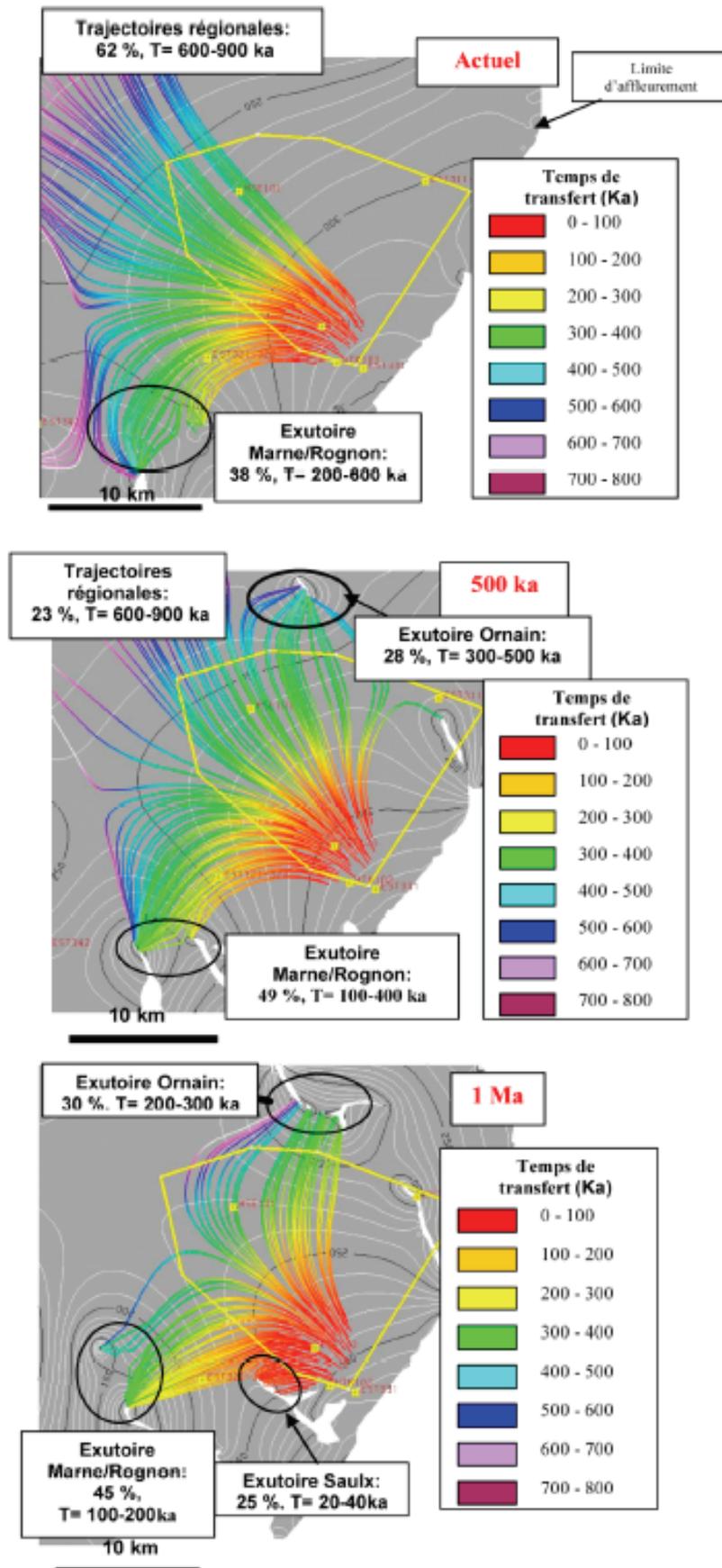


Figure 13 - Évolution possible des trajectoires dans l'aquifère des calcaires oxfordiens du fait de l'évolution géomorphologique [5].

Les simulations de transport de solutés réalisées avec le modèle « *région-secteur* » donnent des résultats moins conservatifs que ceux obtenus avec le modèle géoprospectif. Dans le cas d'une injection de particules émises à l'aplomb du site de Bure dans toutes les couches aquifères, les simulations faites par l'ANDRA aboutissent à des « *trajectoires convectives calculées sur une période de temps d'un million d'années [qui] restent confinées à l'intérieur du secteur dans les formations de l'Oxfordien, voir à l'intérieur de la zone du site dans celles du Dogger* ». La vitesse de transfert est alors comprise entre 0,1 et 1,3 km par 100 ka dans l'Oxfordien. Pour ce qui concerne le Dogger, les vitesses obtenues sont significativement plus faibles que pour l'Oxfordien, les particules ne parcourant qu'une quarantaine de mètres au maximum sur 1 Ma. L'ANDRA précise (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0209 du 26 septembre 2005) que ces très faibles distances obtenues dans le Dogger « *ne font que traduire le plateau piézométrique constaté qui engendre une stagnation des eaux* ». Ces simulations ne font donc pas apparaître d'exutoire local, ni pour l'Oxfordien, ni pour le Dogger.

**L'IRSN constate que les simulations effectuées par l'ANDRA reproduisent les charges mesurées avec des écarts parfois importants avec la piézométrie mesurée.** Pour ce qui concerne les directions d'écoulement, les simulations réalisées dans l'Oxfordien sont cohérentes avec la carte piézométrique issue des mesures, tandis que dans le Dogger les écoulements sont orientés vers le Nord-Ouest, ce qui ne correspond pas à la carte piézométrique mesurée, qui présente dans la partie sud des écoulements orientés vers le Sud-Ouest. L'IRSN considère que les écarts obtenus par l'ANDRA entre charges simulées et mesurées peuvent induire des erreurs dans la détermination des directions et des vitesses d'écoulement et donc dans la localisation des exutoires potentiels et les temps de transfert associés, surtout pour ce qui concerne le Dogger. En effet, le gradient hydraulique de cet aquifère étant faible, une simulation peu précise de sa piézométrie peut avoir une incidence significative sur les directions d'écoulement.

L'IRSN estime que le calage peu précis de ces modèles est principalement imputable à l'absence de rôle hydraulique des failles modélisées dans le modèle hydrogéologique et, dans une moindre mesure, au paramétrage utilisé : les valeurs de perméabilité affectées au modèle à l'échelle régionale et celles affectées à l'échelle de secteur sont trop contrastées, ce qui peut engendrer une erreur potentiellement significative sur les directions d'écoulement, comme cela est visible sur la carte piézométrique simulée du Dogger, où des gradients très importants apparaissent en limite ouest du modèle « *de secteur* ».

Pour ce qui concerne le rôle hydraulique des failles, l'analyse de sensibilité présentée par l'ANDRA a été conduite sur la base d'un modèle (modèle de 2003 [103]) antérieur à celui retenu dans le Dossier 2005 Argile. Ce « modèle 2003 » a été abandonné par l'ANDRA compte tenu des difficultés rencontrées pour caler les données piézométriques en cohérence avec les connaissances géologiques générales. L'IRSN considère que les conclusions de l'ANDRA issues de cette analyse de sensibilité, qui repose sur un modèle non représentatif des connaissances acquises, sont peu crédibles. En outre, au vu des résultats présentés dans le rapport [104] précité, l'IRSN note que ces tests tendent au contraire à montrer un rôle non négligeable de la faille de Poissons (déficit de gradient de l'ordre d'une vingtaine de mètres dans les forages situés à proximité de cette faille lorsque le rôle de barrière hydraulique est supprimé) et que le calage de l'ANDRA, obtenu avec un rôle transmissif appliqué à la faille de la Marne, entraîne une amélioration des résultats dans le Dogger (cf. Annexe T4-C au présent rapport). Par ailleurs, l'IRSN observe que seule la faille de la Marne a été testée avec un rôle hydraulique transmissif, et que l'ANDRA n'a pas explicitement testé le rôle des failles de Gondrecourt et de Joinville.

	OXFORDIEN						DOGGER	
	Actuel		500 ka		1 Ma		Actuel / 1 Ma	
	Exutoire	Temps de transfert	Exutoire	Temps de transfert	Exutoire	Temps de transfert	Exutoire	Temps de transfert
Modèle IFP (phéno - "région-secteur")	Ne sort pas	1 Ma pour niveau de la Marne	/	/	/	/	Ne sort pas	max 40m/Ma
	Régional (62%) - ne sort pas	600 - 900 ka	Régional (23%) - ne sort pas	600 - 900 ka	Marne/Rognon (45%)	100 - 200 ka	/	/
	Marne/Rognon (38%)	200 - 600 ka	Marne/Rognon (49%)	100 - 400 ka	Proche site/Saulx (25%)	20 - 40 ka <sup>3</sup>	/	/
Modèle CEA (géoprospective)	/	/	Ornain (28%)	300 - 500 ka	Ornain (30%)	200 - 300 ka	/	/
	Saulx <sup>1</sup> (~1/3)	80 - 100 ka	/	/	Saulx <sup>1</sup> (~2/3)	20 - 50 ka	Saulx <sup>1</sup>	20 Ma
	Marne <sup>1</sup> (~1/3)	200 ka	/	/	Ornain (~1/3)	100 - 150 ka	/	/
Modèle calculs de sûreté	Régional <sup>2</sup> (~1/3)	ne sort pas	/	/	/	/	/	/

<sup>1</sup> Interception par pompage du panache avec la limite de la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons

<sup>2</sup> Exutoire au-delà des limites physiques du modèle

<sup>3</sup> ANDRA : «Un gradient hydraulique localement plus fort à proximité de la vallée de la Saulx est à l'origine de ces temps courts, qui ne concernent que les trajectoires à partir d'un secteur proche de la limite de la zone de transposition »

Tableau 3 - Exutoires et temps de transfert obtenus par les modélisations ANDRA [5] [75] [109].

L'IRSN considère donc que la représentation des écoulements dans le modèle de l'ANDRA doit être amélioré en considérant un rôle hydraulique possible des structures cartographiées. À cet égard, l'IRSN a réalisé des simulations qui montrent qu'il est possible d'obtenir des valeurs plus proches de celles mesurées (écarts moyens entre valeurs mesurées et simulées de 2 m pour l'Oxfordien et de 0,2 m pour le Dogger, cf. Tableau 4 ci-dessous), avec des combinaisons de failles perméables. Ces simulations montrent également que les résultats des calculs de transport sont influencés par la présence de structures hydrauliquement drainantes. En effet, bien que certaines failles aient une influence plus limitée que d'autres sur les écoulements, les temps de transfert des radionucléides en présence de failles transmissives sont globalement diminués. Ces simulations mettent en évidence, pour chacun des encaissants, un exutoire local au niveau de la Marne, avec des temps de transferts de l'ordre de 450 ka dans l'Oxfordien et de 2 Ma dans le Dogger (cf. Annexe T4-D au présent rapport).

	Charge Oxfordien (m NGF)			Charge Dogger (m NGF)		
	Mesurée	Calculée	Écart	Mesurée	Calculée	Écart
MSE101	256	256	0	286	286	0
EST103	304	309	5			
HTM102	317	313	-4	289	289	0
EST311/312	264	263	-1	292	292	0
EST321/322	268	267	-1	272	272	0
EST331	320	321	1			
EST342	196	196	0	251	250	-1
EST351	273	275	2			
Écart moyen			1,75 m			0,2 m

Tableau 4 - Résultats du calage IRSN.

Pour ce qui concerne la modélisation hydrogéologique des contextes géoprospectifs, l'IRSN constate que le modèle de l'ANDRA est basé sur des hypothèses qui ne permettent pas de reproduire la piézométrie actuelle. Les simulations destinées à reproduire la situation hydrogéologique initiale (c'est-à-dire l'état hydrogéologique actuel du secteur) présente en effet des charges simulées toutes supérieures aux mesures, avec un écart moyen de 18 m, et l'apparition d'une ligne de partage des eaux à l'ouest du secteur, non conforme avec la carte piézométrique déduite des mesures (cf. Annexe T4-C au présent rapport). Le modèle initial n'étant pas convenablement calé, l'IRSN n'est pas en mesure de se prononcer sur les exutoires et les temps de transfert déterminés par la suite dans les simulations à 500 ka et à 1 Ma obtenus par l'ANDRA.

Pour ce qui concerne l'origine de la salinité mesurée dans le Dogger, la modélisation réalisée par l'ANDRA sur la base d'un transport convectif par remontée à travers les failles régionales n'a pas, pour l'ANDRA, donné de résultats satisfaisants. De ce fait, l'ANDRA considère comme nouvelle hypothèse une origine diffusive plutôt que convective de sel qui proviendrait du Trias. Cette hypothèse est plausible, mais l'IRSN note cependant qu'à l'heure actuelle, aucune modélisation de ce transport de sel n'a encore permis de reproduire les tendances de salinité mesurées, même au vu du faible nombre de mesures disponibles.

En conclusion, l'IRSN estime qu'il existe une marge de progression importante dans le calage du modèle hydrogéologique de l'ANDRA. Des simulations plus précises tendent à montrer que les temps de transfert pourraient être notablement inférieurs à ceux estimés par l'ANDRA au moyen de son modèle « *région-secteur* ». Toutefois, l'IRSN note que l'ANDRA, dans son évaluation de sûreté, a retenu une démarche

prudente pour tenir compte des incertitudes associée à la modélisation des écoulements. Dans cette évaluation, les temps de transfert sont en effet beaucoup plus courts et les exutoires plus proches que ceux issus des modélisations présentées ci-avant. L'IRSN considère que cette approche volontairement pénalisante, évaluée au chapitre 7.4 du présent rapport, est satisfaisante, car elle limite le poids des incertitudes liées à la modélisation hydrogéologique sur les résultats des évaluations de sûreté et de conséquences radiologiques. Néanmoins, une amélioration de la connaissance des écoulements reste nécessaire. Il conviendra de mieux caractériser les hétérogénéités mises en évidence à l'échelle du laboratoire, notamment la nature des connexions entre les différents horizons poreux de l'Oxfordien, ainsi que leur rôle dans les écoulements. Par ailleurs, à l'échelle du secteur, l'ANDRA devra mieux appréhender le rôle des failles. Une modélisation plus représentative permettra également de mieux apprécier les capacités de dilution possible des radionucléides lors de leur transport dans les aquifères. Enfin, l'IRSN estime qu'il sera nécessaire à l'avenir de confirmer que la salinité des formations encaissantes est bien acquise par le phénomène de diffusion précité, dans la mesure où la connaissance de la provenance du sel est un élément important pour le calage de la modélisation hydrogéologique et plus globalement pour mieux comprendre le comportement des écoulements à l'échelle du secteur.

## 2.3 LA FORMATION HÔTE DU CALLOVO-OXFORDIEN

Les caractéristiques géologiques du Callovo-Oxfordien sont examinées dans le chapitre 2.2.2 du présent rapport. Ce chapitre examine les capacités de confinement et de constructibilité de la formation hôte. Les propriétés géochimiques, hydrodynamiques et mécaniques de la roche sont donc décrites ci-après.

### 2.3.1 CARACTÉRISTIQUES GÉOCHIMIQUES

Les données de minéralogie pour la formation du Callovo-Oxfordien ont été acquises à partir d'échantillons prélevés sur les forages FRF (EST207, EST209, EST211, EST212, EST103, EST104, EST205, EST361) ainsi qu'à partir des données obtenues dans le cadre des creusements des puits principal et auxiliaire. Les analyses minéralogiques des formations du Callovo-Oxfordien ont été effectuées sur 308 échantillons par diffraction de rayons X, observations microscopiques complétées par des analyses chimiques ainsi que par la détermination des capacités d'échanges cationiques.

Sur la base de ces analyses minéralogiques, une composition moyenne semi-quantitative de l'ensemble du Callovo-Oxfordien (Tableau 5) est présentée par l'ANDRA. Par ailleurs, sur la base des études effectuées sur la formation du Callovo-Oxfordien, l'ANDRA conclut que la variabilité minéralogique est très faible dans les unités inférieures (C2a à C2b) et légèrement plus marquée au sein des unités supérieures (C2c et C2d).

Composition minéralogique	Teneurs moyennes en %		
Minéraux de la famille de l'illite	14	41	Minéraux argileux
Interstratifiés désordonnés I/S R=0	14		
Interstratifiés ordonnés I/S R=1	8		
Kaolinite	2		
Chlorite	2		
Calcite	27	31	Carbonates
Dolomite/Ankérite	4		
Quartz	23	25	Silicates (Q + Feldspaths)
Feldspaths K	1		
Plagioclases	1		
Pyrite	1	3	Minéraux accessoires
Minéraux ferrifères	2		
Minéraux titanés	<1		
Minéraux phosphatés	<1		

**Tableau 5 - Détermination semi-quantitative de la composition minéralogique moyenne de l'ensemble du Callovo-Oxfordien [13].**

L'IRSN estime que la caractérisation d'un nombre important d'échantillons a permis à l'ANDRA d'acquérir une bonne connaissance de la minéralogie moyenne des argilites du Callovo-Oxfordien et de sa variabilité latérale et verticale. L'IRSN attire toutefois l'attention sur l'existence de variations locales possibles de la minéralogie des argilites, notamment de la teneur en carbonates qui pourraient avoir des conséquences sur les propriétés hydrodynamiques (porosités, coefficients de diffusion notamment) et mécaniques (cf. comportement particulier de l'échantillon K100 au droit du forage EST205).

La connaissance de la composition chimique de l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien est une donnée de base essentielle pour l'estimation des relâchements et du transport des radionucléides dans le stockage. Cette composition n'est cependant pas directement accessible à la mesure et nécessite de croiser des données expérimentales et des modélisations interprétatives.

La détermination de la composition chimique de l'eau interstitielle est basée sur l'utilisation des résultats d'observations et d'expérimentations sur échantillons de roche afin d'acquérir suffisamment d'information pour déterminer un modèle géochimique à l'équilibre thermodynamique. Cette méthode implique en particulier de déterminer, sur des échantillons de roche, le volume d'eau de pore accessible aux constituants dissous, les phases minérales déterminant l'activité des espèces critiques par leur solubilité et/ou leur activité en tant qu'échangeur d'ions ou complexant de surface ainsi que la capacité d'échange cationique et les lois d'action de masse pour les réactions d'échange cationique.

Sur la base d'un modèle thermodynamique construit à partir des données expérimentales acquises sur un échantillon (K119), l'ANDRA a proposé une gamme de composition des eaux de pore (cf. Tableau 6). Cette gamme est établie pour la moitié supérieure du Callovo-Oxfordien (d'environ 420 m à environ 490 m de profondeur). Pour la moitié inférieure du Callovo-Oxfordien (au-delà d'environ 490 m de profondeur), il n'y a pas de données disponibles permettant de mettre en œuvre la méthode de caractérisation - modélisation géochimique des eaux. L'ANDRA indique néanmoins qu'elle ne s'attend pas à ce que la composition chimique des eaux soit notablement différente de celles indiquées dans le Tableau 6. Compte tenu des faibles variations minéralogiques entre les deux moitiés du Callovo-Oxfordien, l'IRSN estime, à ce stade, que ce point n'appelle pas de commentaire particulier.

Paramètre	Modèle de composition <sup>6</sup>	
	Nominal- conservatif*	Alternatif**
Eh (mV)	-156	-180
pH	7	7,3
Force ionique (mol/l)	0,12	0,09
Alcalinité (méq/l)	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Cl (mol/l)	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
S (VI) (mol/l)	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$
Na (mol/l)	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
K (mol/l)	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
Ca (mol/l)	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Mg (mol/l)	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Fe (mol/l)	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$
Si(aq) (mol/l)	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$

**Tableau 6 - Compositions chimique de l'eau interstitielle des argilites du Callovo-Oxfordien au droit du laboratoire et exemple des incertitudes [50].**

La détermination de la composition des eaux porales du Callovo-Oxfordien par modélisation thermodynamique présente des incertitudes qui ont été pris en compte dans les études présentées par l'ANDRA (choix des phases minérales, effet de l'exclusion anionique, pression partielle de CO<sub>2</sub>...). À cet égard, l'ANDRA précise que « *les résultats des modélisations présentées [dans le Dossier 2005 Argile] illustrent, sans être exhaustifs, l'impact que ces incertitudes peuvent avoir sur la composition calculée. Au vu des connaissances disponibles, [...] ces compositions donnent une vision de la gamme vraisemblable de variabilité des valeurs des paramètres chimiques des eaux de pore* ».

L'IRSN estime que des progrès significatifs ont été effectués sur la détermination de la composition chimique et isotopique des eaux porales du Callovo-Oxfordien. La connaissance de ce paramètre est à ce stade suffisante notamment au regard de sa contribution à caractériser le transport des radionucléides dans la formation hôte et les perturbations géochimiques.

Par ailleurs, l'IRSN note que des investigations complémentaires sont en cours dans le cadre de l'expérimentation « PAC » relatives à la composition des eaux de la formation du Callovo-Oxfordien dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Les premiers résultats, présentés par l'ANDRA lors de la réunion du 24 octobre 2005, tendraient à confirmer les estimations actuelles relatives à la composition des eaux interstitielles du Callovo-Oxfordien. Ces résultats montrent néanmoins une surestimation de la concentration en potassium dans le modèle par rapport aux données acquises par prélèvement, qui peuvent toutefois être reproduites par modélisation en modifiant d'un facteur 3 la constante d'échange ionique du potassium. Les résultats acquis dans le cadre de l'expérimentation « PAC » devraient permettre à terme de compléter et valider la connaissance de la composition chimique des eaux de pore du Callovo-Oxfordien au droit du site.

En outre, l'ANDRA a établi [58] une sélection de valeurs relatives aux paramètres de rétention (coefficient de distribution, ou « Kd ») et de solubilité de radionucléides et toxiques chimiques dans les argilites du Callovo-Oxfordien, nécessaires pour évaluer les performances à long terme du stockage. **L'IRSN estime que cette étude, qui, d'une part expose de façon détaillée la démarche de sélection suivie et les données expérimentales ou**

<sup>6</sup> Le modèle nominal impose la saturation de la Chlorite-Mg, la valeur de pCO<sub>2</sub> et des populations de cations occupant les sites d'échanges cohérentes avec les données expérimentales alors que le modèle alternatif prend en compte les effets des incertitudes notamment l'exclusion anionique, une pression partielle de CO<sub>2</sub> contrainte à 3,1 mbar, la force ionique la plus basse et le pH le plus fort.

de modélisation utilisées, d'autre part tient compte des incertitudes restantes, est de grande qualité et présente des valeurs de paramètres de confinement chimique pertinentes au regard des besoins de l'évaluation de sûreté à long terme.

## 2.3.2 CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

Ce chapitre examine l'état actuel des connaissances relatives aux caractéristiques hydrodynamiques de référence des argilites du Callovo-Oxfordien, notamment pour ce qui concerne les valeurs de perméabilité, de porosité et du coefficient de diffusion. Les hypothèses retenues par l'ANDRA pour expliquer l'origine des surpressions observées dans cette couche sont également examinées dans ce chapitre ainsi que les éventuels effets de ces surpressions sur les écoulements.

### 2.3.2.1 Caractéristiques hydrodynamiques « de référence » du Callovo-Oxfordien

Les connaissances relatives aux caractéristiques hydrodynamiques des argilites du Callovo-Oxfordien proviennent principalement de l'interprétation des nombreux tests hydrauliques réalisés en forages, du suivi des pressions sur une longue durée et de mesures sur échantillons carottés.

Pour ce qui concerne la perméabilité des argilites du Callovo-Oxfordien, les valeurs obtenues sont très faibles (majoritairement comprises entre  $5 \cdot 10^{-14}$  et  $5 \cdot 10^{-13}$  m/s). Les différentes analyses menées n'ont mis en évidence qu'une faible anisotropie de perméabilité, d'un ordre de grandeur au maximum. Pour ce qui concerne le coefficient d'emmagasinement spécifique, donnée plus difficile à mesurer, les valeurs sont comprises entre  $10^{-7}$  et  $10^{-4}$  m<sup>-1</sup>, avec une valeur médiane de  $2 \cdot 10^{-5}$  m<sup>-1</sup>. D'après l'ANDRA, ces valeurs présentent une incertitude « sans doute supérieure à 50 % ». Les valeurs retenues dans la modélisation des tests in situ sont proches de  $10^{-6}$  m<sup>-1</sup>.

La détermination des paramètres de transport des argilites du Callovo-Oxfordien non perturbé a été établie par la technique de « through-diffusion » sur la base notamment, pour ce qui concerne les espèces neutres, de 8 échantillons prélevés au droit du forage EST205. Les valeurs moyennes des paramètres de diffusion et de porosité des espèces anioniques du Callovo-Oxfordien ont été déterminées sur la base de 6 échantillons (3 pour la diffusion des iodures et 3 pour la diffusion des chlorures) pour une force ionique de 0,1 M. Enfin, les valeurs représentatives de coefficients de diffusion et de porosités accessibles pour les espèces cationiques ont été déterminées à partir des résultats acquis sur la diffusion du césium sur 3 échantillons du forage EST205. Le Tableau 7 ci-après présente les résultats des mesures de coefficients de diffusion et porosités effectuées sur les échantillons du Callovo-Oxfordien.

	Coefficient de diffusion		Porosité	
	De (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Plage de variation (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	ω	Plage de variation
Espèces neutres	$2,6 \cdot 10^{-11}$ (±38%)	-	0,18	-
Espèces anioniques	$5 \cdot 10^{-12}$ (± 40%)	$5 \cdot 10^{-13} \leq De \leq 8 \cdot 10^{-12}$ *	0,06 (± 0,009)	$0,04 \leq \omega \leq 0,07$ *
Espèces cationiques	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-11} \leq De \leq 5 \cdot 10^{-10}$	0,18	$0,10 \leq \omega \leq 0,21$ *

\* la plage de variation est établie sur la base des valeurs minimales et maximales mesurées.

**Tableau 7 - Valeurs de coefficient de diffusion effective et de porosité des argilites du Callovo-Oxfordien et plages de variations associées [13].**

L'IRSN note par ailleurs que des expériences (DIR) de diffusion de traceurs dans les argilites du Callovo-Oxfordien sont en cours sur le site du laboratoire de Meuse/Haute-Marne. Selon les premiers résultats de ces expériences, les valeurs de paramètres de transport sont conformes aux valeurs déterminées sur échantillons en laboratoire de surface.

Les données et profils de traceurs naturels (isotopes stables de l'eau, chlore...) confirment que le régime de transfert de solutés dominant au sein du Callovo-Oxfordien est diffusif. La comparaison des profils de traceurs naturels avec les profils calculés par un modèle de transport a été effectuée. Pour ce qui concerne les isotopes stables de l'eau ( $^{18}\text{O}$  notamment), la prise en compte d'un coefficient de pore de  $1,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  permet de reproduire le profil mesuré en quelques centaines de milliers à un million d'années. Pour ce qui concerne le chlore, plusieurs combinaisons de paramètres permettent de reproduire les profils par un modèle de transport sans toutefois qu'une solution unique ne puisse être mise en évidence [13]. Cependant, les modélisations permettent d'estimer que « *le coefficient de diffusion effectif dans le Callovo-Oxfordien est nécessairement supérieur à  $10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$*  ». L'IRSN constate que les valeurs des coefficients de diffusion retenus dans les modélisations pour reproduire les profils de traceurs naturels mesurés dans la formation (isotopes stables de l'eau et chlore notamment) ne sont pas incompatibles avec les résultats des mesures des coefficients de diffusion obtenues en laboratoire. L'IRSN considère toutefois que les modélisations des profils de traceurs naturels, qui caractérisent les mécanismes de transport « en grand » dans la formation du Callovo-Oxfordien, devraient être approfondies, car elles permettent en particulier de mieux quantifier la capacité de la formation hôte à s'opposer à la migration des radionucléides relâchés par les colis de déchets stockés.

Sur la base de l'ensemble des résultats acquis, l'IRSN considère, comme l'ANDRA, que le régime dominant de transport dans les argilites du Callovo-Oxfordien est diffusif. Les temps de transfert caractéristiques dans la formation hôte sont de l'ordre de 200000 ans. L'IRSN constate que le nombre important de mesures réalisées dans les argilites du Callovo-Oxfordien, ainsi que le croisement des diverses techniques de mesures a permis à l'ANDRA de réduire considérablement les incertitudes sur les valeurs des paramètres hydrodynamiques qui caractérisent la formation. L'IRSN constate en particulier que les valeurs des paramètres de diffusion et de porosité ont été revues et précisées par rapport à celles présentées dans le Dossier 2001.

L'IRSN souligne toutefois que si la caractérisation des paramètres de transport des argilites du Callovo-Oxfordien permet une première appréciation des propriétés de confinement de la formation hôte, il conviendra à l'avenir de préciser cette capacité sur la base de mesures effectuées sur un nombre d'échantillons représentatifs des différentes unités lithologiques du Callovo-Oxfordien au droit du site et à l'échelle d'un éventuel stockage, en tenant compte en particulier des variations possibles de la minéralogie au sein de ces unités.

### **2.3.2.2 Origine et effets possibles des surpressions**

Les valeurs obtenues par l'interprétation des résultats des tests hydrauliques en forage, et du suivi en continu de la pression interstitielle (réalisé dans 6 forages, à l'aide de sondes EPG et d'équipements Westbay) révèlent l'existence de surpressions dans la formation, de quelques dizaines de mètres par rapport à la pression hydrostatique d'équilibre existant entre l'Oxfordien calcaire sus-jacent et le Dogger calcaire sous-jacent.

L'ANDRA considère plusieurs phénomènes naturels susceptibles de générer ces valeurs plus importantes que la pression hydrostatique [5] :

1. les phénomènes « *impliquant une réduction progressive de la porosité de la roche, en particulier liés à une augmentation continue des contraintes mécaniques au sein du Callovo-Oxfordien (e.g. des contraintes tectoniques)* » ;

2. les phénomènes « *impliquant l'existence dans le passé de pressions hydrostatiques aux limites du Callovo-Oxfordien (Oxfordien, Dogger) plus élevées qu'actuellement (e.g. évolution géodynamique des zones de recharge)* » ;
3. « *un effet "osmotique"* ».

Sur la base des diverses études menées dans le contexte du site de Meuse/Haute-Marne, l'ANDRA indique dans [43] qu'« *en l'état actuel des connaissances il est possible d'écarter une contribution importante à l'origine des surpressions de la plupart des causes dynamiques [points 1 et 2 ci-dessus]* » et donc que la source la plus vraisemblable est un effet osmotique. Pour ce qui concerne l'effet de ces surpressions sur le transfert de solutés par convection, l'ANDRA indique, dans le rapport intitulé « *Tome évaluation de sûreté du stockage géologique* » [4] que « *les perturbations induites par le creusement du stockage, puis par les différents phénomènes de remise à l'équilibre (transitoire thermique, chimique, hydraulique) n'induisent pas de déplacement massif de solutés et donc ne perturbent pas l'équilibre dû à l'osmose. Dans toutes les situations, le régime d'écoulement reste par conséquent contrôlé uniquement par les champs de charges imposés par les encaissants. Cet écoulement peut donc être représenté par une loi de Darcy basée uniquement sur les conditions aux limites hydrauliques dans les encaissants* ».

L'IRSN convient que l'osmose pourrait en partie expliquer les surpressions observées mais considère plutôt, comme le mentionne l'ANDRA, que ces surpressions relèvent plus probablement d'une combinaison de différents phénomènes. À cet égard, l'IRSN considère en effet que les progrès réalisés par l'ANDRA, qui ont permis notamment de réduire les incertitudes relatives aux caractéristiques minéralogiques des argilites, aux compositions chimiques des eaux de pore ainsi qu'aux paramètres de transport (De, porosité) confortent l'hypothèse de l'origine osmotique prépondérante des surpressions. L'IRSN estime toutefois que cette origine osmotique demeure à l'heure actuelle une hypothèse qui doit être validée par des études visant en particulier à préciser et à justifier, comme le demandait l'IRSN dans le rapport DSU n° 32, les valeurs de coefficient d'efficacité osmotique considérées.

Ainsi, l'IRSN estime que même si les surpressions peuvent potentiellement relever d'une contribution majeure du phénomène osmotique, le fait qu'il demeure plusieurs origines possibles aux surpressions mesurées dans le Callovo-Oxfordien (contraintes tectoniques, évolution géodynamique et effet osmotique) ne permet pas d'écarter définitivement que ces surpressions puissent avoir une incidence sur les écoulements. Aussi, l'IRSN estime qu'il conviendrait de retenir, à ce stade, une approche prudente pour décrire, pour une évolution normale du stockage, ce rôle hydraulique potentiel. À ce titre, l'IRSN considère que l'ANDRA aurait pu prendre en compte un gradient de 1 m/m dans les argilites du Callovo-Oxfordien pour simuler l'évolution normale du stockage. L'IRSN note toutefois que cette hypothèse est néanmoins couverte par les calculs de sensibilité réalisés par l'ANDRA. Ce point est examiné dans le chapitre 7 du présent rapport.

### 2.3.3 CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

#### 2.3.3.1 Comportement mécanique instantané

Le référentiel du site [5] indique que la formation du Callovo-Oxfordien est une roche peu déformable de type endommageable, fragile à la rupture, avec un seuil de déformation réversible relativement bas du fait de sa teneur élevée en minéraux argileux.

Du haut vers le bas de la formation hôte du Callovo-Oxfordien, l'ANDRA distingue 5 grandes unités géomécaniques appelées A, B, C, D et E. Les unités A et D sont plus carbonatées et les unités B, C et E sont plus argileuses. L'éventuelle installation de stockage est envisagée dans le niveau médian de la formation hôte, soit dans l'unité

géomécanique C qui est également la plus argileuse. Les unités A et B devraient être traversées par les ouvrages d'accès.

Lithofaciès	Unités géomécaniques	HTM102 (m)	EST104 (m)	MSE101 (m)	EST205 (m)
C2d	A	342 – 377	422 – 460	505 – 546,5	418 – 460
C2c					
C2b2	B	377 – 401,5	460 – 477	546,5 – 563,5	460 – 473,5
C2b1	C	401,5 – 435	477 – 515	563,5 – 601,5	473,5 – > 510
	C1	401,5 – 416,5	477 – 493	563,5 – 585	473,5 – 492,5
	C2	416,5 – 435	493 – 515	585 – 601,5	492,5 – > 510
	D	435 – 440	515 – 521	601,5 – 606	*
C2a	E	440 – 472	521 – 552	606 – 650	-

- La base du forage EST205 est située à 510 m de profondeur.

Tableau 8 - Découpage du Callovo-Oxfordien en unités mécaniquement homogènes [5].

Une caractérisation géomécanique a été réalisée entre 1994 et 2000 à partir d'échantillons provenant des forages MSE101, EST104, EST204, EST205 et HTM102. Le référentiel du site [5] indique que « la résistance des argilites à la compression simple sur échantillons est de 29 MPa en moyenne dans les niveaux carbonatés et 21 MPa en moyenne dans les niveaux argileux au milieu de la formation ». De manière plus précise, le référentiel du site [5] indique que la résistance à la compression simple de l'unité géomécanique C du Callovo-Oxfordien, où est envisagée l'éventuelle installation de stockage, varie de 16 MPa à 28 MPa selon les forages. Lors de la réunion technique du 24 octobre 2005, l'ANDRA a précisé (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0227 du 26 octobre 2005) que dans l'unité géomécanique C, des niveaux particulièrement argileux et très fins peuvent être observés dans les galeries du laboratoire souterrain et que leur résistance à la compression simple mesurée au micro-pénétrömètre est comprise entre 12 MPa et 18 MPa ce qui explique les valeurs les plus basses mesurées sur échantillons.

Le référentiel du site [5] indique une valeur de référence de la « contrainte à l'initiation de l'endommagement en compression uniaxiale » de 17,7 MPa pour l'unité géomécanique A et de 15 MPa pour les unités B à E. Il précise également que « le seuil de propagation instable des fissures dans les argilites est d'environ 90 % de la résistance » à la rupture. Enfin, l'ANDRA indique que « la valeur moyenne du module de déformation des argilites est de 6 500 MPa dans les niveaux carbonatés et de 4 500 MPa dans les niveaux argileux ».

Le comportement géomécanique des unités A, B et C a été observé in situ et en vraie grandeur lors de la construction du laboratoire souterrain :

- le comportement de l'unité géomécanique A a été observé pendant la construction de la niche d'expérimentation à 445 m de profondeur ainsi qu'à l'aide de 4 sections de mesure de convergence et de 2 sections de mesures renforcées (SMGR-1 et SMR-2.1) ; le référentiel du site [5] indique qu'une zone microfissurée d'extension très limitée est apparue autour de la niche lors de son excavation mais aucune zone fracturée ; lors de la réunion technique du 24 octobre 2005, l'ANDRA a confirmé (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0227 du 26 octobre 2005) qu'un modèle élastique rend compte des déplacements mesurés dans cette unité géomécanique ;
- celui de l'unité géomécanique B a été observé pendant la réalisation de l'expérimentation REP (réponse des argilites à l'excavation d'un puits), une expérience de type « mine-by test » destinée à valider les modèles hydro-mécaniques ; lors de la réunion technique du 24 octobre 2005, l'ANDRA a indiqué (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0227 du 26 octobre 2005) que des déformations plastiques apparaissent autour des ouvrages à partir du niveau de la section de mesures renforcées SMGR-2 située à 467,50 m de profondeur ;

- celui de l'unité géomécanique C est en cours d'observation au niveau principal du laboratoire souterrain au moyen notamment de 4 sections de mesures renforcées (SMGR-3, SMGR-4, SMR-1.1, SMR-1.3) et de plusieurs sections de mesures de convergence ; lors de la réunion technique du 24 octobre 2005, l'ANDRA a confirmé (lettre ANDRA-DSQE/05-227 du 26 octobre 2005) qu'une zone endommagée apparaît autour des ouvrages excavés dans cette unité géomécanique (cf. chapitre 5.3.2 du présent rapport).

La stabilité mécanique des parois ou du front de taille d'une excavation ne dépend pas seulement de la résistance de la roche mais également des contraintes naturelles qui s'exercent à la profondeur considérée. Le référentiel du site [5] indique pour la formation du Callovo-Oxfordien une contrainte horizontale majeure  $\sigma_H$  de l'ordre de  $14,3 \pm 1,6$  MPa orientée au N 155° E, une contrainte horizontale mineure  $\sigma_h$  de  $12 \pm 0,5$  MPa et une contrainte verticale  $\sigma_v$  de  $11 \pm 1$  MPa. L'IRSN estime que ces résultats sont cohérents avec la profondeur considérée (500 m de couverture) ainsi qu'avec l'histoire géologique du site. L'IRSN remarque cependant que la contrainte horizontale majeure n'est indiquée dans le Callovo-Oxfordien qu'à une seule profondeur (500 m) et avec un intervalle d'erreur élevé ce qui, conjugué avec la variabilité des caractéristiques mécaniques de l'unité géomécanique C, pourrait avoir une influence sur l'extension de la zone endommagée susceptible de se développer autour des ouvrages. La lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0193 du 12 septembre 2005 précise qu'« une seule mesure directe de la contrainte majeure » est présentée dans le référentiel du site [5] mais que cette valeur est également confirmée par « plusieurs observations de breakouts réparties sur la hauteur de la formation » et que le coefficient d'anisotropie retenu « pour l'estimation de l'EDZ dans les calculs de sûreté » est plus élevé que la valeur observée. Cette lettre précise également qu'« une analyse systématique et croisée de l'ensemble des données actuellement disponibles (fracturation hydraulique, analyse des orientations de breakouts ou de fractures induites, sleeve fracturing et réouverture « sèche » de fractures) est en cours pour définir des bornes supérieures et inférieures [de la contrainte majeure] aussi resserrées que possible ». L'IRSN estime que l'incertitude actuelle sur l'état de contraintes naturelles dans la formation hôte n'est en tout état de cause pas rédhibitoire d'un point de vue géotechnique.

L'un des premiers critères de stabilité des ouvrages souterrains est la comparaison de la résistance à la compression simple de la roche avec 2 ou 3 fois la contrainte naturelle majeure [180]. Selon ce critère, l'IRSN estime qu'un endommagement des parements et du front de taille devrait apparaître au cours du creusement des ouvrages dans le Callovo-Oxfordien, plus particulièrement pour des galeries excavées dans l'unité géomécanique C (où la résistance de la roche est minimale) et dans la direction de la contrainte horizontale la plus faible (ce qui mobilise la plus grande valeur de l'anisotropie entre les contraintes naturelles). Dans ce cas le plus extrême, l'IRSN indique que le rapport maximal entre le déviateur de contraintes induit en paroi par l'excavation (calculé de manière élastique) et la résistance mécanique de la roche est de l'ordre de<sup>7</sup> 2,5. À titre indicatif, dans une situation isotrope équivalente, la littérature [181] indiquerait qu'une « analyse des conditions de stabilité au front de taille est essentielle pour le choix du mode d'excavation et du type de soutènement » lorsque ce rapport dépasse 2 et que « la stabilité du front de taille devient critique et [qu']il faut faire appel à des techniques de confinement du front de taille ou de présoutènement » lorsqu'il dépasse 5.

L'IRSN estime donc que la réalisation d'ouvrages souterrains dans la formation du Callovo-Oxfordien ne devrait pas poser de difficultés majeures du point de vue de la géotechnique, mais qu'une attention plus particulière devra sans doute être apportée dans l'unité géomécanique C aux galeries qui seraient creusées dans une direction non parallèle à la direction de la contrainte horizontale majeure.

<sup>7</sup>  $\text{Dév}(\sigma)/R_c = [(3.15,9)-10]/15 \cong 2,51$  où 15,9 MPa est une valeur maximale de la contrainte horizontale majeure, 10 MPa une valeur minimale de la contrainte mineure et 15 MPa une valeur minimale de la résistance à la compression simple.

### 2.3.3.2 Comportement mécanique différé

Le référentiel du site [5] identifie 4 mécanismes pouvant être à l'origine d'un comportement différé des argilites : la variation de la teneur en eau (retrait /gonflement), la diffusion de la pression interstitielle (couplage hydro-mécanique), le couplage chimie-mécanique (modification du volume poral et/ou minéral) et le comportement visqueux de la roche (fluage/relaxation).

Pour ce qui concerne les effets d'une variation de la teneur en eau, les essais réalisés par l'ANDRA sur des échantillons montrent qu'avec la désaturation, le module d'élasticité des argilites peut augmenter d'un facteur 6, les résistances à la compression simple et à la traction d'un facteur 10, le déviateur à la rupture en chargement tri-axial peut augmenter de 20 % à 50 %, le fluage ralentit (voire s'arrête). L'ANDRA explique ces observations par le rôle de la succion provoquée par la désaturation qui jouerait « *le même rôle qu'une pression de confinement, en refermant certaines micro-fissures préexistantes et en améliorant la cohésion du matériau* ». L'ANDRA mentionne que « *l'hétérogénéité de la succion dans l'échantillon [peut créer] des déformations différentielles [...] au sein du matériau et induire des micro-fissures hydriques* » mais constate que « *les résultats expérimentaux semblent montrer que le premier phénomène [effet de confinement] est généralement prédominant* ». L'ANDRA indique que « *les déformations induites par la désaturation des argilites sont contractantes [et] relativement importantes : de l'ordre de 0,5 %* » en déformation linéique pour une diminution d'humidité relative de 100 % à 66 %. Une anisotropie des déformations d'un facteur 2 environ a également été observée entre les directions perpendiculaire et parallèle à la stratification.

À l'échelle d'un ouvrage, l'ANDRA indique que les déformations contractantes induites par la désaturation sur les parements peuvent, sous certaines conditions aux limites mécaniques, « *produire un endommagement hydrique de la roche* ». L'IRSN partage ce point de vue ; à titre d'exemple le tunnel ferroviaire de Tournemire, creusé en 1881, dans lequel l'IRSN dispose d'une station expérimentale présente en paroi une zone endommagée d'environ 70 cm d'extension (pour un rayon moyen d'environ 3 m) qui ne peut pas s'expliquer par le seul effet du déconfinement à l'excavation<sup>8</sup> ; ceci a été vérifié lors de l'excavation de deux nouvelles galeries en 1996 et 2003. Ce tunnel est revêtu d'une maçonnerie en pierre de taille mais des vides importants existent parfois entre la roche et le soutènement. Il est vraisemblable que la désaturation a probablement joué un rôle dans l'apparition de cette zone endommagée. Ainsi, des modélisations hydro-mécaniques en milieux non-saturés [182] permettent d'expliquer la fissuration de retrait observée aux parements. Néanmoins, ce phénomène ne permet pas d'expliquer toute l'extension de la zone endommagée observée.

Le gonflement des argilites peut également être mis en relation avec des variations de teneur en eau. À cet égard, le tome « *Évolution phénoménologique du stockage géologique* » [3] indique que les argilites ont une teneur en smectites pouvant atteindre 10 % ce qui leur donne un potentiel de gonflement de quelques pourcents et une pression de gonflement<sup>9</sup> de 1 MPa à 3 MPa. L'IRSN indique que de nombreuses méthodes, plus ou moins empiriques, existent en génie minier pour tenir compte de l'aptitude au gonflement des terrains mais que cependant, de récents travaux tels que [183] ou [184] montrent que dans ce domaine, une modélisation fine peut rapidement devenir complexe. Ainsi, s'il est communément admis que « *le gonflement est une conséquence directe d'un changement d'état de contrainte et/ou d'un apport d'eau* » [183], la littérature montre également que la loi de comportement d'un matériau argileux gonflant ne saurait se limiter aux seuls aspects hydro-mécaniques et doit prendre en compte des aspects physico-chimiques comme la présence des solutés [184], introduisant ainsi un **couplage avec la chimie**.

---

<sup>8</sup> La lettre ANDRA-DSQE/05-193 du 12 septembre 2005 précise que lorsque le référentiel du site indique que la fracturation observée à Tournemire a été induite « *par la décharge mécanique du massif lors de la construction de l'ouvrage* », « *l'Andra ne cherche pas à expliquer [...] l'EDZ observée* » mais fait simplement remarquer que « *la géométrie de cette EDZ, quelle qu'en soit la cause [...] est comparable à celle observée au Mont-Terri* » qui, elle, a été provoquée par la décharge mécanique du massif.

<sup>9</sup> Pression qu'il faut exercer sur un échantillon pour s'opposer à tout gonflement.

**Pour ce qui concerne le couplage hydro-mécanique**, le référentiel du site [5] indique que les essais réalisés par l'ANDRA sur échantillons et interprétés dans le cadre de la mécanique des milieux poreux conduisent à un module de Biot (M) compris entre 470 MPa et 10 600 MPa et un coefficient de Biot (b) compris entre 0,4 et 0,8. Cependant, l'ANDRA rappelle que « *l'argilite ne se comporte pas tout à fait comme un milieu poreux* » car 90 % du volume poreux est interne à la matrice argileuse et sa porosité est si fine qu'une partie de l'eau est certainement physisorbée ; « *une partie des pores est donc non connectée ou non drainée* ». L'IRSN constate la grande dispersion des résultats obtenus sur échantillons et partage les doutes de l'ANDRA quant à l'applicabilité de la poro-mécanique aux argilites. L'IRSN ajoute que l'applicabilité de la poro-mécanique au cas des argilites désaturées est sans doute encore plus hasardeuse. De ce fait, la relation entre les contraintes totales appliquées aux argilites et les contraintes effectives sollicitant « réellement » le squelette solide et susceptibles de déclencher un comportement plastique ou visqueux n'est plus clairement établie. Ceci illustre la complexité du couplage entre l'hydro-mécanique et la plasticité ou la visco-plasticité.

Afin de vérifier la validité in situ des modèles hydro-mécaniques, une expérience de type « *mine-by test* » appelée REP (réponse à l'excavation d'un puits) a été réalisée entre le 10 mars et le 15 juillet 2005 dans le puits d'accès principal au laboratoire souterrain de Bure. La lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-193 du 12 septembre 2005 indique que « *le dispositif expérimental a fonctionné correctement et [que] les mesures hydromécaniques prévues sont bien enregistrées pendant et après fonçage du puits au droit de la section instrumentée à -467 m* » mais qu'« *il n'y a pas encore de documents disponibles sur les expérimentations en cours de réalisation à l'exception d'un bilan de la phase d'instrumentation et de la campagne de caractérisation initiale* ». Lors de la réunion technique du 24 octobre 2005, l'ANDRA a indiqué oralement que l'interprétation des résultats était en cours dans le cadre du benchmark MODEX-REP. L'IRSN rappelle que la pertinence de cette expérience était déjà reconnue dans le rapport DES n°408 présenté lors de la réunion du groupe permanent « déchets » consacré à la maîtrise de l'impact du laboratoire souterrain et au programme d'investigation avant et pendant le fonçage des puits du 5 juillet 2000. L'IRSN rappelle que cette expérience a été réalisée en puits dans l'unité géomécanique B du Callovo-Oxfordien et qu'elle devait être complétée d'une expérience similaire appelée REG (réponse à l'excavation d'une galerie) à réaliser en galerie dans l'unité géomécanique C du Callovo-Oxfordien où est envisagée l'éventuelle installation de stockage. Cette expérience a été reportée pour des raisons de calendrier. La validité des modèles hydro-mécaniques dans l'unité géomécanique C n'a donc pas encore été vérifiée. Toutefois, l'IRSN estime que les travaux scientifiques en cours dans les galeries du laboratoire souterrain pourraient apporter rapidement les premiers éléments de validation du comportement hydro-mécanique de cette unité.

**Pour ce qui concerne le comportement visqueux des argilites**, le référentiel du site [5] indique que sous un chargement isotrope, le fluage est quasiment nul, et que sous un chargement déviatorique, trois phases de fluage peuvent être identifiées : une phase primaire pendant laquelle la vitesse de déformation diminue rapidement et qui se produit juste après l'application de la charge ; une phase secondaire pendant laquelle la vitesse de déformation se stabilise ; enfin, dans quelques cas, pour des déviateurs de contrainte élevés et lorsque la déformation totale dépasse 1 % à 1,5 %, une phase tertiaire pendant laquelle la vitesse de déformation augmente jusqu'à la rupture de l'échantillon.

L'ANDRA observe que pendant la phase de fluage secondaire, la vitesse de déformation des argilites est pratiquement proportionnelle au déviateur de contrainte avec un coefficient de proportionnalité de  $4,3 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$  pour l'unité géomécanique A et de  $3,1 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$  pour les unités B et C. Ces valeurs sont déterminées sur des essais uni-axiaux d'une centaine de jours. Pour des durées d'essais plus longues, l'ANDRA indique que la vitesse de fluage décroît lentement et atteint la limite de précision des appareils de mesures au bout de deux à trois ans. L'ANDRA estime qu'il existe un seuil de contrainte en dessous duquel le fluage s'arrête mais indique que celui-ci n'a pas encore été déterminé et considère que « *l'existence d'un fluage sur le très long terme reste une question ouverte* ».

L'IRSN rappelle que l'extrapolation des observations réalisées en laboratoire sur des durées de l'ordre de quelques mois nécessite le recours à la modélisation et constate que l'ANDRA se réfère notamment aux modèles de

Lemaitre et de Bingham. Le principe du modèle de Bingham suppose l'existence d'un seuil de contrainte en dessous duquel le matériau ne flue pas. L'IRSN constate que ce seuil n'a pas encore pu être mesuré dans les argilites et que l'ANDRA semble tout autant en admettre l'existence, pour des raisons de cohérence avec l'anisotropie des contraintes naturelles observée dans la formation hôte, que le mettre en évidence par l'expérience. L'IRSN ajoute qu'en théorie, ce seuil pourrait également dépendre de la déformation viscoplastique. Le modèle de Lemaitre est de plus en plus utilisé pour décrire le comportement viscoplastique des géomatériaux. L'IRSN en reconnaît la pertinence mais en souligne également les limites. Ainsi, la version initiale du modèle de Lemaitre a été développée pour répondre aux besoins de la métallurgie et ne modélise que la phase primaire du fluage. Certains auteurs introduisent des seuils de vitesse de déformation pour représenter la phase secondaire du fluage [185] ou recourent à la théorie de l'endommagement pour introduire la phase tertiaire [186], mais ces développements restent du domaine de la recherche. L'IRSN considère qu'une modélisation fine du comportement viscoplastique peut rapidement devenir complexe et nécessiter la prise en compte de couplages avec les autres mécanismes évoqués plus haut.

L'IRSN s'interroge notamment sur les conséquences de la prise en compte d'un couplage entre la viscoplasticité et le comportement hydro-mécanique de la roche et des ouvrages. En effet, au niveau de la roche, la loi de comportement viscoplastique de Lemaitre présentée dans le référentiel du site [5] suppose une déformation viscoplastique volumique nulle, ce que ne vérifient pas les essais de fluage réalisés à ce jour sur les argilites de l'Est [187]. Au niveau d'un ouvrage, la convergence différée est difficile à évaluer car elle doit tenir compte à la fois du comportement de la roche environnante, certainement endommagée, et de celui des remblais, revêtements laissés en place, bouchons de scellement, etc. Néanmoins, ces mouvements devraient aller dans le sens d'une diminution du volume libre des ouvrages remblayés. Si ceux-ci sont saturés en eau, en fonction de la cinétique de la convergence différée et de la diffusivité hydraulique environnante, l'IRSN estime que la possibilité de créer un gradient hydraulique supplémentaire sous l'effet du comportement différé de la roche et des ouvrages serait à étudier.

En conclusion, l'IRSN considère que la modélisation du comportement différé des argilites – matériau complexe composé d'un squelette solide et d'eau en interaction étroite – à l'échelle d'un ouvrage et sur des durées pouvant aller de quelques centaines à plusieurs milliers d'années est difficile à appréhender. L'IRSN estime que le « découpage » proposé par l'ANDRA en différents mécanismes potentiellement responsables du comportement différé des argilites est un peu « artificiel » car les mécanismes évoqués sont en réalité couplés mais reconnaît qu'une telle approche est pertinente à ce stade pour aborder ce problème difficile. L'IRSN considère que chacun de ces mécanismes peut, à lui seul, conduire à des modélisations complexes et que l'observation du comportement différé des ouvrages du laboratoire souterrain devrait permettre d'améliorer l'identification des mécanismes et des couplages prépondérants. L'IRSN estime donc, comme l'ANDRA, qu'il est nécessaire « *de laisser les dispositifs expérimentaux poursuivre l'acquisition de connaissances au cours des prochaines années* » [1]. L'IRSN considère enfin que la modélisation du comportement différé des argilites à l'échelle d'un ouvrage est encore en cours d'acquisition et que le calage de cette modélisation, qui devrait permettre d'apprécier les possibilités d'extrapolation à long terme du comportement mécanique différé de la roche, nécessitera plusieurs années d'observation in situ.

## 2.4 CONCLUSION

L'IRSN constate que l'ANDRA a rassemblé, dans le Dossier 2005 Argile, des éléments de base permettant d'élaborer un concept de stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien et d'en apprécier la faisabilité, au sens de la possibilité qu'un tel concept puisse assurer, à court et à long terme, la protection de l'homme et de l'environnement contre la nocivité des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue. De ces éléments, l'IRSN retient en particulier que les données géologiques acquises dans le laboratoire souterrain de Bure permettent de conclure à l'absence de structure transmissive au sein de la formation du Callovo-Oxfordien dans la

zone reconnue par forage dans l'emprise de la sismique 3D. L'IRSN considère en outre que cette couche argileuse possède vraisemblablement un fort potentiel d'amortissement de la fracturation qui laisse préjuger de l'existence, dans cette couche, de blocs sains de taille cohérente avec les modules de stockage de grande dimension envisagés par l'ANDRA. Par ailleurs, les données hydrodynamiques et chimiques acquises montrent que les propriétés de la formation hôte ne devraient permettre que des transferts lents d'activité relâchée par les colis. Par ailleurs, malgré la complexité du comportement mécanique des argilites de cette formation, la réalisation d'ouvrages souterrains ne devrait pas poser de difficulté majeure du point de vue géotechnique. L'IRSN considère donc que la formation argileuse du Callovo-Oxfordien présente des propriétés intrinsèques favorables au confinement des déchets.

Pour ce qui concerne les autres données de base, l'IRSN considère que l'ANDRA a effectué un travail important et de qualité pour élaborer un modèle d'inventaire des colis susceptibles d'être stockés. Ce modèle apparaît, au stade actuel, suffisant pour les besoins de l'étude de faisabilité présentée dans le Dossier 2005 Argile. Par ailleurs, les données hydrogéologiques acquises récemment par l'ANDRA permettent de mieux apprécier les caractéristiques globales des écoulements souterrains par rapport à celles présentées dans les dossiers précédents. L'IRSN constate à cet égard qu'il n'existe pas d'indication, dans le secteur, d'écoulements rapides et d'échanges de fluides entre les encaissants à l'exception des zones de failles cartographiées pour lesquelles des observations suggèrent la possibilité de tels transferts.

L'IRSN estime toutefois que des travaux complémentaires seront nécessaires pour confirmer les tendances générales précitées. En particulier, l'IRSN considère que les données géologiques rassemblées ne permettent pas de conclure, à ce stade, que l'endommagement tectonique (fractures) de la formation argileuse est, sur l'ensemble des zones du secteur susceptibles d'accueillir un éventuel stockage, aussi faible que celui observé dans le laboratoire. L'IRSN considère en conséquence que l'ANDRA devra définir une stratégie de reconnaissance permettant en particulier d'identifier la fracturation possible dans la formation hôte et ses encaissants. À cet égard, l'IRSN estime que l'emploi de la sismique 3D, couplée avec une reconnaissance de la formation argileuse au moyen de forages obliques réalisés à l'aplomb des indices sismiques les plus marqués dans les formations sous-jacentes, devrait permettre de rassembler des données suffisantes pour évaluer les caractéristiques structurales des sites sélectionnés. Par ailleurs, les évaluations exposées dans la suite du présent rapport indiquent qu'une amélioration de la connaissance des écoulements sera nécessaire pour accroître le niveau de confiance qui peut être accordé aux estimations de l'impact dosimétrique du stockage. À cet égard, l'IRSN estime qu'il sera important à l'avenir d'être en mesure de statuer sur la possibilité ou non que des transferts localisés, à l'échelle du secteur, puissent remettre en cause le caractère globalement homogène des écoulements dans les formations encaissantes, tel que déduit des données piézométriques aujourd'hui rassemblées. Il conviendra également de confirmer l'origine de la salinité des formations encaissantes dans la mesure où la connaissance de la provenance du sel est un élément important pour le calage des simulations hydrogéologiques et plus globalement pour comprendre les écoulements souterrains. Enfin, il conviendra de procéder à une nouvelle estimation du spectre de réponse d'un séisme se produisant durant la phase de post-fermeture, en retenant des hypothèses plus pénalisantes que celles présentées par l'ANDRA dans le Dossier 2005 Argile et qui, selon l'IRSN ne peuvent pas être écartées sur la base des connaissances actuelles.

L'évaluation présentée dans les chapitres suivants montre néanmoins que les réserves formulées ci-avant ne constituent pas à ce stade des points rédhibitoires pour montrer la faisabilité d'un stockage dans la formation argileuse étudiée au moyen du laboratoire souterrain de Bure. Aussi, l'IRSN considère, au vu de l'ensemble des éléments rassemblés, qu'il n'existe pas d'obstacle à la recherche d'un site de stockage dans la zone de transposition définie par l'ANDRA.

### **3 DÉMARCHE DE SÛRETÉ**

La démarche de sûreté mise en œuvre par l'ANDRA dans le cadre du Dossier 2005 Argile s'appuie en particulier sur deux principes de conception que sont « *la robustesse des concepts* » et « *la démontrabilité* », et prend en compte le fait que les études sont au stade de la faisabilité. De plus, l'ANDRA précise à cet égard que « *son but n'est pas de positionner le stockage sur un site particulier en vue de solliciter une autorisation de création* ».

Les objectifs principaux de l'ANDRA sont la protection des personnes et de l'environnement d'une part, la limitation à un niveau aussi faible que raisonnablement possible des conséquences radiologiques éventuelles sur l'environnement d'autre part. À cet égard, l'ANDRA indique que les indicateurs d'impact pris en compte en phase d'exploitation ou sur le long terme sont en accord avec les principes de la Commission Internationale de Protection Radiologique et de la RFS III.2.f. Les modèles servant aux calculs d'impact ne prétendent pas avoir un caractère prédictif mais entendent simplement « *fournir une vision autant que possible majorante de l'impact* ». La dose calculée ne constitue alors qu'un indicateur de l'impact, d'autres indicateurs (e.g. flux de radionucléides) existent et traduisent les performances intrinsèques du stockage.

L'ANDRA indique que la démarche, qui englobe une démarche de conception, de recherche scientifique et d'évaluation de sûreté, est une démarche itérative en ce sens qu'elle tire les enseignements des étapes précédentes et qu'elle est susceptible d'évoluer au-delà de 2006.

Cette démarche est notamment basée sur la mise en œuvre de la notion de fonctions de sûreté multiple. La sûreté du stockage ne repose pas nécessairement sur l'interposition de barrières physiques successives et redondantes entre l'homme et les déchets (concept multi-barrières) mais plutôt sur la mise en œuvre de fonctions, la plupart du temps complémentaires, assurées par différents composants du stockage et qui contribuent à la sûreté d'ensemble de ce stockage.

L'ANDRA attribue un certain nombre de fonctions aux différents composants du stockage que ce soit pour la phase d'exploitation ou à long terme.

L'ANDRA a défini [4] les fonctions de sûreté en exploitation suivantes :

- protéger les personnes contre l'irradiation,
- confiner la radioactivité,
- maîtriser le risque de criticité,
- évacuer la puissance thermique résiduelle des colis de stockage,
- évacuer les gaz de radiolyse émis par certains colis.

En phase de post-fermeture, les fonctions de sûreté de haut niveau sont les suivantes :

- isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines,
- préserver la mémoire du stockage,
- s'opposer à la circulation d'eau,
- limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage,
- retarder et atténuer la migration des radionucléides.

L'ANDRA précise que la mise en œuvre de ces fonctions de sûreté implique leur déclinaison en sous-fonctions de sûreté.

L'ANDRA précise l'architecture du stockage à partir des données d'entrée sur les colis de déchets, et des connaissances acquises sur la formation hôte ainsi que sur les matériaux utilisables dans le stockage et leur comportement.

La démarche de sûreté de l'ANDRA consiste par la suite à décrire, dans le cadre de l'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) en situation normale et en parallèle de la définition des architectures, l'évolution du stockage dans le temps et l'espace. Plus précisément, cette description consiste en un découpage de l'évolution du stockage en situations qui correspondent à un intervalle de temps et d'espace au sein duquel quelques grands phénomènes dominent l'évolution des composants. À cet égard l'ANDRA précise qu'il ne s'agit pas « *de présenter une évolution certaine du stockage mais un ensemble d'évolutions possibles* ».

Sur la base de cette définition du domaine d'évolution normal du stockage l'ANDRA, dans le cadre de la démarche d'évaluation de sûreté, procède à la vérification par une évaluation de performance composant par composant et globalement que le domaine de fonctionnement normal du stockage permet de satisfaire aux objectifs visés de protection de l'homme et de l'environnement. L'évaluation de la sûreté globale du stockage est effectuée à partir de la définition d'un scénario d'évolution normale du stockage établi à partir de l'APSS.

Compte tenu du caractère itératif de la démarche de sûreté de l'ANDRA les résultats du travail de conceptualisation du stockage et du calcul de performances permettent, outre de vérifier que les objectifs fixés sont atteints, d'alimenter en retour la conception et la démarche d'acquisition de connaissances.

La démarche de sûreté de l'ANDRA consiste enfin à identifier et gérer les incertitudes qui peuvent concerner les valeurs de paramètres, la compréhension de certains phénomènes couplés ou encore l'incapacité à prévoir l'occurrence de certains événements. L'ANDRA consacre dans le Dossier 2005 Argile un chapitre entier à la gestion des incertitudes et a développé une analyse qualitative de sûreté qui consiste en particulier à étudier l'influence des incertitudes de connaissances sur le comportement du stockage mais également permet d'identifier les situations qui s'écartent du domaine d'évolution normal du stockage.

Sur la base de l'analyse qualitative de sûreté, l'ANDRA définit donc des situations dites « *altérées* » qui englobent à la fois les situations s'écartant du domaine d'évolution normal mais également des situations « *définies pour des raisons de sûreté, qui n'ont aucune vraisemblance et qui sont étudiées uniquement pour en tirer des enseignements sur le comportement du stockage face à une sollicitation non anticipée* ». Par ailleurs des « *situations altérées-types* » (défaut de scellements, défauts de colis, forage intrusif) sont prises en compte et définies dans des APSS dites « *d'évolutions altérées* ».

A partir des situations d'évolutions altérées ainsi définies, l'ANDRA construit des scénarios d'évolution altérées qui font l'objet de calculs de performances dont l'objectif est d'une part de vérifier si le stockage reste sûr dans ces conditions défavorables et d'obtenir des informations complémentaires sur le rôle des composants du stockage.

L'IRSN constate que la démarche de sûreté de l'ANDRA consiste notamment à confiner la radioactivité au plus près des déchets et que ce point constitue un progrès notable par rapport aux premières étapes de développement du projet. En ce sens cette démarche s'inscrit clairement dans l'objectif fixé par la RFS III.2.f de concevoir des barrières aussi efficaces que possible, l'évaluation de l'impact dosimétrique n'étant destinée qu'à vérifier que les capacités de confinement du stockage permettent de respecter les objectifs visés de protection de l'homme et de l'environnement.

L'IRSN note que l'ANDRA décrit de manière satisfaisante les fonctions allouées aux différents composants du stockage en distinguant celles qui relèvent de la sûreté en exploitation de celles associées au maintien d'un haut niveau de confinement en phase de post-fermeture. L'ANDRA définit clairement les caractéristiques des différents composants du stockage qui permettraient de remplir les fonctions allouées et, à partir des connaissances acquises sur la mise en œuvre et l'évolution des matériaux constitutifs de ces composants dans différentes conditions d'environnement, évalue les niveaux de performances qu'ils pourraient potentiellement atteindre.

L'IRSN note également que l'ANDRA consacre dans le Dossier 2005 Argile un chapitre à l'identification et à la gestion des incertitudes. Dans ce chapitre l'ANDRA présente les principales incertitudes mises en évidence dans le cadre de la phase de post-fermeture du stockage et détaille la démarche mise en œuvre pour les prendre en compte, notamment par le traitement de situations qui permet d'évaluer l'importance des incertitudes sur la

sûreté globale du stockage et de proposer le cas échéant, des dispositions complémentaires pour les gérer (évolutions des concepts, amélioration des connaissances).

Enfin, l'IRSN considère que l'architecture documentaire du Dossier 2005 Argile favorise la lisibilité de la démarche développée et de sa mise en œuvre.

**L'IRSN estime en conclusion que la démarche de sûreté développée et présentée par l'ANDRA dans le Dossier 2005 Argile est satisfaisante.**

La mise en œuvre de cette démarche à partir des données de bases examinées dans le chapitre précédent conduit à l'élaboration des concepts de stockage présentés ci-après. L'évaluation par l'ANDRA de la sûreté de ces concepts également établie à partir de cette démarche est examinée dans les chapitres 6 et 7 du présent rapport.

## **4 DESCRIPTION DES CONCEPTS**

Ce chapitre présente une vue d'ensemble de l'architecture du stockage et des concepts retenus par l'ANDRA, en vue de faciliter la compréhension de la suite du présent rapport. Les éléments de description qu'il contient sont issus notamment du document de synthèse du Dossier 2005 Argile [1] et des tomes « *Architecture et gestion du stockage géologique* » [2] et « *Évaluation de sûreté du stockage géologique* » [4]. L'évaluation de ces composants au regard de la sûreté du stockage fait l'objet des chapitres 6 et 7 du présent rapport.

### **4.1 CONFIGURATION GÉNÉRALE DES INSTALLATIONS**

Les installations de surface comprennent des bâtiments d'accueil des colis primaires, les ateliers de préparation des colis de stockage ainsi que des entreposages tampons pour ajuster les flux des procédés industriels. Les déblais issus du creusement des installations souterraines sont entreposés sur une verse ; ils seront ensuite employés, en partie, comme matériau de remblais.

L'architecture des installations souterraines est horizontale et de faible extension verticale. Les ouvrages sont placés au milieu de la formation sur un seul niveau afin de maximiser les épaisseurs d'argilites situées au-dessus et au-dessous du stockage. Pour assurer la liaison entre le jour et le fond, l'ANDRA prévoit quatre **puits** (diamètre 6 à 12 m) ayant chacun une fonction spécifique : descente de colis, descente et remontée du personnel, service (déblais, gros matériel), ventilation assurant le retour d'air. Ces puits sont regroupés dans une même zone (200 m de rayon) et sont situés en amont hydraulique des zones de stockage.

Des **galeries de liaison** (de diamètre utile de 5,7 m pour la plupart) relient les puits et les zones de stockages. Les zones de stockage sont distinctes selon les déchets et le stockage est fractionné en sous-ensembles (cf. Figure 14) : les différentes catégories de colis (B, C et le cas échéant CU) sont stockées dans des **zones** distinctes subdivisées en **sous-zones**, **modules**, **unités d'exploitation** et **alvéoles** qui accueillent les colis. Plusieurs unités peuvent être en construction ou en exploitation simultanément dans la même zone.

Dans la zone de stockage de déchets B, un module est équivalent à une unité d'exploitation et correspond à un alvéole unique, desservi par une **galerie d'accès** orientée dans l'axe de l'alvéole. La zone de stockage comprend de 32 à 38 alvéoles selon le scénario de gestion des déchets. L'emprise de cette zone de stockage serait de l'ordre d'une centaine d'hectares.

Dans les zones de stockage de déchets C (et CU), un module regroupe une à plusieurs centaines d'alvéoles, répartis dans deux unités d'exploitation, desservies par des galeries d'accès aux alvéoles orientées orthogonalement aux alvéoles. La zone de stockage de déchets C anciens (C0), sensiblement moins exothermiques que les autres colis C, ne comporte qu'un module de 200 alvéoles, couvrant 8 hectares. Celle de déchets C actuellement produit ou à produire (C1 à C4), séparée en sous-zones, compterait de 1 400 (scénario de gestion S2<sup>10</sup>) à 4 800 (S1) alvéoles. Son emprise, environ 500 hectares dans le cas du scénario S1a avec traitement de tous les combustibles UOX et MOX, et mise en stockage des colis après 60 (C1/C2) à 70 ans (C3/C4) de refroidissement pour les concepts étudiés, est largement déterminée par des considérations thermiques, dépendant notamment de la durée d'entreposage préalable des colis primaires ; elle serait ainsi réduite de près de moitié après un doublement de la durée d'entreposage. La zone de stockage de combustibles usés, dans le cas où ils ne seraient pas retraités, serait organisée de façon comparable à celle des déchets C. Cette zone contiendrait 3 900 alvéoles de CU1 (scénario S2) et 1 300 (S2) à 1 800 alvéoles (S1b/S1c) de CU2. Son emprise, également sensible à la durée d'entreposage, serait de l'ordre de 820 hectares pour les CU1 et 350 hectares pour les CU2 pour des durées d'entreposage respectivement de 60 et 90 ans.

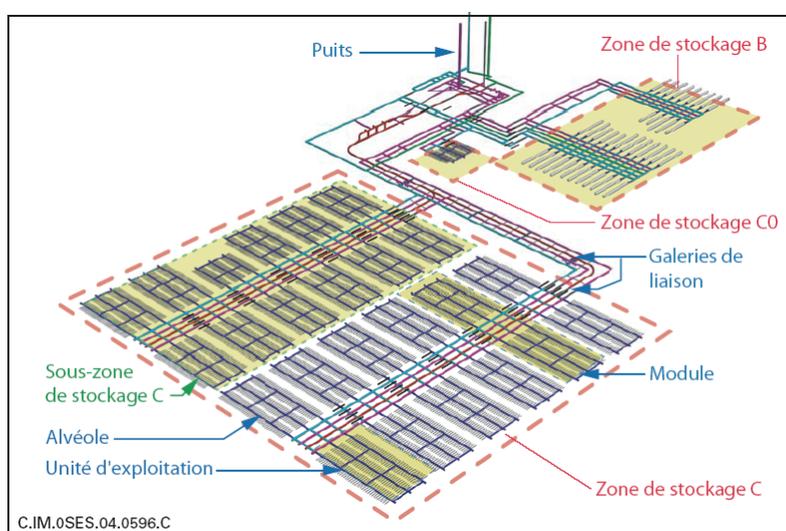


Figure 14 - Organisation générale du stockage [1].

L'architecture du stockage décrite ci-dessus est également déterminée par le déroulement du processus de stockage et donc des flux de colis et de matière à transférer dans les installations souterraines. Les flux annuels des différents types de colis considérés, ainsi que les ordres de grandeur de durée de mise en stockage (en supposant une exploitation continue à flux régulier) sont présentés dans le Tableau 9.

Pour ce qui concerne les principaux flux liés à la construction des installations, les volumes excavés<sup>11</sup> annuels varient selon les types de colis, de l'ordre de 50 000 m<sup>3</sup>/an pour les colis B à 300 000 m<sup>3</sup>/an pour les CU1. Les flux de béton représentent environ 50 % des flux d'excavation. Pour le remblayage des galeries, des cadences de l'ordre de 200 000 m<sup>3</sup>/an sont envisageables.

Les alvéoles, les galeries et les puits sont dotés, lorsque leur fermeture est décidée, de scellements constitués d'argile gonflante faiblement perméable. Dans les ouvrages horizontaux, ces scellements sont positionnés de façon à être orientés parallèlement à la contrainte horizontale majeure.

<sup>10</sup> Les scénarios de gestion des combustibles nucléaires (S1a, S1b, S1c et S2) sont rappelés dans l'Annexe T1 au présent rapport.

<sup>11</sup> Volume excavé en place. Du fait du foisonnement de la roche abattue, le volume à transporter est environ 50 % supérieur. Les ordres de grandeur donnés peuvent de plus fortement fluctuer selon les décisions prises dans la gestion du stockage, dans une fourchette de ± 50 %.

	Nombre de colis primaires réceptionnés par an*	Nombre de colis de stockage produits par an	Durée d'exploitation
<b>Colis peu ou faiblement exothermiques</b>			
Déchets B	5 000	1 400	40 ans (scénarios S1) 30 ans (scénario S2)
<b>Colis moyennement exothermiques</b>			
Déchets C0	400	400	10 ans
Combustibles usés CU3	400	150	15 ans
<b>Colis fortement exothermiques</b>			
Déchets C1 C2 C3 C4	600 à 700	600 à 700	55 ans (scénarios S1) 15 ans (scénario S2)
Combustibles usés CU1	1 500	350	35 ans
Combustibles usés CU2	150	150	35 ans (scénarios S1) 25 ans (scénario S2)

\* ou nombre d'assemblages ou d'étuis de combustibles usés

Tableau 9 - Flux annuels de colis et ordres de grandeur de durée de mise en stockage [2].

## 4.2 LES COLIS DE STOCKAGE ET LES ALVÉOLES DE DÉCHETS B

Les déchets B se présentent sous la forme de colis primaires cylindriques très variés par leur taille, leurs contenus radiologiques et chimiques, et leur système de préhension. Pour simplifier l'exploitation du stockage, les colis primaires sont placés dans des conteneurs parallélépipédiques préfabriqués en béton armé et fibré (fibres en acier inoxydable). Seuls des déchets de même type sont regroupés au sein d'un même colis de stockage. Le colis de stockage ainsi constitué, illustré par la Figure 15, peut regrouper 1 à 4 colis primaires. Sa masse est de 6 à 25 tonnes environ et ses dimensions comprises entre 1,2 et 3 m. La fermeture du conteneur est assurée par un couvercle préfabriqué, clavé à l'aide de béton coulé dans une rainure du conteneur.

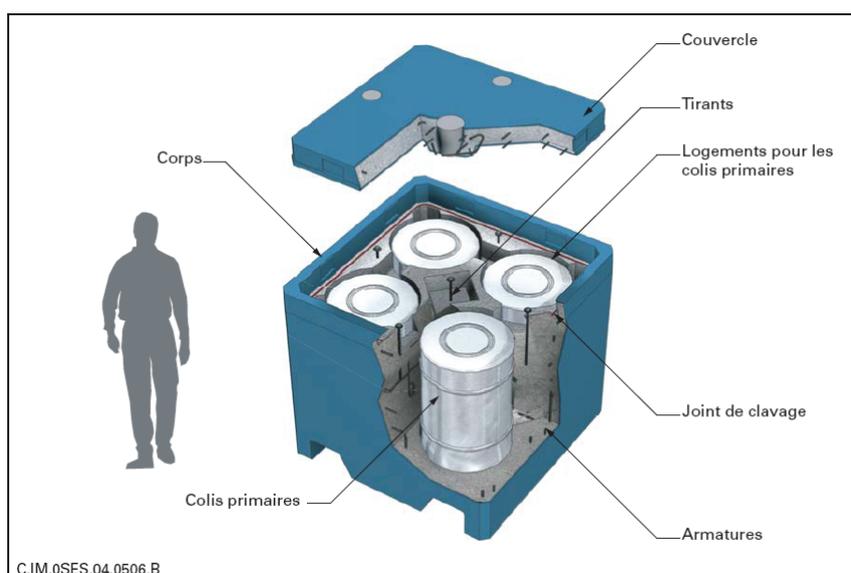


Figure 15 - Conteneur de stockage standard de déchets B (illustration pour colis de type B2) [1].

Les alvéoles de stockage des déchets B sont des tunnels borgnes sub-horizontaux, d'une longueur utile d'environ 250 m et d'un diamètre excavé compris entre 10 et 12 m (cf. Figure 16). Ils sont orientés parallèlement à la pression horizontale des terrains la plus forte pour minimiser l'endommagement de la roche lors du creusement. Un revêtement en béton assure la stabilité mécanique de l'ouvrage.

Les colis de stockage mis en place dans un même alvéole ont les mêmes dimensions. En fonction de leur taille, ils sont disposés sur 3 ou 4 niveaux et sur 2 à 4 colonnes dans le sens transverse de la chambre de stockage (corps de l'alvéole). Afin de réduire les vides résiduels pour limiter les déformations mécaniques sur le long terme, tout en maintenant un jeu fonctionnel pour permettre une gestion réversible du stockage, des jeux décimétriques sont laissés dans le sens transverse entre les colis, et entre les colis et le revêtement. Dans le sens longitudinal, les jeux sont réduits au minimum. Ces jeux correspondent à un taux de vide entre colis inférieur à 5 % de la section excavée.

Ces alvéoles constituent des chambres irradiantes dans lesquelles les colis sont manutentionnés par un engin de type chariot élévateur téléopéré. La tête d'alvéole (environ 13 m de long) est équipée, pour assurer la radioprotection du personnel, d'un sas constitué d'un système de doubles portes. Les colis de stockage peuvent évacuer les gaz produits par radiolyse générés au sein des colis primaires (diffusion à travers les couvercles en béton ou par des orifices disposés sur le conteneur). L'alvéole est ventilé pendant toute la durée d'exploitation pour évacuer ces gaz. Le chapitre 6 du présent rapport décrit plus avant les moyens et procédés envisagés pour l'exploitation de ces alvéoles. Pour la fermeture, la galerie d'accès (5 ou 6 m de diamètre) à chacun des alvéoles est obturée par un scellement en bentonite confiné par des massifs d'appui en béton (cf. Figure 16).

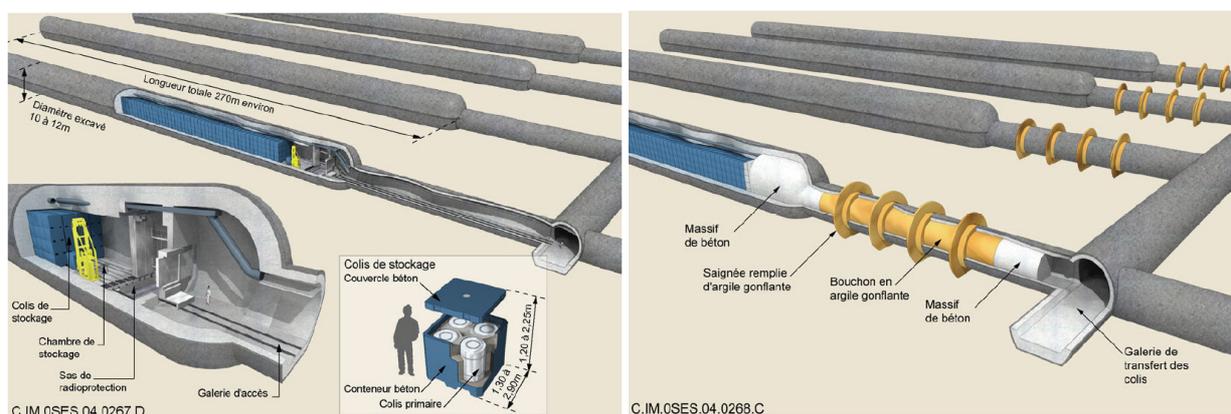


Figure 16 - Alvéole de stockage de déchets B en configuration d'exploitation (gauche) et scellé (droite) [2].

## 4.3 LES COLIS DE STOCKAGE ET LES ALVÉOLES DE DÉCHETS C

Les colis primaires de déchets C sont placés dans un surconteneur individuel préalablement au stockage, pour des raisons de dimensionnement thermique et de gestion des colis. Ce surconteneur cylindrique (cf. Figure 17) comporte un corps et un couvercle en acier non allié (P235 selon les normes AFNOR) de 55 mm d'épaisseur utile, soudés par faisceau d'électrons. Deux colis de stockage aux dimensions standardisées (géométrie dite « courte » de longueur 1,3 m, de diamètre 0,65 m et de masse environ 1,6 tonnes ; géométrie dite « longue » de longueur 1,6 m, de diamètre 0,59 m et de masse environ 1,9 tonnes) permettent de couvrir l'ensemble des colis primaires de déchets C. Ils sont dotés d'aménagements intérieurs qui limitent les vides et, à l'extérieur, de patins de glissement en céramique permettant leur manutention dans l'alvéole de stockage par une technique de poussage. Une gorge usinée à l'extérieur du couvercle permet la préhension verticale et horizontale du conteneur à l'aide d'un grappin. Sur le long terme, le surconteneur de déchets C a principalement pour fonction de maintenir un confinement pendant la phase thermique. L'ANDRA vise une étanchéité totale à l'eau pendant 4 000 ans.

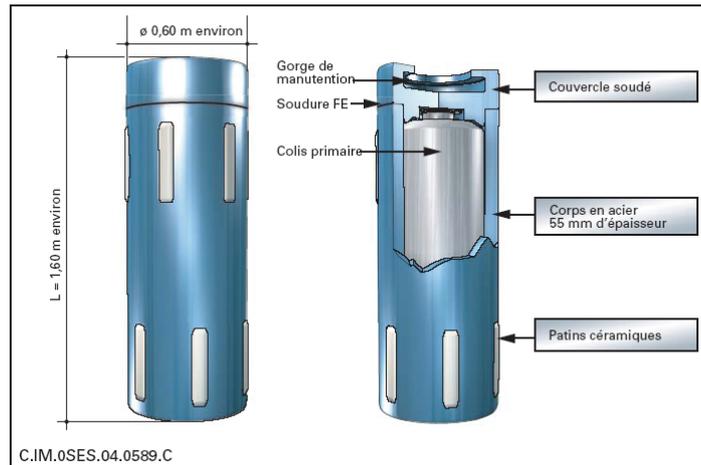


Figure 17 - Principe du surconteneur de déchets C [1].

L'alvéole de stockage de déchets C est un tunnel borgne horizontal (0,7 m de diamètre, 40 m de longueur totale). Il peut accueillir 6 à 20 colis selon leur puissance thermique. Les colis dégageant le plus de chaleur sont séparés par des intercalaires. La chaleur est évacuée par conduction passive dans la formation géologique (aucune ventilation n'est sollicitée). L'alvéole de stockage comprend une partie utile (ou corps) dédiée au stockage des colis et une tête qui accueille le scellement de fermeture de l'alvéole (cf. Figure 18). Le corps (30 m de long) est revêtu d'un chemisage en acier non allié (S235 selon les normes AFNOR ; 25 mm d'épaisseur) qui préserve des jeux fonctionnels pour faciliter la mise en place et le retrait éventuel des colis. La tête de l'alvéole (8 m de long) est dotée pendant la période d'exploitation d'un chemisage provisoire pour la mise en place des colis. Elle est obturée pendant son exploitation par une porte en acier de forte épaisseur, qui assure la protection radiologique du personnel présent dans la galerie d'accès de l'alvéole. Lorsque la fermeture de l'alvéole est décidée, le tronçon de chemisage occupant la tête de l'alvéole est retiré. Un bouchon de protection radiologique en acier, un bouchon d'argile gonflante et un bouchon d'appui en béton sont alors mis en place successivement dans la tête d'alvéole.

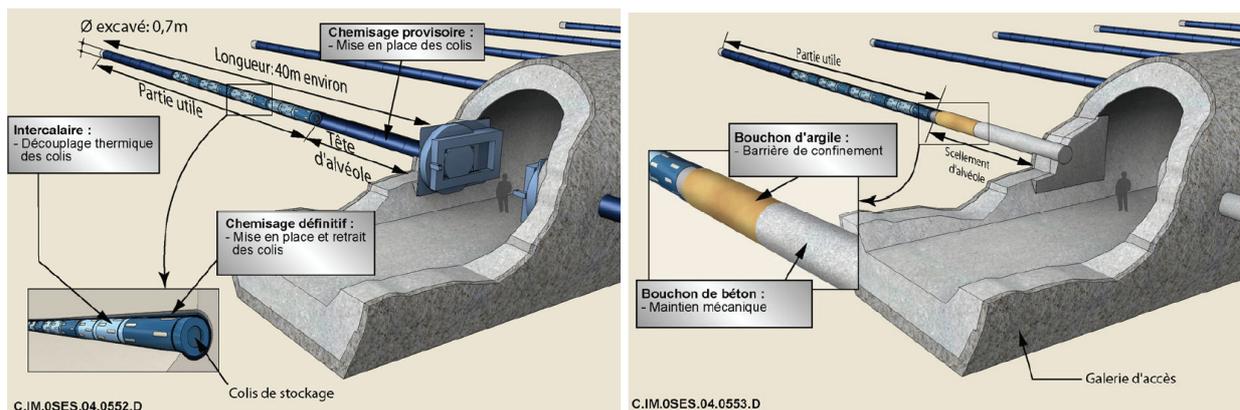
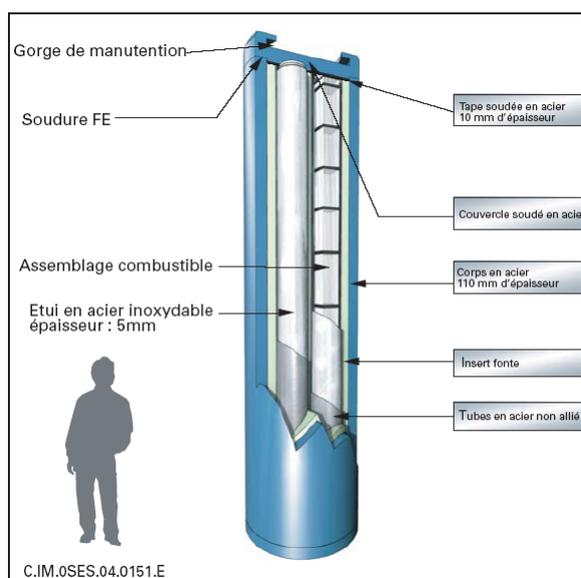


Figure 18 - Alvéole de stockage de déchets C en configuration d'exploitation (gauche) et scellé (droite) [2].

#### 4.4 LES COLIS DE STOCKAGE ET LES ALVÉOLES DE COMBUSTIBLES USÉS

Dans le cas où les combustibles usés (CU) ne seraient pas retraités, il est envisagé pour leur stockage de placer les assemblages combustibles dans un conteneur cylindrique constitué d'un corps et d'un couvercle en acier non allié (P235) soudés par faisceau d'électrons (cf. Figure 19). Le nombre d'assemblages par conteneur est fixé à quatre pour les combustibles UOX/URE pour limiter la charge thermique du colis de stockage et pour la maintenance. Un insert interne en fonte (épaisseur minimale de 45 mm) maintient un espacement entre les quatre assemblages

combustibles, en vue de garantir la sous-criticité et d'assurer la tenue mécanique du colis à la pression externe. Ce colis de stockage de 1,25 m de diamètre, dont la longueur varie entre 4,5 et 5,4 m, pèse entre 35 et 43 tonnes. Pour les combustibles MOX et certains UOX (dont la réactivité vis-à-vis du risque de criticité serait plus élevée que celle des combustibles usés standards), un seul assemblage est placé par conteneur en raison de leur puissance thermique ou du risque de criticité. La tenue mécanique du colis de stockage est assurée par l'enveloppe du conteneur. La masse de ce colis de stockage mono-assemblage, de 0,62 m de diamètre et de 4,5 à 5,4 m de longueur, est de 8 à 10 tonnes. L'épaisseur du conteneur est de 110 mm pour le conteneur à quatre assemblages et de 120 mm pour le conteneur mono-assemblage. Comme dans le cas des déchets C, le conteneur de combustibles usés a pour fonction d'assurer un confinement : la durée minimale d'étanchéité à l'eau du conteneur de CU visée est de 10 000 ans.



**Figure 19 - Colis de stockage de grand diamètre, 4 assemblages UOX ou URE [1].**

L'alvéole de stockage de combustibles usés est un tunnel horizontal borgne d'environ 2,5 m (colis mono-assemblage) à 3 m (colis de quatre assemblages) de diamètre et de 45 m de longueur totale (cf. Figure 20). Comme pour les déchets C, la chaleur produite par les colis est évacuée par conduction passive dans la formation géologique.

Le corps de l'alvéole (environ 35 m de long) est équipé, de la roche vers l'intérieur :

- d'un soutènement métallique constitué de viroles en acier (25 à 30 mm d'épaisseur) perforé ;
- d'une barrière ouvragée argileuse (80 cm d'épaisseur) constituée d'anneaux préfabriqués d'argile gonflante et de sable. Sa fonction principale est de constituer un milieu exclusivement diffusif qui intervient lorsque le conteneur de combustibles usés atteint sa fin de vie ;
- d'un chemisage métallique recevant trois à quatre colis (selon leur puissance thermique) séparés par des intercalaires.

La tête de l'alvéole (10 m de long) est constituée d'un chemisage provisoire permettant la mise en place des colis. Lorsque la fermeture est décidée, ce chemisage est enlevé après la pose d'un bouchon métallique de protection biologique, puis un noyau d'argile gonflante est introduit dans les anneaux de la barrière ouvragée et un bouchon de béton est coulé pour assurer un appui mécanique.

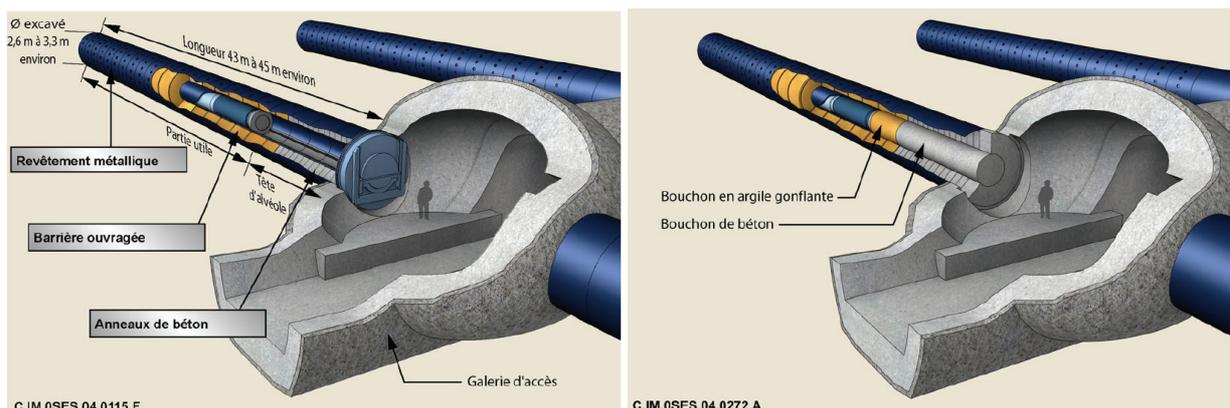


Figure 20 - Alvéole de combustibles usés en configuration d'exploitation (gauche) et scellé (droite) [2].

## 5 ÉVOLUTIONS DES COMPOSANTS DU STOCKAGE

Une installation de stockage sera le siège de perturbations d'origine thermique, hydrique, chimique et mécanique qu'il est nécessaire d'estimer en préalable à l'évaluation de sûreté sur le court et le long terme. Ce chapitre examine les grands types de processus qui affectent les différents composants du stockage et leur environnement.

### 5.1 PERTURBATIONS THERMIQUES

L'environnement du stockage subira une élévation significative de température due aux propriétés exothermiques des combustibles usés (colis types CU1 et CU2), des déchets vitrifiés (colis types C1, C2, C3 et C4) et dans une moindre mesure de certains déchets B (les colis types B1, B2 et B5 essentiellement). La puissance thermique résiduelle un an après le déchargement des réacteurs des colis types CU1 et CU2 varie de 3 000 W à 6 500 W et reste significative pendant plusieurs milliers d'années (cf. Figure 22) ; pour les colis types C1, C2, C3 et C4 la puissance thermique, un an après la fabrication des colis de verre, varie de 2 000 W à 2 500 W et s'atténue en quelques centaines d'années (cf. Figure 22) ; enfin, pour les déchets B, les puissances thermiques, un an après la date de fabrication, varient de 5 W à 30 W et ne sont plus que d'environ 5 W pour les colis type B5 et B2 au bout d'une centaine d'années. Ces transitoires thermiques, même s'ils ne sont que de courte durée au regard des temps caractéristiques de transport de l'activité des alvéoles vers la surface (plusieurs centaines de milliers d'années), sont des éléments à prendre en compte durant la première phase de vie du stockage car ils conditionnent les comportements hydrique, chimique et mécanique des différentes barrières de confinement sur le long terme.

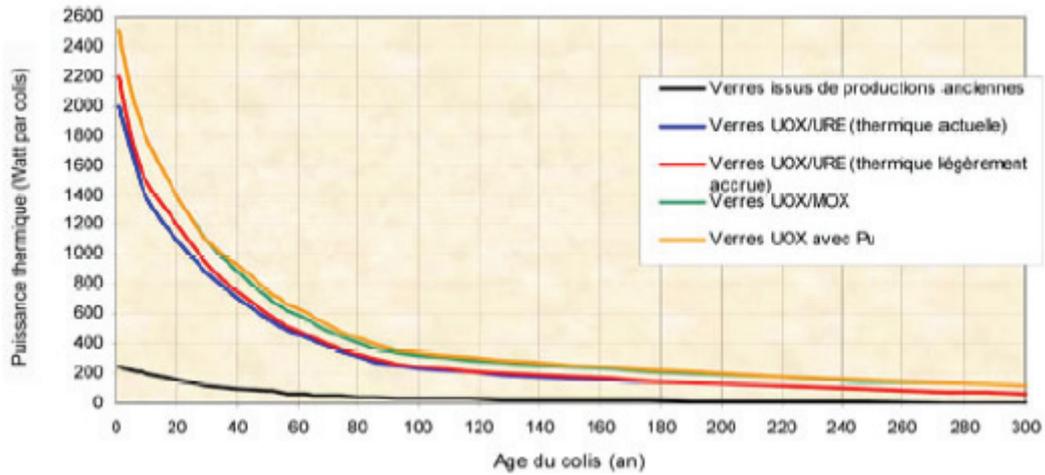


Figure 21 - Évolution de la charge thermique des colis vitrifiés [4].

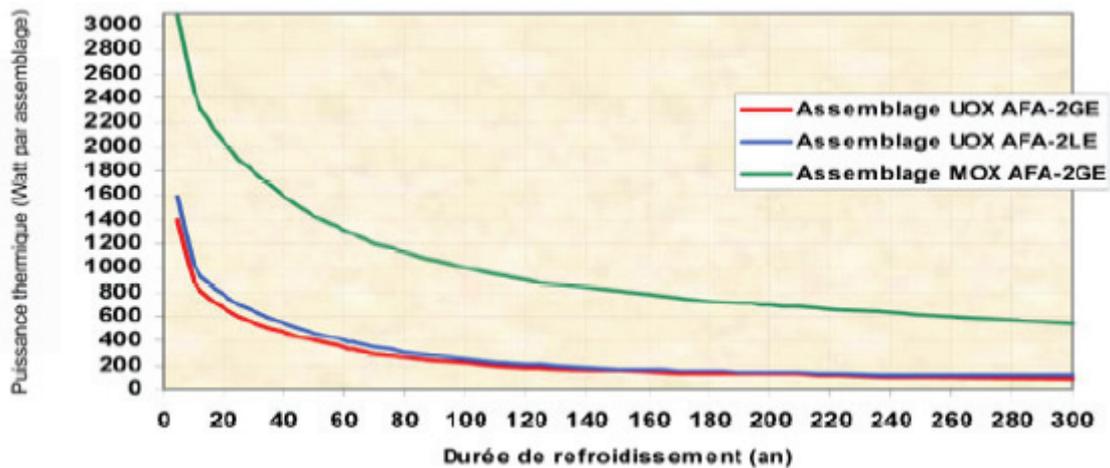


Figure 22 - Évolution de la charge thermique des combustibles usés [4].

Afin de rester dans des conditions d'environnement physico-chimique présentant aussi peu d'incertitudes que possible quant à l'état des connaissances actuel des phénomènes influencés par la thermique, l'ANDRA a retenu des dispositions de conception visant à respecter certains critères de température à ne pas dépasser aux interfaces colis/matériaux argileux (100°C), au contact du verre des déchets C et du combustible usé lors de l'arrivée d'eau (respectivement de 50°C et de 80°C) ainsi que dans les enrobés bitumeux et les matériaux cimentaires (respectivement de 30°C et de 80°C). Ces dispositions de conception s'appuient sur des variables de dimensionnement telles que la durée d'entreposage (60 ans au minimum pour les combustibles usés et les colis C1, C2, C3 et C4) et les densités d'alvéoles et de colis par alvéole. L'utilisation de surconteneurs de déchets vitrifiés et de conteneurs de combustibles usés vise à retarder l'arrivée d'eau au contact des matrices suffisamment longtemps (4 000 ans et 10 000 ans compte tenu des estimations de la décroissance du champ thermique sur le long terme) pour respecter les critères thermiques de température maximale admissible au cœur des colis lorsque leur lixiviation débutera. Cet ensemble de mesures vise à garantir le maintien des propriétés de confinement des composants.

Dans l'objectif de vérifier que les concepts retenus dans le Dossier 2005 Argile permettent de respecter les critères thermiques identifiés ci-dessus, l'ANDRA a réalisé des modélisations de l'évolution de la charge thermique à différentes échelles depuis l'environnement proche des alvéoles jusqu'en surface. Selon l'ANDRA, l'objectif de ces modélisations est en outre d'évaluer les transitoires de température en champ proche et en champ lointain pour estimer l'influence des élévations de température sur la mécanique des roches et les écoulements de fluides en particulier.

L'évolution dans le temps et dans l'espace des champs de température obtenue par l'ANDRA peut être synthétisée par les grandeurs caractéristiques suivantes (cf. Figure 23 notamment) :

- le paroxysme de température à l'interface colis/matériau argileux est atteint rapidement entre 10 et 20 ans après la mise en place des colis ;
- la température s'homogénéise autour de 45°C à 50°C au bout de 1 000 ans au sein des modules de déchets C, et de 3 000 ans pour les CU ;
- la température maximale est de 50°C à 55°C au niveau des galeries d'accès entre 50 ans (déchets C) et 200 ans (CU) ;
- la température s'homogénéise autour de 30°C à 35°C au bout de 1 000 ans au sein de la zone de déchets C, et de 10 000 ans pour les CU ;
- la température maximale atteinte au niveau des galeries de liaison entre 700 ans (déchets C) et 2 000 ans (CU) est de 30°C à 35°C ;
- à l'aplomb du stockage, les maximums de température sont de 35°C au toit du Callovo-Oxfordien à 1 000 ans (élévation de 16°C) et 45°C à 500 ans au mur du Callovo-Oxfordien (élévation de 22°C) ;
- à l'interface Oxfordien carbonaté/Kimméridgien, la température maximale est de 20°C (élévation de 5°C) ;
- le retour au champ géothermal initial a lieu à 50 000 ans pour la zone des déchets C et à 100 000 ans pour la zone des CU : les gradients thermiques passent par un maximum de quelques degrés par mètre dans le Callovo-Oxfordien peu après la mise en place des colis exothermiques pour revenir après une centaine d'années à quelques dixièmes de degrés par mètre (le gradient géothermal naturel est de l'ordre de 0,03°C/m) ;
- l'influence thermique entre les zones de stockage est faible car les distances (250 m) sont suffisantes pour atténuer le transfert de chaleur et la charge thermique affecte principalement la zone de stockage dans le Callovo-Oxfordien et peu les encaissants.

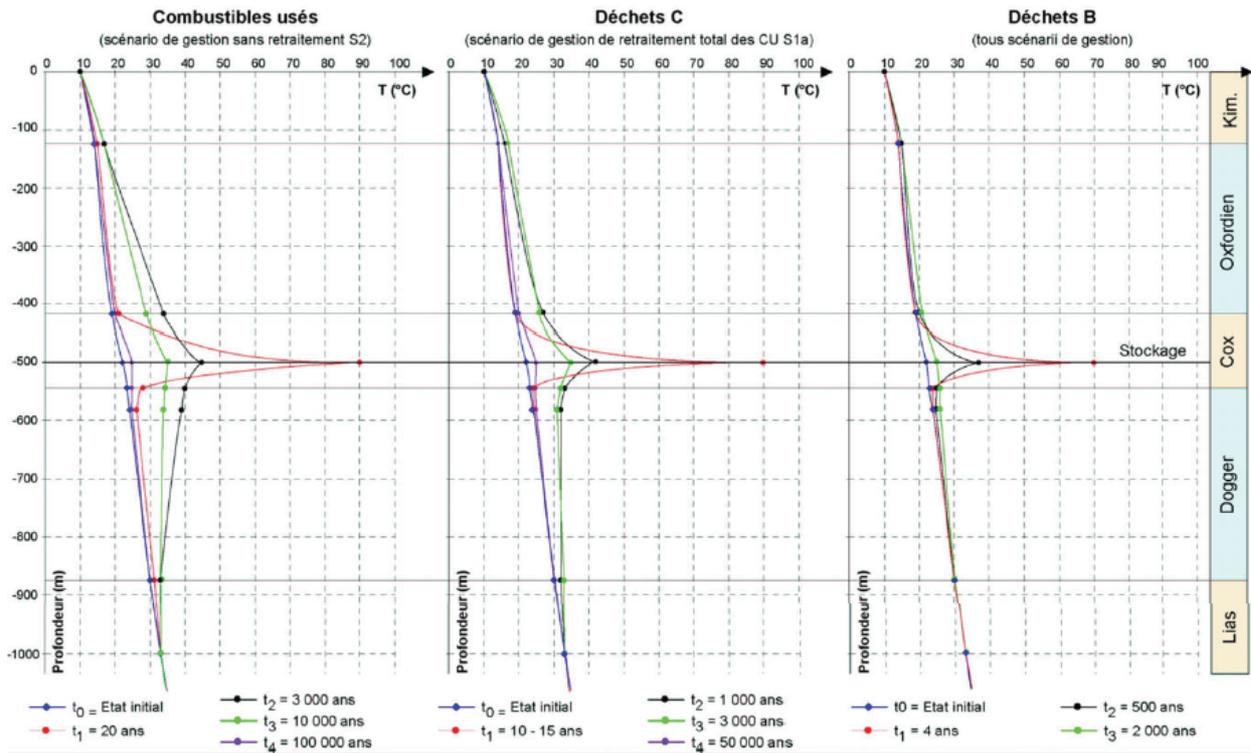


Figure 23 - Charge thermique des différentes zones de stockage [3].

L'IRSN considère que les critères thermiques retenus par l'ANDRA sont pertinents et que les puissances thermiques prises en compte pour modéliser l'évolution du champ thermique et les durées d'entreposage nécessaire sont raisonnablement représentatives de celles de la majorité des colis existants ou à produire. L'IRSN note par ailleurs que l'adaptation de la durée d'entreposage à la variabilité des propriétés thermiques des colis pour respecter la puissance thermique maximale acceptable en stockage ainsi que l'espacement entre colis dans les alvéoles de stockage (utilisation d'intercalaires) devrait permettre de maintenir dans l'installation des champs de températures en deçà des seuils fixés. L'IRSN constate que les durées d'entreposage des colis les plus exothermiques peuvent être longues (jusqu'à 90 ans pour les combustibles MOX) mais n'apparaissent pas incompatibles avec les durées d'exploitation et de réversibilité de l'installation de stockage envisagées à ce stade. Aussi, l'IRSN estime que les hypothèses et la stratégie retenues par l'ANDRA permettent un premier dimensionnement thermique adapté à l'objectif de montrer la faisabilité d'un stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien.

Les propriétés thermiques des différents composants présentent néanmoins un certain nombre d'incertitudes (conductivité thermique notamment). Celles-ci ont été prises en compte par l'ANDRA par le biais d'une minoration des critères thermiques de  $10^{\circ}\text{C}$ . Ces critères sont donc abaissés à  $90^{\circ}\text{C}$  et  $70^{\circ}\text{C}$  respectivement pour les matériaux argileux et cimentaires. Selon l'ANDRA, cette plage de  $10^{\circ}\text{C}$  permet de couvrir une variation de l'ordre de 10% de la conductivité thermique verticale de la formation du Callovo-Oxfordien, ce paramètre étant considéré comme l'un des plus sensibles. L'IRSN convient que parmi les différentes caractéristiques thermiques des composants d'un stockage, la conductivité thermique verticale de la formation hôte est la plus influente sur l'évolution du champ thermique autour des colis et qu'une marge de  $10^{\circ}\text{C}$  permettrait effectivement de tenir compte d'une variabilité de 10 % de ce paramètre sur toute la hauteur du Callovo-Oxfordien. Toutefois, l'IRSN s'interroge sur le caractère suffisant de cette marge qui paraît faible au regard des variations des valeurs de conductivité thermique verticale mesurées sur les échantillons des forages EST104, HTM102 et EST205 présentées sur la Figure 24 et la Figure 25. Selon ces valeurs, l'IRSN note qu'une variation de 10 % semble être un ordre de grandeur possible pour ce qui concerne la sous-zone 2 du Callovo-Oxfordien, mais qu'en revanche des variations de

l'ordre de 100 % ne peuvent être exclues pour la sous-zone 1. De plus, la dépendance des conductivités à la température engendre, en moyenne, une variation de quelques pourcents supplémentaires. Aussi, l'IRSN estime qu'en cas de poursuite d'un projet de stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien, il conviendra d'estimer plus précisément, pour l'ensemble de l'épaisseur de cette formation et pour l'emprise des zones de stockage des déchets exothermiques, les effets des variations de la conductivité thermique verticale sur l'évolution du champ thermique autour des colis. Sur la base des résultats obtenus et en tenant compte également de l'influence des incertitudes portant sur les paramètres thermiques des autres composants (intercalaires et jeux en particulier), il conviendra de vérifier que les marges retenues permettent effectivement de garantir le respect des critères thermiques visés.

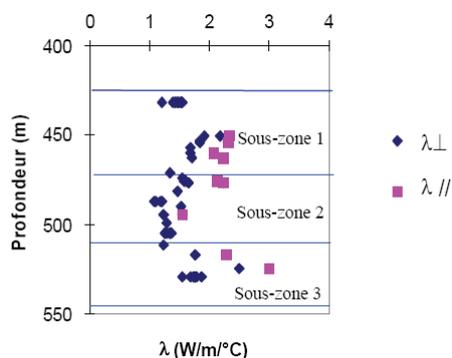


Figure 24 - Évolution verticale de la conductivité thermique des argilites du Callovo-Oxfordien mesurée sur les échantillons des forages EST104 et HTM102 [5].

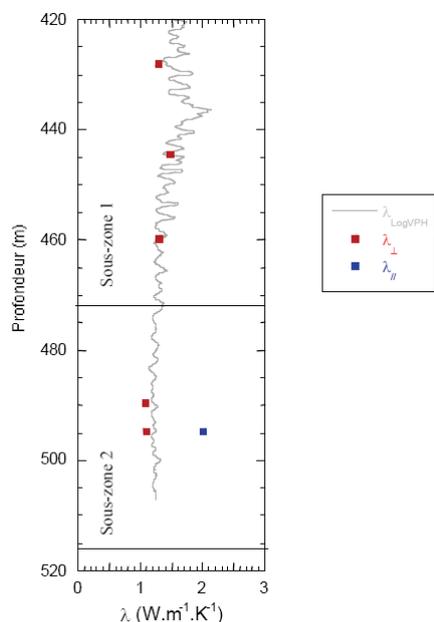


Figure 25 - Évolution verticale de la conductivité thermique des argilites du Callovo-Oxfordien mesurée sur les échantillons du forage EST205 [5].

Les gradients thermiques peuvent engendrer des effets de thermoconvection dus au mouvement d'eau lié à la différence de densité entre zones chaudes et froides. Ces effets ont été évalués par l'ANDRA en examinant l'influence possible des variations de densité verticale sur les transferts d'eau au droit des alvéoles de stockage. Sous cette hypothèse, la mise en mouvement de l'eau par effet gravitationnel dans le Callovo-Oxfordien et dans l'Oxfordien est un phénomène négligeable devant les transferts hydrauliques classiques. L'IRSN en convient mais estime toutefois qu'il existe également une variation de densité de l'eau horizontale entre les zones « froides » sur les côtés de l'installation de stockage et les zones « chaudes » au droit des modules. Cette variation de densité pourrait également générer un mouvement d'eau par effet gravitationnel. Il apparaît que ce phénomène n'est pas

de nature à créer des mouvements d'eau dans la formation du Callovo-Oxfordien du fait de sa très faible perméabilité. La question reste néanmoins posée pour les formations encaissantes de la formation hôte. L'IRSN a estimé ces effets pour l'aquifère de l'Oxfordien sur la base d'un modèle simplifié de deux colonnes d'eau chaude et froide l'une à côté de l'autre. Selon ce modèle, pour une température moyenne de 30°C dans l'Oxfordien calcaire, l'estimation des vitesses verticales induites par thermoconvection serait d'environ  $3 \cdot 10^{-6}$  m/an. Cet effet est en première approximation négligeable au regard des vitesses horizontales de  $3 \cdot 10^{-2}$  m/an liées au gradient hydraulique naturel dans l'Oxfordien. Il conviendrait toutefois que ce caractère négligeable soit confirmé ultérieurement, pour les formations encaissantes, en tenant compte de la variabilité possible des paramètres qui gouvernent ce phénomène.

Les effets du champ thermique sur les propriétés de transfert de radionucléides, en cas de relâchement précoce, ont été évalués par l'ANDRA et pris en compte dans les modélisations. Selon ces évaluations, il y a une augmentation possible des vitesses de transport des solutés sous l'effet d'un gradient de température (effet Soret) ainsi qu'une augmentation des coefficients de diffusion (facteur 5 au plus) et de perméabilité (facteur 3 au plus) dans le Callovo-Oxfordien. L'IRSN constate que l'ANDRA a pris en compte ces effets dans les évaluations de sûreté. De même, les incertitudes portant sur les conséquences possibles d'une défaillance précoce de surconteneurs de déchets C et de conteneurs de combustibles usés conduisant à un relâchement d'activité pour des températures ambiantes plus élevées que celles requises en scénario d'évolution normale, sont prises en compte dans les évaluations de sûreté par le biais de modifications de propriétés de transport des radionucléides dans l'EDZ et d'une augmentation des taux de dégradation des colis (cf. chapitre 7).

**En conclusion, le Dossier 2005 Argile présente des études globalement satisfaisantes sur l'évaluation des champs thermiques et en particulier sur la possibilité de définir des concepts cohérents avec les objectifs de températures maximales à ne pas dépasser pour certains composants. En particulier, l'adoption d'un (sur)conteneur est pertinente pour prévenir des relâchements d'activité dans des conditions de température pour lesquelles les phénomènes de transport sont mal maîtrisés. Les effets des champs thermiques ont été bien pris en compte pour l'estimation des vitesses de relâchement et de migration des radionucléides. L'IRSN estime néanmoins qu'il conviendra à l'avenir de vérifier que les marges retenues pour le dimensionnement du stockage aux charges thermiques permettent effectivement de respecter les critères thermiques visés, en tenant compte des incertitudes sur les propriétés thermiques des composants et en particulier sur la conductivité thermique de la formation hôte.**

## 5.2 TRANSITOIRES HYDRIQUES ET DEVENIR DES GAZ

La mise à la pression atmosphérique des argilites du Callovo-Oxfordien lors du creusement des galeries et alvéoles entraîne une désaturation des ouvrages. L'ANDRA a tenu compte de l'évolution du degré de saturation dans le temps des différents composants pour décrire le comportement du stockage et a également estimé l'influence de certains phénomènes, notamment les phénomènes thermiques et liés à la production de gaz, sur le processus de resaturation lui-même. Le couplage de ces différents phénomènes peut en particulier conduire à la mise en place d'un schéma hydraulique transitoire complexe entre les alvéoles de déchets, le réseau de galeries et la formation du Callovo-Oxfordien dont l'influence sur le transfert de radionucléides doit être évaluée. Ce schéma hydraulique peut en particulier être gouverné par les gradients de charges dus à des zones plus rapidement resaturées que d'autres dans le stockage, à la remise en équilibre hydrostatique ou bien encore à des modifications locales de pressions hydriques liées aux phénomènes transitoires thermiques et de création de gaz. L'ANDRA aborde chacun de ces points en mettant en évidence plusieurs états caractéristiques de l'évolution du stockage liés à la phase d'exploitation pendant laquelle les ouvrages sont ventilés et aux phases de production et de migration de gaz. En dehors de la ventilation et des propriétés hydrauliques des ouvrages et de la formation hôte, ce dernier phénomène est en effet celui qui pourrait influencer le plus l'évolution hydrique du stockage.

Selon les estimations réalisées par l'ANDRA, pour une durée d'exploitation séculaire, l'extension de la désaturation des ouvrages ventilés (notamment pour ce qui concerne les alvéoles de déchets B) se limite à la zone endommagée (la désaturation des soutènements en béton et de la zone fracturée peut atteindre 80 % mais seulement quelques pourcents au contact des argilites non perturbées mécaniquement). Pour les alvéoles de déchets C et de combustibles usés, la désaturation concerne essentiellement les matériaux importés tels que la bentonite des bouchons et le béton des massifs d'appuis (mis en place à des taux de saturation respectifs de 80 % et de 70 %).

Lorsque s'initie le processus de resaturation, des quantités importantes de gaz dues essentiellement, sur le long terme, à la corrosion des composants métalliques sont produites. Les quantités globales de gaz produites ainsi que les cinétiques de relâchement ont été évaluées par l'ANDRA sur la base du modèle d'inventaire de dimensionnement (MID) et des concepts de stockages retenus en 2002 [6]. Les études relatives à la prise en compte du devenir des gaz dans le stockage comprennent une partie expérimentale et une partie modélisation. Les données relatives aux propriétés qui contrôlent le transfert d'une phase gazeuse dans un milieu poreux (suction et perméabilités relatives au gaz et à l'eau) dont dispose aujourd'hui l'ANDRA sont issues d'expériences réalisées d'une part en laboratoire sur échantillons, d'autre part in situ en forage, sur les argilites à Opalinus (Mont Terri et Benken) et de Bure. Sur la base des interprétations croisées du test d'injection de gaz réalisé sur le site de Bure, des mesures de sorption/désorption effectuées sur échantillons et des lois théoriques de calcul de pression capillaire, l'ANDRA définit, dans l'objectif de modéliser l'évolution d'une phase gazeuse, une courbe de pression capillaire dans les argilites. Selon cette courbe, la pression capillaire pour un degré de désaturation de l'ordre de 3 % à 5 % correspondrait à une valeur de pression d'entrée du gaz de l'ordre de 4 à 5 MPa. L'ANDRA considère que ces valeurs sont représentatives d'un milieu argileux à large distribution de taille de pores tel que les argilites de Bure et présentant une forte affinité pour la rétention d'eau.

La modélisation retenue par l'ANDRA est basée sur un concept de transfert de fluides diphasique : le gaz produit ne peut être évacué en totalité par dissolution et diffusion en solution, les propriétés de diffusion faibles du milieu environnant les sources de gaz ne le permettant pas. Le schéma conceptuel de formation puis de migration de gaz retenu par l'ANDRA est basé sur l'enchaînement séquentiel de la corrosion des chemisages d'alvéoles puis de celle des conteneurs et des surconteneurs.

Les résultats des modélisations de l'ANDRA réalisées en supposant que les interfaces entre bouchon et argilites sont étanches donnent des ordres de grandeurs des surpressions maximales de gaz à l'intérieur des ouvrages : 6 à 7 MPa pour les déchets vitrifiés et autour de 9 MPa pour les combustibles usés pendant une période de temps comprise entre 2000 et 3000 ans. Pour les déchets B, la surpression est de l'ordre de 7 MPa et est atteinte autour de 500 ans. L'ANDRA précise dans le tome « *Évolution phénoménologique du stockage géologique* » que la pression de gaz dans les alvéoles « *augmente jusqu'à atteindre le seuil d'ouverture de la porosité (microfissuration) de l'argilite ou des composants ouvragés en argile gonflante (bouchons d'alvéoles ou scellements).* [...] *Dans tous les cas de figure (alvéoles B, C et CU), la pression de gaz dans les alvéoles demeure inférieure à la pression de fracturation de la roche (12 MPa)* ».

L'ANDRA en conclut que les conséquences hydrauliques de ces surpressions de gaz sont de deux ordres.

**En premier lieu**, l'écoulement du gaz ne peut s'opposer aux venues d'eau de la formation hôte vers les composants en bentonite ainsi que les argilites saines au voisinage de la zone fracturée compte tenu de leurs fortes propriétés de suction (resaturés à plus de 97 % en quelques dizaines d'années) : les processus de resaturation de ces matériaux ne sont donc pas perturbés par la production de gaz. Les scellements des puits d'accès se resaturent en environ 5 000 ans, ceux des galeries de liaison en quelques 10 000 ans, ceux des alvéoles de déchets B en environ 2 000 ans et les bouchons d'alvéoles en quelques dizaines d'années.

À l'échelle des alvéoles, les durées de resaturation varient de quelques centaines d'années pour les alvéoles de déchets C et combustibles usés jusqu'à plus de 100 000 ans pour les alvéoles de déchets B. En effet, la resaturation des matériaux plus poreux (désaturés jusqu'à 30 % pour ce qui concerne les colis et bétons de

structure, 80 % pour les soutènements) des alvéoles de déchets B ventilés et des galeries remblayées est plus largement influencée par les écoulements de gaz, qui contribuent à retarder le processus de resaturation.

Pour ce qui concerne la formation du Callovo-Oxfordien au-delà des zones influencées par les processus de désaturation/resaturation, la teneur en gaz reste très faible à environ 1 % et les propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien ne sont pas perturbées. De plus, compte tenu de cette faible teneur, les gaz migrant vers les encaissements se dissolvent dans les aquifères.

**En second lieu**, ces surpressions de gaz induisent également une surpression hydraulique au voisinage des ouvrages (de l'ordre de 1 à 3 MPa) engendrant un écoulement d'eau divergent des alvéoles vers les galeries et le Callovo-Oxfordien sur une période de l'ordre de 10 000 ans liée à la durée de production d'hydrogène.

Les incertitudes sur les ordres de grandeurs des durées du transitoire hydrique et de son amplitude ne sont à ce stade du projet pas quantifiées par l'ANDRA qui souligne toutefois dans le document [41] intitulé « *Le transitoire hydraulique d'un stockage : décharge, désaturation-resaturation, retour à un état d'équilibre hydraulique* », que des incertitudes persistent liées aux difficultés d'acquisition de certains paramètres importants tels que les perméabilités relatives de matériaux peu perméables.

Sur la base de l'estimation des processus de resaturation et de génération de gaz, l'ANDRA propose un schéma temporel synthétique des écoulements autour du stockage : dans un premier temps, les écoulements convergent vers les alvéoles durant quelques centaines d'années suite au processus de resaturation<sup>12</sup>. Dans un deuxième temps, s'instaure une phase d'écoulements divergents des alvéoles vers le Callovo-Oxfordien et les galeries durant la phase de surpression hydraulique<sup>13</sup> due à la génération des gaz (autour de 10 000 ans). Dans un troisième temps, les écoulements convergent de nouveau vers les alvéoles, au fur et à mesure de la dissipation de la surpression hydraulique, jusqu'à resaturation complète (autour de 200 000 ans). En dernier lieu, une fois le stockage resaturé, l'équilibre hydrostatique (estimé à environ 5 MPa à 500 m de profondeur) est atteint au bout de plusieurs dizaines de milliers d'années.

Le rapport DES n° 297 présenté lors de la réunion du groupe permanent « déchets » du 10 mars 1997 consacrée à l'examen de la Demande d'autorisation d'installation et d'exploitation d'un laboratoire souterrain dans le département de la Meuse soulignait l'influence possible de la production de gaz sur la sûreté des concepts. Sur la base de l'avis du GPD (lettre GPD 97/06 du 8 avril 1997), la DSIN avait demandé à l'ANDRA (lettre DSIN-FAR/SD1/n° 11970/97 du 10 décembre 1997) d'estimer les effets associés à la génération de gaz. Les études engagées par l'ANDRA n'ont été finalisées que récemment. **Un ensemble de données et d'études nouvelles visant à quantifier la production et le devenir des gaz dans le stockage est exposé dans le Dossier 2005 Argile**, l'IRSN estime que cet ensemble constitue une avancée notable dans l'appréciation des risques liés à la production de gaz.

**De manière générale**, l'IRSN considère que les quantités de gaz générées présentées dans le Tableau 10 et les hypothèses de modélisation retenues (vitesse de corrosion généralisée de 2 à 3 microns par an sur le long terme, géométrie et conditions aux limites des modèles) constituent a priori une base suffisante à ce stade pour estimer de manière conservatrice les effets des gaz produits. Les hypothèses précitées contribuent probablement à surestimer les surpressions de gaz calculées qui demeurent néanmoins inférieures au seuil de fracturation des argilites.

---

<sup>12</sup> Le champ thermique tend à réduire d'un facteur 5 les durées de resaturation.

<sup>13</sup> La perturbation hydrique liée à l'expansion thermique de l'eau autour des alvéoles de déchets exothermiques reste très localisée autour des alvéoles et limitée dans le temps (dissipation de la surpression hydraulique autour de 500 ans) ; cette perturbation a peu d'effet sur les cinétiques de resaturation.

	Masse de fer (kg)	Moles d'Hydrogène produites	Volume d'hydrogène (m <sup>3</sup> )*
<b>Alvéole C0</b>	50 000	1,2·10 <sup>6</sup>	600
<b>Alvéole C1, C2, C3 et C4</b>	28 000	0,6·10 <sup>6</sup>	330
<b>Alvéole de combustibles usés CU1</b>	260 000	6,3·10 <sup>6</sup>	3 100
<b>Alvéole de combustibles usés CU2</b>	110 000	2,6·10 <sup>6</sup>	1 300
<b>Alvéole B</b>	Variables en fonction du type de déchets B		
	de 20 000 à 90 000	de 2,5·10 <sup>6</sup> à 10 <sup>7</sup>	de 1 400 à 5 000

\* estimation des volumes en considérant une pression de 5 MPa et une température de 30°C

**Tableau 10 - Ordre de grandeur des masses de fer, des moles d'hydrogène produites et des volumes occupés pour un alvéole représentatif des différents types de déchets [3].**

Les processus hétérogènes dans le temps et dans l'espace de resaturation et de retour à l'équilibre hydrostatique (sur des durées de l'ordre de 200 000 ans) ainsi que l'existence de surpressions hydrauliques temporaires dues aux gaz sont des phénomènes susceptibles de créer des mouvements d'eau autour des alvéoles. L'IRSN estime que l'amplitude et l'influence des écoulements induits par les phénomènes précités sur le régime de transfert des radionucléides (part de la diffusion et de la convection) nécessite d'être évaluée. L'IRSN constate que l'ANDRA a partiellement abordé cette question en simulant l'influence d'une surpression hydraulique transitoire sur le transfert de radionucléides en supposant de manière pénalisante que :

- le relâchement de radioactivité a lieu pendant la période de surpression maximale d'eau,
- la migration des radionucléides a lieu en milieu totalement resaturé soumis à des gradients de pressions hydrauliques dus à la surpression de gaz.

Selon cette évaluation, le transfert de radionucléides par les galeries et le puits est plus important qu'en l'absence de surpression hydraulique (un ordre de grandeur supérieur environ) mais la diffusion des radionucléides au travers du Callovo-Oxfordien reste le mode de transfert dominant (plus de cinq ordres de grandeur par rapport au transfert par les ouvrages).

L'IRSN considère que l'étude effectuée par l'ANDRA permet d'estimer de manière enveloppe l'effet du transitoire hydraulique lié aux surpressions de gaz sur le transfert de radionucléides dans les ouvrages. Au vu de ces résultats, l'IRSN estime, comme l'ANDRA, que les flux d'activité relâchés hors du stockage dans les encaissants peuvent être appréciés sans tenir compte explicitement des phénomènes de surpression dus aux gaz (et très probablement de l'ensemble des phénomènes hydrauliques transitoires) compte tenu de la prédominance des mécanismes de diffusion à l'échelle de la formation géologique. Néanmoins il n'est pas certain que ces mêmes phénomènes puissent être négligés au regard des hypothèses qui seront à retenir pour dimensionner les composants du stockage (à titre d'exemple, les flux d'eau dans les ouvrages sont un élément important pour estimer les interactions chimiques entre composants).

Par ailleurs, l'IRSN considère également que l'étude précitée permet de couvrir les incertitudes relatives à l'influence du schéma conceptuel de génération de gaz retenu par l'ANDRA (caractère séquentiel des phénomènes de corrosion des chemisages puis des colis et enfin migration des radionucléides). En effet, l'IRSN n'exclut pas que des colis soient corrodés à la suite d'entrées d'eau partielles dans l'alvéole et que des relâchements ponctuels de radionucléides puissent avoir lieu en même temps que la formation de la phase gazeuse. En revanche, il est difficile d'apprécier si le scénario étudié permet de couvrir de manière enveloppe l'influence, sur la migration des radionucléides et les flux d'eau, des processus hétérogènes de resaturation et de retour à l'équilibre hydrostatique. L'IRSN constate en effet que les gradients de pression résultant de la perturbation hydraulique

initiale seraient du même ordre de grandeur voire supérieurs aux surpressions dues aux gaz prises en compte dans le scénario précité et subsisteront durant une période pendant laquelle les relâchements de radionucléides sont probables.

Il conviendra à l'avenir de compléter les études sur ces points en vue de clarifier dans quelle mesure ces phénomènes doivent, ou non, être pris en compte explicitement dans la conception et l'évaluation de sûreté à long terme du stockage.

Enfin, l'IRSN s'est interrogé sur les possibilités d'ouverture d'une interface bouchon/roche sous l'effet des pressions de gaz attendues en stockage. L'IRSN souligne en effet qu'un tel phénomène a été observé lors de l'expérience RESEAL réalisée au laboratoire souterrain de Mol en Belgique lorsque la pression de gaz atteint la pression de gonflement de la bentonite. L'ANDRA, dans le tome « *Architecture et gestion du stockage géologique* » [2], indique que cette pression vaut initialement 3 MPa à 4 MPa selon les ouvrages, qu'elle pourrait ensuite passer par un minimum de 1 MPa suite aux divers mouvements de tassement consécutifs à la dégradation des massifs d'appui pour finalement tendre asymptotiquement vers la valeur de la contrainte lithostatique. L'ANDRA confirme dans sa lettre ANDRA/DIR/DSQE/05-193 du 12 septembre 2005 que l'interface bouchon/roche s'ouvre lorsque la pression de gaz atteint la pression de gonflement de la bentonite mais précise que les pressions de gonflement indiquées sont des contraintes effectives auxquelles il faut ajouter la pression interstitielle de l'eau (5 MPa). L'IRSN en convient mais souligne cependant qu'une pression interstitielle de 5 MPa suppose que l'ouvrage considéré ait eu le temps de se resaturer et d'atteindre un équilibre hydraulique. Dans le cas des alvéoles de déchets B, l'IRSN constate que le temps nécessaire au ré-équilibre hydraulique du bouchon dépassera, a priori, les 500 ans au bout desquels la pression maximale de gaz (7 MPa) est atteinte et estime donc qu'il est possible que les interfaces s'ouvrent durant cette période transitoire. L'IRSN s'interroge par conséquent sur les possibilités de transfert d'activité depuis les alvéoles vers les galeries par ces interfaces. À cet égard, la lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-193 précitée précise que « *d'un point de vue phénoménologique, [l'ouverture d'une interface sous l'action du gaz] ne correspond pas à un déplacement significatif d'eau. En effet, cette ouverture correspond à une disjonction des feuillets d'argile. Elle est totalement remplie de gaz et ne constitue donc pas un chemin de transfert hydraulique pendant qu'elle est active lors du transfert du gaz. Lorsque la pression de gaz diminue, et a fortiori s'annule, l'ouverture créée se referme et se cicatrise d'un point de vue hydraulique. Par conséquent, en SEN [scénario d'évolution normale], il n'a pas été tenu compte d'effet mécanique du gaz sur l'interface* ». L'IRSN considère que les mécanismes décrits par l'ANDRA sont plausibles mais restent néanmoins à confirmer par l'expérience. À cet égard, l'IRSN signale que l'évaluation de la faisabilité d'ouvrages de scellement, examinée au chapitre 7.1.3 du présent rapport, conduit à recommander qu'une expérience de scellement in situ soit réalisée dans le laboratoire souterrain de Bure afin de confirmer les différents éléments rassemblés par l'ANDRA à ce jour. **L'IRSN estime que l'étude des effets des gaz sur un ouvrage de scellement pourrait être incluse dans une telle expérience à définir.** Les résultats d'une telle expérience devraient permettre d'évaluer la pertinence de retenir ou non, dans le cas d'une évolution normale du stockage, la possibilité de transfert d'eau contaminée lors de l'ouverture des interfaces de scellement/roche hôte sous l'effet des surpressions de gaz.

En conclusion, l'IRSN estime que la première évaluation de l'ANDRA des effets de la génération de gaz dans le stockage et des transitoires hydrauliques est satisfaisante. Les estimations réalisées ne soulèvent pas selon l'IRSN de questions de sûreté nécessitant une réorientation des concepts au stade actuel des connaissances.

Toutefois, le transfert des gaz est un phénomène physique complexe, sensible à des propriétés difficiles à quantifier avec précision dans les milieux à forte capacité de succion tels que la bentonite et les argilites. Certains paramètres, en particulier les perméabilités relatives à l'eau et au gaz, nécessiteront d'être confirmés par des données complémentaires caractéristiques de la formation du Callovo-Oxfordien. L'IRSN considère par ailleurs qu'une expérience en laboratoire souterrain mériterait d'être conduite afin de confirmer les résultats des modélisations de transfert multiphasique in situ et les effets des gaz sur les scellements.

## 5.3 PERTURBATIONS MÉCANIQUES

### 5.3.1 DÉFINITIONS

Un massif rocheux est le siège de contraintes naturelles qui augmentent avec la profondeur. Le creusement d'un ouvrage souterrain modifie le champ de contraintes initial et provoque un déconfinement mécanique de la roche autour de l'excavation qui, selon les propriétés mécaniques de la roche, peut provoquer l'apparition d'une « zone endommagée », également appelée « EDZ » (Excavation Damaged Zone). Le référentiel du site [5] définit précisément les termes suivants :

**Zone fracturée** : elle se produit autour d'un ouvrage souterrain lorsque le seuil de rupture, qui correspond au déviateur maximal à la rupture, est dépassé. La perturbation se présente sous forme de fractures de taille métrique qui peuvent se connecter et augmenter la perméabilité de la roche.

**Zone microfissurée** : elle se produit, soit au voisinage de l'ouvrage (si la zone fracturée n'est pas formée), soit derrière la zone fracturée, lorsque le seuil de déformation irréversible est atteint. La perturbation se présente sous forme de microfissuration diffuse peu connectée. Cette faible connectivité limite l'augmentation de la perméabilité.

L'IRSN note qu'avec ces définitions, la « zone fracturée » n'est pas incluse dans la « zone microfissurée » et appellera dans la suite de ce rapport « zone endommagée » ou « EDZ » la zone microfissurée et/ou fracturée. L'IRSN appellera « extension » ou « profondeur » d'une zone endommagée sa dimension mesurée entre deux rayons  $R(EDZ) - R(\text{ouvrage})$  et l'exprimera souvent en fonction du rayon de l'ouvrage « R ». Enfin, la zone endommagée qui apparaît instantanément autour des ouvrages du fait de leur excavation sera qualifiée d'« initiale » dans la mesure où son extension peut ensuite évoluer.

### 5.3.2 EDZ INITIALE

Le tome « *Évolution phénoménologique du stockage géologique* » [3] indique que les évaluations de « l'EDZ initiale autour des ouvrages de stockage reposent aujourd'hui essentiellement sur des modélisations numériques » ainsi que sur quelques mesures réalisées au niveau des marnes du Kimméridgien et de l'unité géomécanique A du Callovo-Oxfordien lors du creusement du puits principal. L'ANDRA précise que ces évaluations ont été réalisées avec un modèle élasto-plastique endommageable et des hypothèses sensées majorer l'extension de l'EDZ initiale, notamment : des propriétés mécaniques minimales déterminées pour chacune des unités géomécaniques sur des échantillons d'argilites saturés, l'hypothèse d'une absence complète de soutènement et donc d'un déconfinement total de la roche et une anisotropie des contraintes horizontales de 1,4 sensiblement plus marquée que celle évaluée sur le site du laboratoire. Les résultats ainsi obtenus sont présentés dans le Tableau 11 ci-après.

Zone géomécanique	Profondeur de référence (stockage à 500 m)		Profondeur maximale sur la zone de transposition (stockage à 630 m)	
	Ouvrages orientés parallèlement à $\sigma_H$ (N 155°) (alvéoles de stockage, zones de scellement)	Ouvrages orientés : - parallèlement à $\sigma_h$ (N 65°) (galeries) - verticaux (puits)	Ouvrages orientés parallèlement à $\sigma_H$ (N 155°) (alvéoles de stockage, zones de scellement)	Ouvrages orientés : - parallèlement à $\sigma_h$ (N 65°) (galeries) - verticaux (puits)
Zone A Exemple de la niche expérimentale du laboratoire de recherche Epaisseur $\approx$ 40 m	0,1 R 	0 à 0,3 R 	0,3 R 	0,2 à 0,7 R 
Zone B Epaisseur $\approx$ 15 m	0,3 R 	0,1 à 0,5 R 0 à 0,1 R 	0,5 R 	0,3 à 1,0 R 0 à 0,2 R 
Zone C Zone d'implantation d'un stockage Epaisseur $\approx$ 40 m	0,5 R 	0,3 à 0,7 R 0 à 0,1 R 	0,7 R 0,1 R 	0,5 à 1,2 R 0 à 0,3 R 

Zone fracturée    Zone microfissurée    Argilites saines     $\sigma_H$  : contrainte horizontale majeure  
 $\sigma_h$  : contrainte horizontale mineure

Tableau 11 - Extensions de l'EDZ initiale [3].

La forme circulaire ou elliptique des zones endommagées selon l'orientation des ouvrages s'explique par des considérations géomécaniques relativement simples : pour une galerie orientée dans la direction de la contrainte naturelle majeure  $\sigma_H$  (i.e. N 155° E), le rapport d'anisotropie de contraintes naturelles mobilisé lors de l'excavation est  $\sigma_h/\sigma_v$  qui est proche de 1 et la zone endommagée se développe de façon quasiment uniforme autour de la galerie ; pour les autres ouvrages (galerie parallèle à  $\sigma_h$  ou puits), le rapport d'anisotropie mobilisé ( $\sigma_H/\sigma_v$  ou  $\sigma_H/\sigma_h$ ) est supérieur à 1 et la section droite de l'ouvrage s'ovalise, ainsi que la forme de la zone endommagée.

Le référentiel du site [5] indique que les observations réalisées autour de la niche d'expérimentation du laboratoire souterrain dans l'unité géomécanique A du Callovo-Oxfordien confirment l'absence de zone fracturée et la présence d'une zone microfissurée de profondeur limitée comprise, selon les méthodes de mesures, entre 0,2 R et 0,25 R. L'IRSN considère que compte tenu de l'orientation oblique de cette niche par rapport aux contraintes naturelles, ces résultats sont dans la partie haute des prévisions mais restent conformes en ordre de grandeur. Pour ce qui concerne les unités géomécaniques B et C, la lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0193 du 12 septembre 2005 indique que l'analyse des résultats obtenus est en cours.

Lors de la réunion technique du 24 octobre 2005, l'ANDRA a indiqué (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0227 du 26 octobre 2005) que des déformations plastiques apparaissaient à partir de la section de mesures renforcées SMGR-2 située dans l'unité géomécanique B à 467,50 m de profondeur. La lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0235 du 23 novembre 2005 faisant suite à la réunion préparatoire du 8 novembre 2005 précise les observations réalisées en laboratoire souterrain. L'ANDRA indique que des effets accompagnant l'avancement du creusement peuvent également se produire et que « dans ce cas, des fractures de cisaillement obliques par rapport à l'axe de la galerie peuvent apparaître en avant du front de creusement » et se superposer à la zone endommagée induite par le seul déconfinement. « Étant recoupées par la galerie au fur et à mesure de son avancement, il n'en persiste en paroi que les extrémités, formant un réseau en « chevrons » (figure ci-dessous) [Figure 26] dont l'extension est proche de celle de la zone microfissurée ».

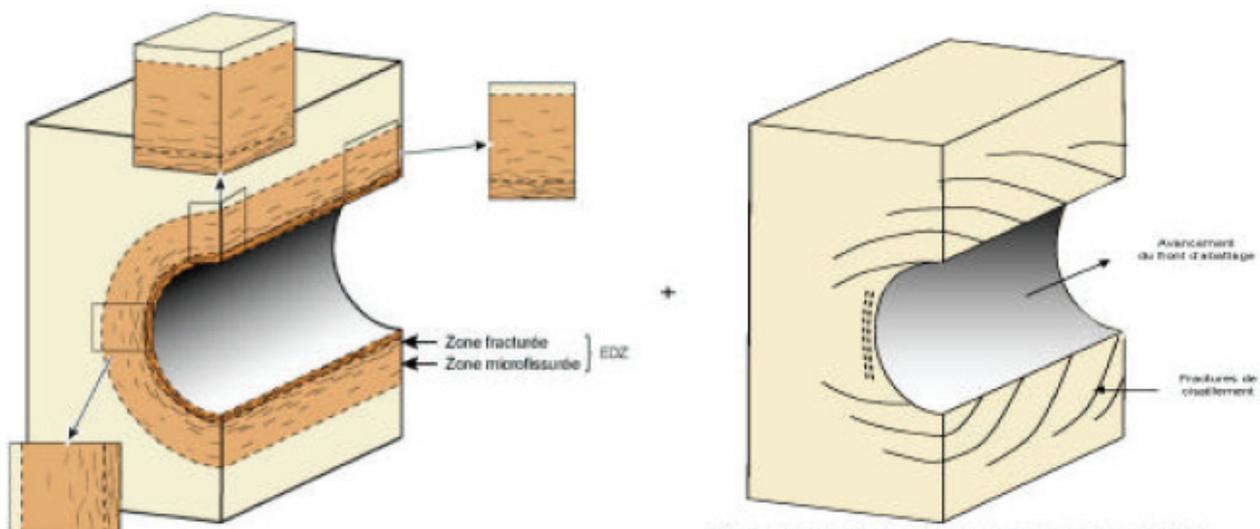


Schéma conceptuel « classique » de l'EDZ lié au déconfinement de la paroi

Schéma conceptuel des fractures de cisaillement observées dans le laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne

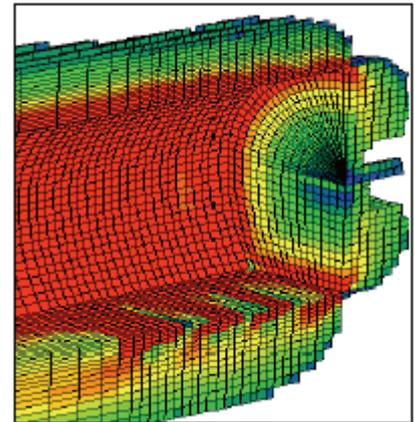
Figure 26 - Schéma conceptuel de la zone endommagée (Lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0235).

L'IRSN rappelle qu'une fracturation en « chevrons » a effectivement été observée au laboratoire souterrain de Mol en Belgique [188]. L'ANDRA ajoute qu'« au niveau -490 m (niveau le plus argileux), les observations et mesures faites lors du creusement des galeries expérimentales ont pu être comparées avec les résultats des modélisations, en tenant compte de la différence de forme des galeries (section en fer à cheval) et des perturbations en paroi dues à l'utilisation du brise roche hydraulique :

- des fractures de cisaillement sont observées en avant du front de creusement qui se développent jusqu'à une distance maximale de 2,5 m de la paroi. La formation de ces fractures est bien reproduite par des simulations numériques 3D du creusement des galeries prenant en compte le front de creusement et son avancement. La perméabilité à l'eau de ces fractures en cisaillement est inférieure à  $10^{-12}$  m/s au-delà de 0,2 à 0,5 fois le rayon de la galerie. Près de la paroi elle est comprise entre  $10^{-8}$  m/s et  $10^{-11}$  m/s;
- dans la zone fracturée par déconfinement, les valeurs de perméabilité mesurées sont inférieures à  $10^{-8}$  m/s, certaines étant proches de  $10^{-10}$  m/s. Ces mesures s'accordent avec la valeur de perméabilité estimée pour les argilites fracturées ( $5 \cdot 10^{-9}$  m/s). Rapportée au rayon, l'extension maximale de la zone fracturée autour des galeries du laboratoire est d'environ 0,2 fois leur rayon, soit du même ordre de grandeur, que celle donnée par les simulations 2D (0,1 rayon) ;
- au-delà de la zone fracturée, les mesures de perméabilité à l'eau réalisées montrent des valeurs inférieures à  $10^{-12}$  m/s, soit inférieures à celles attribuées aux argilites microfissurées. Elles indiquent donc une microfissuration limitée ou nulle, ainsi qu'une perméabilité très faible de fractures de cisaillement éventuellement recoupées. Cela est cohérent avec le fait que les contraintes mécaniques élevées appliquées sur les fractures de cisaillement limitent fortement l'augmentation de la perméabilité ».



Trace des fractures de cisaillement en paroi de galerie.



Modélisation 3D des fractures de cisaillement laissées en paroi de galerie.

**Figure 27 - Fracturation en « chevrons » observée à -490 m et modélisation (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-235).**

L'ANDRA poursuit et indique que « *les conditions d'apparition des fractures en cisaillement et leur géométrie semblent dépendre des conditions de creusement (vitesse et régularité du creusement et de la pose du soutènement des parois, soutènement du front de creusement). La disposition des premières galeries expérimentales au niveau -490 m a permis également de mettre en évidence les interactions mécaniques entre ouvrages en fonction de leur espacement* ».

L'IRSN constate que les premiers résultats acquis à 490 m de profondeur dans le laboratoire souterrain de Bure montrent qu'une fracturation supplémentaire dite « en chevrons » se superpose aux zones fracturée et microfissurée initialement prévues par les modélisations 2D. La compréhension du comportement mécanique de la roche doit donc être encore améliorée. L'ANDRA explique cette fracturation « en chevrons » par un mécanisme 3D prenant effet lors du passage du front de taille. L'IRSN signale que cette possibilité est également évoquée dans [185] et [187] et souligne que l'ANDRA indique une possible relation entre l'apparition de ces chevrons et la « *vitesse et régularité du creusement* » ce qui est également mentionné dans [185]. L'IRSN estime donc que cette explication est possible mais nécessite des investigations supplémentaires. L'IRSN constate que cette fracturation « en chevrons » n'affecte pas la perméabilité de la zone microfissurée dont l'extension est, par ailleurs, de l'ordre de grandeur attendu. L'IRSN constate qu'elle affecte peu la perméabilité de la zone fracturée mais que l'extension de celle-ci s'avère plus grande (0,2 R à 0,5 R) que prévue (0 à 0,1 R à 490 m de profondeur selon l'orientation des ouvrages d'après le Tableau 11). Néanmoins, l'IRSN estime que cette extension ne remet pas en question les possibilités de scellement des ouvrages, l'ANDRA proposant une solution technique dite « des coupures hydrauliques » analysée au chapitre 7.1.3 du présent rapport permettant a priori d'interrompre une zone de perméabilité accrue pouvant atteindre un rayon d'ouvrage. De plus, l'IRSN estime que l'utilisation de techniques de creusement plus adaptées pour la construction d'un éventuel stockage que celles utilisées lors de la construction du laboratoire souterrain pourrait encore diminuer l'extension de la zone endommagée en limitant le taux de déconfinement. Lors de la réunion préparatoire du 8 novembre 2005, l'ANDRA a indiqué que cette recherche de techniques était envisagée en laboratoire souterrain au-delà de 2005.

En conclusion, l'IRSN observe que les premiers résultats obtenus en laboratoire souterrain confirment les ordres de grandeur attendus pour la perméabilité de la zone endommagée mais que l'extension de la zone fracturée est plus élevée, ce qui montre que la compréhension du comportement mécanique de la roche doit encore être améliorée. Toutefois, l'IRSN note que l'extension de la zone fracturée reste compatible avec les options de scellement envisagées par l'ANDRA. L'IRSN souligne la dépendance de l'extension de la zone endommagée à la technique de creusement utilisée et estime que des techniques de creusement plus

adaptées pourraient conduire à des zones endommagées d'extension encore plus limitée. Lors de la réunion préparatoire du 8 novembre 2005, l'ANDRA a indiqué que cette recherche de techniques était envisagée en laboratoire souterrain au-delà de 2005.

### 5.3.3 EFFETS DU CHARGEMENT THERMO-MÉCANIQUE

La note [49] intitulée « Effets d'un stockage sur le comportement mécanique à grande échelle de la couche du Callovo-Oxfordien et des formations géologiques encaissantes » indique que des modélisations thermo-mécaniques réalisées pour les zones de stockage de combustibles usés (qui représentent 3/4 de la superficie d'un stockage dans le scénario S2) montrent « l'apparition de contraintes thermiques significatives en champ proche et dans une moindre mesure en champ lointain ». La Figure 28 ci-après montre que globalement, 4 zones peuvent être identifiées :

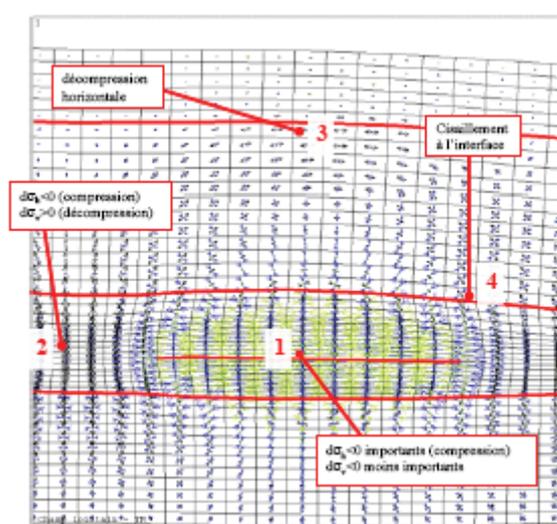


Figure 28 - Contraintes thermo-mécaniques<sup>14</sup> superposées sur une déformée amplifiée 1000 fois [49].

1. au centre d'un module, la compression horizontale augmente de 2 MPa à 3 MPa en 100 à 200 ans ;
2. entre deux modules, la compression verticale diminue « d'environ 1 MPa à environ 100 ans en raison de la dilatation thermique verticale au sein des modules de stockage » ;
3. en partie supérieure de l'Oxfordien calcaire, une flexion apparaît sous l'effet de la dilatation thermique des argilites sous-jacentes et provoque une diminution de la contrainte de compression ;
4. à l'interface Oxfordien/Callovo-Oxfordien, des dilatations thermiques différentielles induisent des cisaillements, notamment en bordure des modules, d'intensité cependant inférieure à 1 MPa.

L'ANDRA précise que « la contrainte totale dans ces zones (contrainte initiale + contrainte thermique) reste en dessous des critères de rupture et de micro-fissuration pour les différentes couches géologiques concernées. L'impact mécanique (fissuration et fracturation) du chargement thermique sur les massifs en champ lointain est donc négligeable ». L'ANDRA précise également que « la dilatation thermique des formations géologiques [...] a pour effet un soulèvement de la surface du sol » qui atteint au maximum « 10 cm environ à 1 000 ans pour la zone CU1. Il est moindre dans la zone des déchets B parce que l'élévation de la température est nettement plus faible. À long terme, au fur et à mesure du retour de la température vers l'état initial, le soulèvement de la surface

<sup>14</sup> Modèle numérique 2D d'un module de stockage CU1, tractions positives,  $\sigma_3$  noir >  $\sigma_2$  bleu >  $\sigma_1$  vert.

diminue progressivement. Étant donné que le soulèvement de la surface s'étend de manière relativement homogène sur une surface de plusieurs km<sup>2</sup>, il n'a pas d'impact sur la stabilité mécanique des ouvrages et des constructions en surface du sol ». L'IRSN estime que ces résultats sont, qualitativement, relativement classiques. L'augmentation de la compression horizontale au centre d'un module devrait y induire une ovalisation des ouvrages sur laquelle l'IRSN attirait l'attention dans le rapport DSU n° 21 présenté lors de la réunion du groupe permanent « déchets » consacré au comportement mécanique d'une installation de stockage sur le site de Bure du 2 mars 2004. Quantitativement, l'IRSN estime que le faible impact mécanique du chargement thermique s'explique aussi par la limitation à moins de 100°C des températures maximales appliquées sur les argilites.

Pour ce qui concerne le champ proche, la note [49] indique que dans le cas des argilites du Callovo-Oxfordien, « le rapport de la diffusivité hydraulique sur la diffusivité thermique » est compris entre 0,3 et 0,03 et qu'un échauffement devrait donc induire une surpression hydraulique. Sa valeur « dépend proportionnellement de la valeur du coefficient de dilatation thermique différentielle ( $\alpha_m$ ) » qui est « un paramètre difficilement accessible par les mesures directes en laboratoire sur échantillons » et sur lequel subsistent donc des incertitudes. Sur la base de simulations numériques, le document [46] intitulé « Le comportement mécanique d'alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés dans le temps » estime qu'une surpression hydraulique est induite dans une zone de 10 m à 15 m d'extension autour de l'alvéole et ne dépasse pas 4 MPa, ce qui fait que la pression maximale de pore « reste inférieure à la pression de fracturation des argilites. Ces résultats sont corroborés avec ceux obtenus in situ dans le cadre de l'expérimentation thermique HE-D du Mont-Terri ». Par ailleurs, l'ANDRA indique que « sous l'effet de l'élévation de la température, les alvéoles voisines interagissent entre elles rendant les perturbations légèrement anisotropes. [...] Autour de l'alvéole, une petite zone fracturée de 0,1 R d'extension se forme et la zone microfissurée induite par le creusement s'accroît pour atteindre une extension de 0,6 à 1 R. Au droit du bouchon, où l'élévation de la température est moins importante, la zone microfissurée évolue de façon moindre sans apparition de zone fracturée ». L'IRSN estime que ces résultats sont cohérents avec les éléments décrits précédemment, notamment l'apparition d'une interaction thermo-mécanique entre alvéoles. Cependant, l'IRSN constate que les résultats présentés par l'ANDRA sont principalement issus de la modélisation du comportement thermo-hydro-mécanique des argilites sur lequel subsistent de nombreuses incertitudes, même si l'ANDRA bénéficie d'un certain retour d'expérience du Mont-Terri. Néanmoins, l'IRSN constate que les concepts actuels de l'ANDRA ont évolué par rapport aux « options initiales de conception » (OIC, 1998 [87]) et limitent la température maximale appliquée sur les argilites à moins de 100°C, ce qui va dans le sens d'une diminution des effets thermo-mécaniques. Par ailleurs, l'IRSN rappelle que la caractérisation in situ des propriétés thermiques des argilites saines et endommagées d'une part, et la détermination des paramètres du couplage thermo-hydro-mécanique (tel que le coefficient de dilatation thermique différentielle  $\alpha_m$ ) d'autre part, doivent faire l'objet d'une expérimentation in situ appelée TER prévue après 2005 dans le laboratoire souterrain. Pour ce qui concerne l'effet du chargement thermo-mécanique sur l'extension de la zone endommagée autour des alvéoles de stockage de déchets exothermiques, l'IRSN note qu'en partie utile de l'alvéole, la zone endommagée s'ovalise et que son extension dans la direction où celle-ci est maximale atteint près du double de l'extension initiale. Les effets s'amortissent cependant rapidement et sont déjà moindres au droit d'un bouchon de scellement où l'élévation de la température est moins élevée.

En conclusion, l'IRSN estime comme l'ANDRA que l'effet mécanique du chargement thermique pourrait se limiter au champ proche des zones de stockage de déchets exothermiques mais que des éléments expérimentaux complémentaires sont nécessaires pour le confirmer. Ces éléments devraient être acquis dans le cadre de l'expérience TER prévue dans le laboratoire souterrain après 2005.

### 5.3.4 COMPORTEMENT VISCO-PLASTIQUE DE LA ZONE ENDOMMAGÉE

En dehors des aspects liés au chargement thermique, le référentiel du site [5] indique que « *des modélisations simplifiées du creusement d'une galerie au niveau principal du laboratoire ont été réalisées* » pour différentes hypothèses d'orientation des galeries par rapport aux contraintes naturelles et montrent « *qu'après l'excavation, le comportement viscoplastique (différé) des argilites induit, en conditions parfaitement isotropes, une régression de la zone plastique, c'est-à-dire une recompression de la roche, que le tunnel soit revêtu ou non. Toutefois, les déformations plastiques générées dans la zone plastique au moment de l'excavation ne disparaissent pas. Par conséquent, l'extension des zones en rupture et endommagée est celle obtenue au moment de l'excavation. C'est la raison pour laquelle les modélisations purement mécaniques du creusement de la galerie ne simulent que l'excavation de la galerie* ». L'IRSN reconnaît que ce mécanisme de « relaxation » des contraintes est tout à fait possible et admet qu'il est probablement prépondérant à long terme. Cependant, à plus court terme et de façon transitoire, l'IRSN estime que si la sollicitation mécanique de la paroi se maintient suffisamment longtemps à une valeur élevée par rapport à la résistance mécanique de la roche, par exemple du fait d'une relaxation des contraintes trop lente ou de la superposition d'une autre sollicitation comme la désaturation, un mécanisme de « rupture différée » contribuant à augmenter l'étendue de la zone endommagée est également possible. L'IRSN considère que cette possibilité est encore plus probable pour un ouvrage peu soutenu. L'existence de ces deux mécanismes en compétition est mentionnée dans la littérature [187] : « *Il est très fréquent d'observer dans les ouvrages déjà existants des déformations différées (convergence des parois), qui peuvent parfois aller jusqu'à provoquer une rupture différée. Ces déformations différées peuvent être la conséquence de phénomènes transitoires qui durent depuis la construction de l'ouvrage (diffusion des pressions interstitielles, diffusion des températures, réactions chimiques, etc...), mais généralement elles sont liées à une propriété caractéristique des roches : la viscosité. [...] Comment ces déformations différées influencent l'état d'équilibre après le déchargement mécanique ? [...] On peut distinguer deux tendances opposées : [...premièrement,] les déviateurs dans le massif diminuent avec le temps par effet de relaxation des contraintes, ce phénomène va donc dans le sens de la stabilité vis-à-vis d'un critère de rupture instantanée ; [...deuxièmement,] la résistance à la rupture a tendance à diminuer lorsque la sollicitation se prolonge, ce qui s'oppose à l'effet précédent. Ce phénomène de rupture différée a été souvent observé sur des ouvrages réels, mais il est difficile à caractériser expérimentalement au laboratoire.[...] Il y aura donc une compétition entre ces deux effets* ». La diminution de la résistance à la rupture lorsque la sollicitation du matériau se prolonge évoquée ci-dessus est actuellement étudiée par l'IRSN pour expliquer la zone endommagée observable autour du tunnel de Tournemire.

La lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0193 du 12 septembre 2005 précise que la loi de comportement visco-plastique utilisée par l'ANDRA est une loi de type Lemaitre-Menzel-Schreiner présentée dans le référentiel du site [5]. L'IRSN a déjà eu l'occasion de souligner au chapitre 2.3.3.2 du présent rapport (« *Comportement mécanique différé* ») les limites des modèles de Lemaitre. Pour ce qui concerne la loi de Lemaitre utilisée par l'ANDRA, celle-ci ne prend pas en compte l'endommagement du matériau et par ailleurs, comme le fait remarquer [187], suppose que la déformation viscoplastique volumique du matériau est nulle ce que les essais de fluage réalisés à ce jour sur les argilites de l'Est ne permettent pas de vérifier. L'IRSN indique que la prise en compte de la déformation viscoplastique volumique est l'une des pistes évoquées pour expliquer les variations de pression hydraulique mesurées en champ lointain lors de la construction du second puits du laboratoire souterrain de Mol en Belgique [189]. De plus, une loi de comportement différé similaire à celle utilisée par l'ANDRA pour modéliser le tunnel de Tournemire ne permet pas de rendre compte de la zone endommagée qui y est pourtant observable.

L'IRSN estime que pour des galeries de diamètre relativement limités (5 m), la mise en place d'un revêtement en béton pourrait notablement limiter et stabiliser la zone endommagée [190]. Cette conclusion n'est plus acquise pour des ouvrages beaucoup plus grands [191] tels que les « *grandes cavités à stockage vertical* » (GCV, 24 m x 17 m), qui avaient été envisagés par l'ANDRA dans les « *options initiales de conception* » (OIC, 1998 [87]) mais qui n'ont finalement pas été retenus dans le Dossier 2005 Argile. L'efficacité d'un système soutènement/revêtement dépend bien entendu des rigidités utilisées et du phasage des travaux. Selon le tome « *Architecture et gestion du*

*stockage géologique* » [2] du Dossier 2005 Argile, les plus grands ouvrages à excaver dans l'unité géomécanique C du Callovo-Oxfordien seraient les alvéoles de déchets B. Des compléments apportés par la lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0193 du 12 septembre 2005, l'IRSN retient que ces ouvrages seraient orientés dans la direction de la contrainte naturelle majeure, d'un diamètre excavé limité à 12 m, creusés en deux parties, soutenus par un boulonnage posé à 1,5 m du front de taille et par un béton projeté de 25 cm d'épaisseur mis en place à une dizaine de mètres du front de taille, puis revêtus 6 mois-1 an plus tard avec un béton coulé d'environ 70 cm d'épaisseur. L'IRSN constate que les concepts actuels de l'ANDRA ont évolué par rapport aux « *options initiales de conception* » (OIC, 1998 [87]) dans un sens favorable à la réduction des endommagements. Des interrogations subsistent cependant et l'IRSN indique, par exemple, qu'avec le phasage de travaux présenté, le radier « provisoire » de la partie supérieure de l'alvéole pourrait créer à mi-hauteur de la paroi de l'alvéole fini une zone de concentration d'endommagement dont le comportement différé resterait difficile à évaluer. De même, des zones de concentration d'endommagement pourraient se développer à partir du front de taille à chaque arrêt un peu prolongé. L'IRSN rappelle que la lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0235 du 23 novembre 2005 confirme que les observations réalisées dans les galeries du laboratoire souterrain montrent que la zone endommagée obtenue dépend de la technique de réalisation utilisée. L'IRSN considère également que sur des durées de l'ordre de la centaine d'années telles qu'envisagées dans le Dossier 2005 Argile, le comportement différé du béton des revêtements devrait également être pris en compte. **Pour lever ces incertitudes, l'IRSN estime que dans un stade ultérieur du projet, les ouvrages de grandes dimensions envisagés devraient être réalisés à titre de démonstration dans le laboratoire souterrain, dans les unités géomécaniques considérées et avec les techniques de réalisation définitivement retenues. Ces ouvrages de démonstration devraient être instrumentés en vue de caractériser et de suivre l'évolution de leur zone endommagée.** Cette conclusion rejoint l'une de celles de la synthèse du Dossier 2005 Argile [1] qui précise que « *les architectures de stockage ont été évaluées à partir d'études de principe et du retour d'expérience d'autres installations. Il n'a pas été procédé, à ce stade, à des essais technologiques d'ouvrages de stockage en vraie grandeur. Ceux-ci apparaissent en effet prématurés pour établir une faisabilité de principe. Pour aller au-delà, il serait utile de réaliser des démonstrateurs d'alvéoles in situ et d'expérimenter concrètement les possibilités de mise en oeuvre des solutions étudiées en milieu souterrain* ». Toutefois, au cours de la réunion préparatoire du 8 novembre 2005, l'ANDRA a précisé que les techniques de réalisation et les dimensions d'ouvrages envisageables au laboratoire souterrain de Bure sont limitées par la taille des machines qu'il est possible d'acheminer par les ouvrages d'accès.

Pour ce qui concerne les tronçons de galeries destinées à recevoir des scellements, l'ANDRA a défini des dispositions constructives visant à limiter les endommagements de manière encore plus marquée que pour les galeries courantes, notamment : un diamètre excavé limité à 7,50 m, une section droite pratiquement circulaire, un soutènement composé de cintres métalliques et de 30 cm de béton projeté fibré (de préférence aux boulons qui pourraient nuire à l'intégrité des argilites) posés à l'avancement et un revêtement en béton coulé de 80 cm d'épaisseur mis en place dans un délai inférieur à 2 mois. L'IRSN estime que ces dispositions sont satisfaisantes au stade actuel des connaissances. Néanmoins, l'IRSN considère que l'évolution de la zone endommagée autour d'un ouvrage à sceller pourrait être étudiée in situ par exemple lors d'une expérience destinée à valider la faisabilité des ouvrages de scellements comme indiqué précédemment au chapitre 5.2 du présent rapport.

L'IRSN estime que l'évolution de la zone endommagée à plus long terme (i.e. au-delà de la dégradation des revêtements) ne peut être étudiée que par le biais de la modélisation numérique et partage la conclusion de l'ANDRA selon laquelle il est nécessaire « *de laisser les dispositifs expérimentaux poursuivre l'acquisition de connaissances au cours des prochaines années* ». L'IRSN ajoute que les ouvrages du laboratoire souterrain étant relativement peu soutenus par rapport à ceux envisagés pour une éventuelle installation de stockage et susceptibles de faire l'objet des prochaines démonstrations in situ, ils devraient solliciter davantage la roche et permettre ainsi un calage plus aisé des modèles.

## 5.4 PERTURBATIONS CHIMIQUES

Le choix des matériaux constitutifs des barrières ouvragées d'un stockage doit notamment tenir compte des perturbations chimiques que ces composants peuvent occasionner. Il s'agit en particulier de s'assurer de leur valeur ajoutée, en terme de retard et de limitation des flux de substances radioactives et toxiques relâchées, par rapport aux colis et au milieu géologique endommagé par l'implantation d'une installation de stockage.

L'évolution des barrières ouvragées due à divers processus géochimiques au cours des phases de vie d'un stockage (oxydation, effet thermique, radiolyse, interactions avec des matériaux chimiquement différents) doit également être étudiée afin de vérifier que leurs propriétés de confinement hydraulique et chimique favorables au regard de la sûreté du stockage seront conservées.

Ces phénomènes géochimiques ont récemment été examinés par le groupe permanent « déchets », lors de la réunion du 8 juin 2004 sur la base du rapport DSU n° 32.

Dans le Dossier 2005 Argile, l'ANDRA a actualisé les référentiels de connaissances relatives aux matériaux métalliques, cimentaires et argileux [8] et présenté des études complémentaires tenant compte des concepts retenus et des conditions d'environnement attendues dans un stockage, conformément aux demandes formulées dans la lettre DGSNR/SD3/0660/2004 du 17 septembre 2004. Ainsi, l'ANDRA a conduit un large programme, combinant des travaux bibliographiques, expérimentaux et de modélisation pour estimer l'évolution chimique des principaux composants d'un stockage et les conséquences sur leurs propriétés physiques et chimiques. L'IRSN souligne l'effort important fourni par l'ANDRA pour traiter de manière étayée ces aspects essentiels qui constituent un support à la conception et à l'évaluation de performance des composants d'un stockage.

Le présent chapitre examine l'état des connaissances relatives à l'évolution chimique d'un stockage. Il porte en particulier sur les principaux processus d'altération et leurs conséquences potentielles sur les propriétés physiques et chimiques des trois grands types de matériaux constitutifs d'un stockage : les matériaux argileux<sup>15</sup>, les matériaux métalliques et les matériaux cimentaires. L'évolution des performances des barrières de stockage au regard de l'évolution de ces matériaux est examinée aux chapitres 6 et 7 du présent rapport, relatifs à l'évaluation de sûreté opérationnelle et à long terme du stockage.

### 5.4.1 ÉVOLUTION DES MATÉRIAUX ARGILEUX

L'évolution chimique des composants argileux d'un stockage résulte de déséquilibres d'origines variées. Leurs conditions d'environnement au cours des différentes phases de vie d'un stockage sont en effet influencées par les activités d'exploitation, par la présence de déchets qui produisent de la chaleur et des rayonnements, et par les composants de nature différente avec lesquels les argiles sont initialement en interaction directe (métaux, bétons) ou le seront dans une phase ultérieure (produit de dégradation des colis). Les connaissances relatives à ces perturbations et à leurs conséquences, présentées par l'ANDRA de manière développée dans le Dossier 2005 Argile ([3], [8], [9], [54], [56] notamment) sont résumées ci-après.

Pendant la période d'exploitation, l'air de ventilation pénètre progressivement dans les argilites<sup>16</sup> en champ proche des ouvrages ventilés au fur et à mesure de leur désaturation. Cet apport d'oxygène induit principalement une oxydation de la pyrite et de la matière organique. L'ANDRA précise que l'extension de cette perturbation oxydante, qui ne concerne qu'une faible fraction des minéraux constitutifs des argilites, correspond au plus à celle de la zone désaturée circonscrite à l'EDZ car le transport de l'oxygène est très lent dans le milieu saturé. Les

---

<sup>15</sup> L'appellation "matériaux argileux" désigne, dans le présent rapport, les argilites du Callovo-Oxfordien et les argiles gonflantes de type bentonite.

<sup>16</sup> Les argiles gonflantes de type bentonite introduites dans le stockage ont généralement subi une exposition à l'oxygène de l'air pendant leur exploitation et leur entreposage et sont donc considérées comme initialement oxydées.

équilibres chimiques issus du processus d'oxydation sont ensuite modifiés lors de la resaturation par les eaux des argilites (dissolution des minéraux sulfatés et échange d'ions principalement). La chimie des eaux en champ proche reste toutefois similaire à celle des argilites non perturbées, compte tenu notamment du rapport eau-roche mis en jeu. De même, l'évolution de l'argile gonflante (bentonite) lors de sa resaturation avec les eaux des argilites est limitée, du fait de la similarité de ces deux matériaux argileux, à une dissolution de minéraux secondaires (calcite, gypse, sidérite) et des processus d'échanges d'ions. Globalement, ces phénomènes transitoires n'entraînent pas, selon l'ANDRA, de modification significative à une échelle macroscopique des propriétés de gonflement, de transport et de confinement chimique des argiles.

L'élévation de température générée par les colis exothermiques pendant plusieurs milliers d'années peut entraîner une déstabilisation des minéraux argileux gonflants (smectites) au profit d'illites. L'ANDRA indique que ce phénomène d'illitisation reste toutefois limité du fait des faibles concentrations en potassium des eaux argileuses et des températures modérées atteintes (< 90°C). Pour ces raisons, l'ANDRA considère que la charge thermique n'aurait qu'une faible influence sur les propriétés des argiles. L'irradiation des argiles par les rayonnements gamma débute également dès la mise en place des colis. L'ANDRA considère que cette exposition est assimilable à une élévation de la température. Les rayonnements alpha et bêta, qui pourront affecter les argiles après la rupture du (sur)conteneur, conduisent à des défauts ponctuels et à la réduction du fer structural, et donc à une diminution possible des propriétés de gonflement. L'ANDRA souligne toutefois que les effets d'irradiations devraient rester peu marqués en raison des faibles débits de dose calculés (< 1 mGy/s).

Par ailleurs, la présence de matériaux métalliques en contact avec les argiles (revêtement, chemisage, bouchon métallique des alvéoles de colis exothermiques notamment) induit une perturbation « fer/argile », qui se développe par libération progressive de fer dans les eaux des argiles lors des processus de corrosion. L'ANDRA précise que ces processus réactionnels se produisent principalement lorsque des conditions favorables de saturation et de température sont réunies, c'est-à-dire pendant les quelques premiers milliers d'années après la fermeture du stockage, puis se poursuivent plus lentement après le transitoire thermique. Les expérimentations et modélisations présentées par l'ANDRA indiquent que cette perturbation se traduit par la formation d'une première zone fortement reminéralisée au contact des composants métalliques, d'épaisseur centimétrique (< 5 cm), constituée principalement d'une phase de type chlorite. Une perturbation moins marquée se développe dans une seconde zone d'épaisseur pluridécimétrique, caractérisée par un enrichissement en fer de la smectite et la formation de minéraux secondaires (quartz, feldspath en particulier). L'ANDRA ajoute que la chloritisation (1<sup>ère</sup> zone) pourrait aboutir à une diminution des propriétés de rétention des argiles mais, de manière globale, ne devrait pas modifier significativement leurs propriétés de transport.

Un autre type de perturbation des argiles provient de leur interaction avec des éléments en béton (massif d'appui des bouchons en argile des alvéoles de déchets C et de combustibles usés, revêtement des alvéoles de déchets B). Cette perturbation alcaline s'exprime par des processus de dissolution de minéraux (smectite, quartz, dolomite...), de formation de nouvelles phases (calcite, silicates de calcium, zéolites...) et d'échanges d'ions. Comme dans le cas de la perturbation fer/argile, l'ANDRA distingue deux zones d'altération :

- une zone fortement reminéralisée au contact du béton, d'extension inframétrique (après plusieurs centaines de milliers d'années), dans laquelle le panache hyperalcalin (pH>10) est circonscrit,
- une zone faiblement perturbée, d'extension d'ordre métrique, avec des transformations minéralogiques qui ne concernent qu'une faible proportion des argiles.

L'ANDRA précise que les propriétés des argiles sont principalement affectées dans la première zone d'altération et que, bien que les caractéristiques hydrodynamiques et de rétention de cette zone perturbée restent méconnues, elle pourrait conserver des propriétés favorables (rétention par les phases cimentaires et les zéolites néoformées, réduction de la porosité par la précipitation de minéraux).

Enfin, l'ANDRA a évalué l'effet, sur les argiles, de la silice et d'autres éléments (calcium, sodium, bore) relâchés lors de la dégradation des déchets vitrifiés et indique que ces éléments précipitent ou diffusent, sans conséquence défavorable sur les propriétés des argiles.

L'IRSN estime que les principaux processus réactionnels retenus par l'ANDRA pour rendre compte des diverses perturbations des matériaux argileux, ainsi que les ordres de grandeurs de l'intensité et de l'extension de ces perturbations sont cohérents avec l'état des connaissances. Comme indiqué dans le rapport DSU n°32 précité, l'IRSN estime que cet état des connaissances montre une altération modérée des argiles soumises aux conditions oxydantes, thermiques et radiolytiques attendues en stockage en comparaison de celles induites par la présence de matériaux métalliques et cimentaires. À cet égard, l'IRSN considère, comme l'ANDRA, que les propriétés hydrauliques et chimiques (capacité « tampon ») des argilites du Callovo-Oxfordien limitent la progression des perturbations chimiques à l'environnement proche du stockage. Ainsi, les interactions fer/argile et béton/argile sont les principaux processus susceptibles de modifier localement (par rapport à l'échelle d'un stockage) la capacité de confinement des composants argileux du stockage. L'IRSN considère que les conséquences des perturbations chimiques sur les propriétés de confinement chimiques et physiques des argiles présentées par l'ANDRA sont globalement vraisemblables. L'IRSN souligne néanmoins qu'il reste difficile d'évaluer ces conséquences de manière quantitative et estime qu'il convient de porter une attention particulière, dans les estimations de performances de confinement des barrières de stockage, au traitement des incertitudes relatives à l'impact de ces perturbations. Ce point est examiné au chapitre 7.1.3 du présent rapport relatif à l'évaluation des performances des barrières ouvragées de stockage.

L'IRSN signale par ailleurs qu'il existe également une incertitude relative à l'extension de la perturbation alcaline estimée par modélisation. Cette incertitude, également identifiée par l'ANDRA, est en partie liée à un possible contrôle cinétique des processus réactionnels qui pourrait conduire à une extension plus importante des modifications minéralogiques modérées (seconde zone). Par ailleurs, comme le montrent les simulations de l'ANDRA ainsi que celles de l'IRSN (cf. Annexe T5 au présent rapport), l'estimation de l'extension de la perturbation basée sur des modélisations thermodynamiques est particulièrement sensible à la valeur attribuée au coefficient de diffusion effective. Celle-ci reste mal connue dans l'EDZ. L'IRSN ajoute que la possible absence de contribution du phénomène d'exclusion anionique (notamment pour un mélange bentonite-sable) à la diffusion du panache alcalin constitue une source supplémentaire d'incertitude. À titre illustratif, une estimation réalisée par l'IRSN plus pénalisante que celle retenue en référence par l'ANDRA indique une perturbation alcaline d'extension plurimétrique. Aussi, l'IRSN considère qu'il conviendra à l'avenir de réduire par des travaux complémentaires cette incertitude car elle peut avoir une incidence sur les hypothèses à retenir pour décrire les situations d'évolution normale ou altérées du stockage. Ce point est également examiné plus avant dans le chapitre 7.1.3 du présent rapport.

En outre, comme mentionné dans le rapport DSU n°32 précité, il conviendrait d'estimer également l'influence potentielle des produits de dégradation des déchets B et des combustibles usés sur les propriétés des argiles, a minima de manière qualitative. Néanmoins, l'IRSN convient que ces perturbations sont a priori du second ordre au regard de celles citées ci-avant.

Enfin, les principaux axes de recherche identifiés par l'ANDRA (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0197 du 12 septembre 2005) relatifs aux perturbations chimiques des argiles concernent des travaux de modélisation (milieu non saturé, représentation de la dégradation des composants en interaction avec les matériaux argileux, intégration des modifications de propriétés de transport dues à la précipitation de minéraux), ce qui n'appelle pas de remarque particulière de la part de l'IRSN.

## 5.4.2 ÉVOLUTION DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

Le concept de stockage développé par l'ANDRA prévoit l'utilisation de matériaux cimentaires notamment dans les alvéoles de stockage de déchets B (conteneur de colis primaires, soutènement et revêtement des alvéoles), dans les infrastructures du stockage (soutènement, revêtement, massifs d'appui des scellements en argile gonflante) et dans une moindre mesure en tête d'alvéoles de déchets C ou de combustibles usés (massif d'appui du bouchon d'alvéole). La fonction de ces composants du stockage est principalement de nature mécanique. Un rôle chimique vis-à-vis de la durabilité des colis de stockage et du transfert de radionucléides est également attribué au matériau de remplissage des alvéoles de déchets B.

L'IRSN rappelle que l'évolution des matériaux cimentaires a récemment été examinée par le groupe permanent « déchets », lors de la réunion du 8 juin 2004 sur la base du rapport DSU n° 32. Les informations alors disponibles sont étayées et complétées dans le Dossier 2005 Argile ([3], [8], [9], [55] et [59] notamment) pour ce qui concerne les types de matériaux cimentaires retenus à ce stade du projet, l'état des connaissances sur leurs propriétés physiques et chimiques ainsi que sur leur comportement d'ensemble en situations de stockage. L'état général des connaissances n'a toutefois pas significativement évolué. Aussi, le présent chapitre rappelle les principaux aspects de l'évolution des matériaux cimentaires et évalue les éléments présentés dans le Dossier 2005 Argile au regard en particulier des caractéristiques des composants du stockage retenues par l'ANDRA dans son évaluation de sûreté à court et à long terme.

Les matériaux cimentaires étudiés dans le Dossier 2005 Argile, définis au regard des sollicitations en conditions de stockage et des performances attendues, sont principalement des bétons de classe BHP à base de CEM I ou CEM V<sup>17</sup>. L'ANDRA présente les critères retenus pour la formulation de ces matériaux, relatifs à leur réactivité chimique (tampon acido-basique à pH de 12,5, résistance à l'attaque par les ions sulfate, granulats ne présentant pas de risque de réactivité du type alcali-silice...), leurs propriétés physiques (faibles perméabilité, diffusivité et porosité ; faible chaleur d'hydratation...) et leur mise en œuvre (ouvrabilité, absence de ressuage...). L'ANDRA précise que certains composants du stockage en béton pourront être armés ou fibrés.

L'ANDRA indique que si les matériaux cimentaires dans leur état initial peuvent présenter intrinsèquement de faibles perméabilité et coefficient de diffusion des solutés, « *il est difficile de garantir l'obtention des mêmes niveaux de perméabilité et de coefficient de diffusion sur des ouvrages de grands volumes (au-delà de plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>)* » [8]. En effet, les techniques de mise en œuvre, les retraits ou reprises de bétonnage sont autant d'hétérogénéités qui peuvent modifier, à grande échelle, les propriétés physiques des matériaux cimentaires.

Pour ce qui concerne les principaux phénomènes chimiques de dégradation des bétons en conditions de stockage, l'ANDRA distingue la période associée à un maintien de conditions non saturées (ventilation des ouvrages) de la période à plus long terme caractérisée par des matériaux saturés en eau. L'ANDRA indique que l'altération des bétons au cours de la première période est essentiellement due au processus de carbonatation atmosphérique (réaction avec le dioxyde de carbone contenu dans l'air). Ce processus conduit à une diminution de la porosité (précipitation de carbonates) et à une diminution progressive du pH du fait de la disparition de la portlandite et des silicates de calcium hydratés (CSH), qui peut dépasser les armatures métalliques et entraîner la formation de produits de corrosion expansifs et, in fine, une fissuration voire une fracturation des bétons. Toutefois, l'ANDRA précise que le colmatage de la porosité et la formation d'eau au cours de cette réaction contribue à limiter fortement le transfert de dioxyde de carbone et la propagation de ce phénomène au sein du matériau. Au cours de la seconde période (resaturation par les eaux de Callovo-Oxfordien), l'eau constitue un agent d'agression par elle-même (hydrolyse), ainsi que par la présence en solution de carbonates (carbonatation sous eau), de sulfates (attaque sulfatique) et de chlorures. Les effets possibles de ces processus d'altération sont notamment une

---

<sup>17</sup> BHP est l'acronyme de « bétons de hautes performances » ; il s'agit d'une classe de bétons dont la résistance mécanique en compression est supérieure à 60 MPa. CEM I désigne le « ciment portland artificiel » (ou CPA) et CEM V le « ciment aux laitiers et aux cendres (ou CLC) ».

diminution de la capacité acido-basique due à la dissolution des principaux hydrates, une modification de la porosité (ouverture par hydrolyse, fermeture par carbonatation) et une fissuration-fracturation dans le cas d'une attaque sulfatique (formation de composés expansifs) ou par le chlore (corrosion des armatures). L'ANDRA signale que la dégradation des colis de déchets, en particulier les colis de boues bitumées, génère également des espèces agressives telles que des acides organiques et des sulfates, qui conduisent à des processus d'altération du béton de même nature que ceux cités précédemment (hydrolyse par production d'acides et attaque sulfatique). L'ANDRA précise que l'« *action conjointe de différents phénomènes agressifs peut contribuer à amplifier ou accélérer certains phénomènes de dégradation* » et que « *la couche d'altération n'est pas totalement passivante vis-à-vis des réactions ultérieures* » [8], sans pour autant que les effets pris isolément s'additionnent. L'évaluation des extensions des dégradations chimiques et physiques « *n'est actuellement pas envisageable de manière totalement couplée. Il est donc nécessaire d'en rester à un modèle simplifié de description* » [55]. Les simulations présentées par l'ANDRA indiquent une épaisseur de carbonatation atmosphérique qui n'excède pas l'échelle centimétrique pour des conditions de faible hygrométrie (~ 50 %) sur une durée de ventilation séculaire. En conditions saturées, les épaisseurs calculées de béton altéré sont au plus décimétrique en 10 000 ans.

Par ailleurs, l'ANDRA indique que l'acquisition de données relatives aux propriétés de transport hydrodynamiques de matériaux à différents stades d'altération « *reste une voie d'exploration* » et que les travaux relatifs aux conséquences sur les propriétés mécaniques mettent en exergue « *la difficulté pour rendre compte [...] de l'évolution mécanique des matériaux avec la dégradation chimique* » [8]. De façon globale, l'ANDRA considère que « *la dégradation chimique des bétons du stockage s'inscrit sur une échelle de plusieurs centaines de milliers d'années a minima* » et que « *cette lente dégradation chimique des bétons conduit de facto à une lente évolution de leurs propriétés mécaniques en grand* » [3]. Pour le cas d'un alvéole de déchets B, l'ANDRA indique que « *le volume de l'alvéole et les vides résiduels, même faibles, ne permettent pas de garantir de faibles valeurs de perméabilité et de coefficient de diffusion* » [4]. L'ANDRA ajoute qu'il subsiste encore des incertitudes sur l'impact de la corrosion des armatures métalliques du soutènement et sur l'évolution des sollicitations mécaniques des terrains à moyen et long terme, qui pourraient conduire à une fissuration ou une fracturation localisée du soutènement ou du revêtement. Aussi, l'ANDRA indique que « *la compréhension actuelle de l'évolution de l'alvéole conduit à être prudent sur les performances hydrauliques et de transport de l'alvéole* » [4]. De ce fait, dans les calculs réalisés pour évaluer les performances à long terme d'un stockage, l'ANDRA retient en référence des valeurs élevées de perméabilité ( $10^{-6}$  m/s) et de paramètres de diffusion (coefficient de diffusion effective de  $6 \cdot 10^{-10}$  m/s et porosité de 0,3) constantes dans le temps pour les alvéoles de déchets B et, de façon plus générale, pour tous les composants cimentaires.

L'ANDRA retient, pour évaluer le comportement chimique des radionucléides au sein des ouvrages cimentaires (alvéoles de déchets B), quatre « grands états » d'évolution chimique de ces matériaux due essentiellement au processus de dégradation par hydrolyse (cf. Figure 29), représentés par une minéralogie simplifiée. Pour chacun de ces états (sain, altéré, dégradé, neutralisé), l'ANDRA a sélectionné des valeurs de solubilité et de coefficient de partage (rétention) de radionucléides, sur la base de calculs et de mesures issus de ses propres travaux et de la littérature, en quantifiant pour chaque cas les incertitudes associées. L'ANDRA dresse un bilan des limites des connaissances actuelles dans ce domaine et discute notamment des effets potentiels de différents processus sur ces données (présence de granulats et d'adjuvants, carbonatation, composés organiques issus de la dégradation des colis B, température, effet d'échelle...).

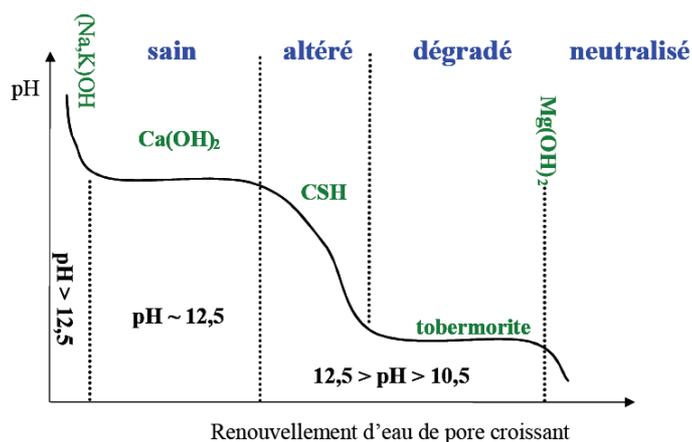


Figure 29 - Neutralisation des principales phases cimentaires [59].

L'IRSN rappelle, comme mentionné dans le rapport DSU n°32 précité, que l'état de connaissances relatif à l'évolution des matériaux cimentaires sur le long terme est encore à un stade parcellaire. L'IRSN considère, comme le signale l'ANDRA, que la compréhension actuelle de l'action conjointe des processus d'altération sur les propriétés des bétons n'est pas suffisante pour permettre une évaluation quantitative précise de l'évolution spatiale et temporelle de ces propriétés. L'ANDRA a néanmoins bien identifié les grands types de dégradation chimique possibles des bétons en conditions de stockage et leurs principales conséquences et complété son dossier en tenant compte notamment des aspects relatifs à l'influence des granulats, des armatures métalliques et des produits d'altération des colis de déchets B. De façon générale, l'IRSN estime que l'approche retenue par l'ANDRA, qui consiste d'une part à évaluer les ordres de grandeur de l'extension de possibles perturbations par modélisation couplée chimie-transport et d'autre part, de définir les principaux états de dégradation des matériaux cimentaires pour déterminer les valeurs à retenir dans les calculs de transport de radionucléides à l'échelle du stockage, est satisfaisante. En particulier, l'IRSN souligne l'effort fourni par l'ANDRA pour établir une revue des données de la littérature complétée par des travaux expérimentaux et de modélisation qu'elle a menés, et estimer sur cette base des valeurs de paramètres de confinement chimique (limite de solubilité et coefficient de partage). L'IRSN estime que cette étude, qui explicite les données utilisées et les choix effectués, et tient compte des incertitudes existantes, est de qualité et constitue une base de données pertinente pour les calculs relatifs à l'évaluation des performances à long terme du stockage.

Par ailleurs, l'IRSN convient que l'évolution des matériaux cimentaires, qui dépend des processus chimiques mais également des conditions d'environnement hydrique et mécanique, relève de processus relativement lents. Il reste néanmoins difficile d'estimer les vitesses d'altération de ces matériaux et par conséquent l'évolution dans le temps de leurs propriétés. Si l'IRSN considère que le risque de rupture ou de forte désagrégation du soutènement-revêtement des alvéoles de déchets B pendant une période séculaire (phase de réversibilité) pourra raisonnablement être écarté dès lors que sa conception aura été validée notamment au moyen d'un démonstrateur in situ (cf. chapitre 5.3 du présent rapport), l'extrapolation à long terme de leur altération chimique et donc de leurs propriétés hydrauliques et mécaniques est hasardeuse. L'IRSN constate néanmoins que l'ANDRA attribue aux composants cimentaires des propriétés chimiques (limite de solubilité et coefficient de partage) et hydrauliques (perméabilité, porosité, coefficient de diffusion) qui tiennent bien compte des incertitudes existantes.

**En conclusion, l'IRSN considère, comme l'ANDRA, que des incertitudes importantes existent au regard des propriétés de transfert des matériaux cimentaires, dans leur état initial ou évolué et estime que l'ANDRA tient compte de manière satisfaisante de ces incertitudes dans l'évaluation de sûreté à long terme du stockage.**

En outre, l'ANDRA a indiqué au cours de l'instruction (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0189 du 23 août 2005) que, dans l'hypothèse d'une poursuite du projet de stockage géologique en formation argileuse, deux grands axes d'études

sont envisagés. Le premier axe consiste en la poursuite des études du comportement de matériaux cimentaires, avec en particulier des travaux relatifs aux couplages chimie-transfert et chimie-mécanique, aux bétons spéciaux (bétons « bas pH », auto-plaçants, fibrés) ainsi que des caractéristiques des interfaces avec d'autres matériaux du stockage et leur évolution à long terme. Le second axe concerne l'ingénierie et la construction d'ouvrages, et a pour objectif de diminuer les incertitudes sur les propriétés initiales des matériaux cimentaires en relation avec leur application industrielle pour le stockage. L'ANDRA précise qu'une étape clé sera la réalisation de démonstrateur à une échelle représentative des objets en configuration de stockage (colis et ouvrages). Compte tenu de l'ensemble des éléments présentés ci-dessus et des incertitudes existantes, l'IRSN estime que ces orientations sont pertinentes.

### 5.4.3 CORROSION DES MATÉRIAUX MÉTALLIQUES

Les principaux composants métalliques d'un alvéole de stockage sont les surconteneurs de colis de déchets C, les conteneurs de combustibles usés, le chemisage et le revêtement en aciers non alliés (type P235 et S235 selon les normes AFNOR). Ces composants seront soumis à des processus de corrosion, dont l'occurrence et la cinétique sont liées aux caractéristiques du métal (réactivité chimique, capacité de passivation, résistance mécanique...) et à celles de l'environnement (milieu atmosphérique ou aqueux, espèces en solution, potentiel redox...).

L'étude de la corrosion des composants métalliques d'un alvéole [53] présentée dans le Dossier 2005 Argile s'appuie notamment sur le bilan de connaissances relatives aux phénomènes de corrosion des aciers [8] mentionné dans l'introduction du présent chapitre et sur les études relatives à l'évolution thermique, hydrique, et mécanique des alvéoles, examinée dans les chapitres précédents. Cette étude, complétée par le document [115] et la lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0184 du 19 août 2005, explicite la démarche et les hypothèses retenues par l'ANDRA pour estimer une durée de maintien des fonctions associées aux composants métalliques (étanchéité et/ou mécanique). La présente analyse de l'IRSN porte plus particulièrement sur les compléments apportés au dossier examiné par le groupe permanent « déchets » lors de la réunion du 8 juin 2004 consacrée à l'examen des phénomènes géochimiques dans un stockage en formation géologique sur le site de Bure. Ces compléments concernent les conditions d'environnement envisagées, les processus de corrosion possibles et les incertitudes restantes, pris en compte pour le pré-dimensionnement des (sur)conteneurs. Le Tableau 12 rappelle l'épaisseur totale des principaux composants métalliques, présentée par l'ANDRA en 2004 dans l'avant-projet préliminaire de stockage et reprise dans le Dossier 2005 Argile. Cette épaisseur comprend une épaisseur consommable pour la corrosion et une épaisseur permettant d'assurer la fonction « mécanique » associée au composant concerné.

	Surconteneur de déchets C	Conteneur de combustibles usés*	Chemisage
Durée de maintien de la fonction (ans) <i>(fonction principale)</i>	4 000 <i>(étanchéité)</i>	10 000 <i>(étanchéité)</i>	300 <i>(tenue mécanique)</i>
Épaisseur de corrosion (mm)	27	90	5
Épaisseur de résistance mécanique (mm)	28	20-30	20
Épaisseur totale (mm)	55	110-120	25

\* L'épaisseur utile de la virole du conteneur de grand diamètre (4 assemblages) est de 110 mm ; la résistance mécanique est assurée par 20 mm d'acier associés à l'insert en fonte. L'épaisseur utile de la virole du conteneur de petit diamètre (1 assemblage) est de 120 mm, dont 30 mm consacrés à la résistance mécanique [2] [53].

**Tableau 12 - Éléments de dimensionnement des (sur)conteneurs de déchets exothermiques et du chemisage d'un alvéole de stockage.**

L'ANDRA retient trois principales périodes de corrosion successives pour estimer une durée du maintien de la fonction des composants métalliques :

- une période pendant laquelle la corrosion est négligeable, en l'absence d'eau condensée au contact de la surface métallique, du fait notamment de la puissance thermique dégagée par les déchets, des phénomènes de désaturation et des échanges avec le milieu environnant limités par le chemisage. Cette période concerne notamment les (sur)conteneurs ;
- une période transitoire, avec une corrosion généralisée parfois importante et des risques de corrosion localisée non négligeables (vitesse de corrosion de plusieurs dizaines de micromètres par an, qui pourrait atteindre des valeurs de l'ordre du millimètre par an). Cette période la plus critique vis-à-vis de la corrosion est également celle qui est la plus chargée d'incertitudes. Elle est associée à l'évolution du milieu environnant, en particulier de son état de saturation en eau, de sa teneur en espèces oxydantes (oxygène initialement présent ou renouvelé ; radiolyse de l'eau) et de la nature du milieu au contact du métal (humidité relative, eau, argile compacte). Des hétérogénéités locales du matériau ou de l'environnement peuvent exacerber les processus de corrosion, par exemple la présence d'espèces agressives (chlorures, sulfures, espèces générées par les micro-organismes...), le ruissellement d'eau dans les jeux entre le (sur)conteneur et le chemisage par les zones de non-étanchéité de ce dernier. À l'échelle d'un alvéole, les (sur)conteneurs pourront ne pas être confrontés au même environnement selon leur position dans l'alvéole, du fait de la possibilité de renouvellement d'oxygène plus aisé en tête d'alvéole (oxygène provenant de la galerie au travers du milieu insaturé) ;
- une période de corrosion à long terme dans un milieu argileux saturé en eau réductrice, avec des vitesses de corrosion généralisée faibles (quelques dixièmes de micromètres à quelques micromètres par an).

**L'IRSN considère que cette description de l'évolution de la corrosion des composants d'un alvéole, qui tient compte des diverses conditions d'environnement d'intérêt vis-à-vis de la corrosion et des incertitudes qui leur sont associées, pour des situations attendues en stockage et pour des situations moins probables, est globalement satisfaisante au regard des connaissances actuelles et des dispositions de conception retenues.**

La durée de la période transitoire, notamment de « restauration/présence d'oxygène », conditionne fortement l'estimation d'une durée de vie des composants métalliques. L'IRSN convient du rôle important des dispositions conceptuelles retenues par l'ANDRA (bouchon métallique introduit après le dernier colis, operculaire ou capot d'étanchéité à l'intersection entre l'alvéole et la galerie) vis-à-vis de la limitation du renouvellement d'air dans les alvéoles et de la durée de la période oxydante. Le chemisage et le revêtement contribuent aussi à préserver les (sur)conteneurs des effets négatifs associés à la période transitoire, notamment par la consommation d'oxygène. Compte tenu de ces dispositions conceptuelles, l'ANDRA considère une période oxydante de 10 ans pour les (sur)conteneurs, et de quelques dizaines d'années pour le chemisage, ce qui peut être retenu en première approche, sans toutefois être pénalisant en l'état des connaissances.

L'IRSN rappelle (rapport DSU n°32 précité) que les lois semi-empiriques établies par l'ANDRA pour estimer les vitesses de corrosion généralisée et localisée constituent une base suffisante, à ce stade du projet, dans l'objectif de pré-dimensionner les (sur)conteneurs. L'ANDRA applique un facteur multiplicatif de 2 ou 3 sur les vitesses de corrosion généralisée issues de ces lois en milieu respectivement désaéré et aéré, afin de tenir compte des incertitudes relatives à l'homogénéité du matériau et de l'environnement, sur le flux de matière oxydante et sur le rôle potentiel des micro-organismes. L'IRSN signale, d'une part que l'effet prépondérant des micro-organismes relatif à la corrosion localisée n'est actuellement pas quantifié et pourrait s'avérer plus important que celui représenté par l'ANDRA, d'autre part que la démarche retenue considère chaque type d'incertitudes mentionné ci-dessus isolément (pas de cumul de ces trois types d'incertitudes). Aussi, l'IRSN estime que les données retenues par l'ANDRA pour calculer les épaisseurs consommables par la corrosion ne couvrent pas de façon probante les incertitudes existantes.

Deux points particuliers relatifs au pré-dimensionnement des (sur)conteneurs méritent également d'être soulevés.

D'une part, parmi les dispositions envisagées pour procéder à la mise en alvéole des colis de stockage (cf. chapitre 6.1.3 du présent rapport), l'ANDRA prévoit l'encastrement de patins en matériau céramique sur les (sur)conteneurs manipulés par un robot pousseur (colis de déchets C et colis de type CU2 et CU3), afin de faciliter l'insertion dans l'alvéole et d'éviter l'endommagement du corps du (sur)conteneur par contact avec le chemisage lors de la poussée dans l'alvéole. L'ANDRA indique que l'épaisseur du corps du (sur)conteneur serait alors augmentée de 10 mm afin de ne pas nuire à l'intégrité de son épaisseur utile. Dans le cas d'une manutention par un robot aéroporteur (colis de type CU1), le colis est en appui sur deux « rails » fixés sur le chemisage, qui ménagent un espace entre le colis de stockage et le chemisage, nécessaire au positionnement du berceau de coussins d'air de l'aéroporteur. L'IRSN considère que ces options sont intéressantes. Néanmoins, l'IRSN considère que le risque d'apparition de crevasses au niveau des contacts entre ces dispositifs (patins en céramique, rails) et l'acier non allié du chemisage et du (sur)conteneur devront être prises en compte à l'avenir dans l'évaluation de la tenue à la corrosion de ces composants métalliques.

D'autre part, l'ANDRA distingue une épaisseur de résistance mécanique et une surépaisseur de corrosion pour le pré-dimensionnement des (sur)conteneurs. Toutefois, « *afin de ne pas cumuler des facteurs pénalisants de façon irréaliste* », l'ANDRA considère que même si une corrosion localisée se produisait dans l'épaisseur de résistance mécanique, elle n'affecterait pas la tenue mécanique du (sur)conteneur (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0184 du 16 août 2005). Pour l'IRSN, le dimensionnement mécanique doit tenir compte de défauts probables dus à la corrosion (crevasses par exemple) qui pourraient altérer la tenue mécanique de l'acier (concentrations de contraintes notamment). Aussi, l'IRSN considère que cet aspect devra être traité plus avant dans les étapes futures de dimensionnement.

Par ailleurs, l'IRSN constate que les études réalisées dans le cadre du projet de stockage développé en Suisse, pour des conditions d'environnement similaires, ont conduit à sélectionner des (sur)conteneurs en acier non allié d'épaisseur significativement plus importante (150 mm pour le conteneur de combustibles usés et 250 mm pour le surconteneur de colis de déchets vitrifiés) pour une durée d'étanchéité de 1 000 à 10 000 ans. L'ANDRA indique à cet égard que « *cela correspond au choix de s'affranchir complètement de la corrosion radiolytique, alors que celle-ci est prise en compte dans le dimensionnement vis-à-vis de la corrosion réalisée par l'ANDRA grâce notamment à l'épaisseur d'acier affectée à la tenue mécanique du colis* » [2].

**Aussi, l'IRSN ne remet pas en cause les ordres de grandeur des épaisseurs retenues par l'ANDRA pour le pré-dimensionnement des (sur)conteneurs et du chemisage vis-à-vis de leur tenue à la corrosion sur les durées visées.** En outre, l'IRSN estime que d'autres considérations que la corrosion sont à prendre en compte dans le pré-dimensionnement des composants métalliques d'une installation de stockage, notamment celle de la génération de gaz par corrosion, qui peuvent conduire à optimiser les épaisseurs à retenir.

**L'IRSN estime toutefois que le dimensionnement des composants métalliques ne peut raisonnablement pas être figé à ce stade du projet et qu'il conviendra de vérifier, sur la base de nouvelles investigations, la pertinence des épaisseurs actuellement retenues.**

Il sera en effet nécessaire, en vue de la démonstration de sûreté d'un stockage, d'augmenter le degré de confiance dans les estimations de corrosion des composants métalliques d'un alvéole. Cela sous-tend en particulier une détermination des incertitudes associées à chaque mode de dégradation par corrosion. Dans l'hypothèse d'une poursuite du projet, l'ANDRA envisage notamment « *des expérimentations in situ* » et « *une possible instrumentation de conteneurs in situ* » (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0184 du 16 août 2005). L'IRSN considère que cette orientation est indispensable, dans l'objectif notamment de mieux cerner l'influence de l'évolution des conditions d'environnement sur le comportement des aciers non alliés. L'IRSN souligne que cet objectif ne pourra raisonnablement être atteint que par des essais in situ de longues durées, dans des conditions aussi proches que possible de celles d'un stockage. L'IRSN considère que des essais représentatifs d'un alvéole de stockage, comprenant notamment un chemisage et des (sur)conteneurs en situation « nominale » ou « défavorable » (non

étanchéité du chemisage par exemple), effectués sur une dizaine d'années (ou plus), sont susceptibles d'apporter des éléments importants en vue de consolider les prévisions actuelles.

Par ailleurs, l'IRSN souligne que d'autres phénomènes tels que la corrosion sous contrainte ou la fragilisation par l'hydrogène ne peuvent être modélisés et doivent par conséquent être exclus par les précautions prises en conception (choix du matériau, traitement thermique de détensionnement...). Pour l'ANDRA (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0184 précitée), l'ensemble des conditions nécessaires à l'apparition de la corrosion sous contrainte n'est pas réuni dans le stockage : la concentration en carbonates des eaux du site de Meuse/Haute-Marne est trop faible ; les contraintes mécaniques s'exerceront sur les (sur)conteneurs longtemps après la période « oxydante », en l'absence d'un oxydant autre que l'eau nécessaire à la corrosion sous contrainte intergranulaire ; les sollicitations mécaniques sont de type quasi-statique et ne peuvent donc pas être à l'origine de corrosion sous contrainte. De même, le phénomène de fragilisation par l'hydrogène nécessite des conditions particulières qui n'apparaissent pas réunies (matériau sensible, environnement favorisant la pénétration de l'hydrogène dans le matériau, sollicitations mécaniques dynamiques...).

À cet égard, l'IRSN note l'absence de traitement thermique de détensionnement des zones de soudage dans le procédé actuellement retenu pour la fabrication des (sur)conteneurs. Aussi, l'IRSN estime que :

- les contraintes résiduelles pourraient être suffisantes pour amorcer et propager de la corrosion sous contrainte en milieu aqueux carbonaté pendant la période aérée. L'IRSN constate que la notion de concentration limite en carbonates résulte des travaux expérimentaux d'une seule équipe [176] limités dans le temps, et considère que ces travaux ne permettent pas à eux seuls d'exclure totalement ce type de corrosion en conditions de stockage. En outre, l'IRSN estime que les sollicitations mécaniques en conditions de stockage, de type quasi-statique selon l'ANDRA, pourraient également être à l'origine de corrosion sous contrainte dans la mesure notamment où ce type de dommage pourrait être d'autant plus important que la vitesse de déformation est faible [177] ;
- bien que la nuance d'acier sélectionnée par l'ANDRA contribue à minimiser le risque de fragilisation par l'hydrogène, le seul choix de l'acier sans qualification de l'ensemble matériau/procédé ne peut garantir l'absence de ce type de risque dans les zones de soudage non détensionnées. À cet égard, l'IRSN signale que pour ce type d'acier non allié, les codes de construction prévoient de manière standard un traitement thermique de détensionnement et des mesures de dureté en zone affectée thermiquement avec une valeur limite imposée. L'IRSN considère que déroger à ces pratiques nécessitera une justification fortement étayée de la part de l'ANDRA.

Par conséquent, l'IRSN considère qu'à ce stade du projet, il existe des risques de corrosion sous contrainte et de fragilisation par l'hydrogène qui pourraient conduire à des dommages locaux importants. À cet égard, l'ANDRA précise (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0184 précitée) que des essais spécifiques sont envisagés pour caractériser les effets possibles des techniques de fabrication sur ces processus de corrosion et que le détensionnement des soudures constitue une option ouverte dans une étape ultérieure du projet. L'IRSN encourage l'ANDRA à poursuivre dans cette voie, qui permettrait de réduire ou de s'affranchir des risques mentionnés ci-avant.

De façon générale, comme indiqué dans la précédente analyse de l'IRSN (rapport DSU n° 32 précité), l'expérience acquise dans d'autres secteurs montre que les phénomènes de corrosion même dans les milieux a priori maîtrisés restent difficiles à appréhender. Les cas de corrosion sous contrainte observés sur des réseaux de chauffage urbain en région parisienne [178] et en Hollande [179], ainsi que celui de corrosion localisée des réseaux incendie des centrales de type 1 300 MWe due à de la corrosion en présence de micro-organismes, peuvent être cités à titre illustratif pour ce qui concerne les aciers non alliés. Ces constats incitent par conséquent à la prudence vis-à-vis des estimations de tenue à la corrosion des composants métalliques.

Compte tenu de l'ensemble des éléments ci-dessus, l'IRSN renouvelle l'avis formulé dans le rapport DSU n° 32 présenté lors de la réunion du 8 juin 2004 du groupe permanent « déchets » consacrée aux phénomènes géochimiques, selon lequel il existe des incertitudes significatives relatives à la vitesse de corrosion des composants métalliques d'un alvéole de stockage, du fait notamment d'un manque de connaissance des conditions d'environnement transitoires et de leur durée, qu'il conviendra de réduire en particulier par des essais in situ de longues durées. En l'état actuel des connaissances, l'IRSN estime que les données rassemblées ne permettent pas de garantir que le système de confinement en acier non allié constitué par les (sur)conteneurs restera étanche pour les durées prises en compte dans le Dossier 2005 Argile (4 000 ans pour les déchets C et 10 000 ans pour les combustibles usés). De même, l'IRSN considère qu'une rupture précoce du chemisage ne peut être exclue. Cette conclusion est reprise dans les chapitres 6 et 7 du présent rapport relatifs à l'évaluation de sûreté opérationnelle et à long terme du stockage.

Enfin, l'ANDRA indique que l'acier non allié a été privilégié à ce stade « *pour le caractère maîtrisé et prédictible de son processus de corrosion et parce qu'il se soude aisément* » [2]. L'IRSN note que l'ANDRA prévoit, d'une part de maintenir une veille sur les connaissances relatives aux matériaux passivables (notamment les aciers inoxydables, alliage à base de nickel, titane), d'autre part de reconsidérer, si nécessaire, la possibilité d'utiliser d'autres matériaux métalliques que les aciers non alliés. À cet égard, l'IRSN estime que l'acier non allié n'est pas le matériau qui présente la meilleure résistance à la corrosion dans les conditions d'environnement physico-chimiques possibles caractérisant l'installation de stockage et son évolution. Ce choix devra être confirmé ou infirmé au regard des performances qui seront requises des (sur)conteneurs dans la démonstration de sûreté future du stockage, sur la base notamment des essais mentionnés ci-avant.

## 5.5 CONCLUSION

L'IRSN estime que l'ANDRA a réalisé un travail de qualité pour apprécier les différents types de perturbations susceptibles d'affecter l'ensemble des ouvrages d'une installation de stockage. En particulier les mécanismes responsables de ces perturbations et leurs couplages possibles ont bien été identifiés.

Le Dossier 2005 Argile présente des études globalement satisfaisantes sur l'évaluation des champs thermiques et l'aptitude des concepts à éviter des élévations de température préjudiciables aux capacités de confinement des composants du stockage. À cet égard, l'adoption d'un (sur)conteneur est pertinente pour prévenir des relâchements d'activité dans des conditions de température pour lesquelles les phénomènes de transport sont mal maîtrisés. Les effets thermiques ont en outre été pris en compte pour l'estimation des vitesses de relâchement et de migration des radionucléides. Par ailleurs, l'IRSN estime que l'ANDRA a conduit une première évaluation satisfaisante des effets de la génération de gaz dans le stockage et des transitoires hydrauliques. Ces estimations, qui constituent une avancée notable par rapport aux précédents dossiers de l'ANDRA, ne soulèvent pas, selon l'IRSN, de questions de sûreté nécessitant une réorientation des concepts au stade actuel des connaissances. Enfin, l'IRSN considère que les effets possibles des perturbations mécaniques et chimiques devraient rester limités aux ouvrages et à quelques mètres de roche en périphérie de ceux-ci.

Toutefois, ces tendances d'évolution nécessiteront à l'avenir d'être consolidées en précisant plus avant un certain nombre de points. Il conviendra en particulier de :

- vérifier que les marges retenues pour le dimensionnement thermique du stockage permettent effectivement de garantir le respect des critères thermiques visés, en tenant compte notamment des incertitudes sur la conductivité thermique de la formation hôte ;
- acquérir des données complémentaires caractérisant les perméabilités relatives à l'eau et au gaz de la formation du Callovo-Oxfordien, le transfert des gaz étant très sensible à ces propriétés ;

- améliorer la compréhension du comportement mécanique de la roche. En effet, si l'extension de la zone fracturée par le creusement des ouvrages observée en laboratoire souterrain reste compatible avec les options de scellement envisagées par l'ANDRA, elle est néanmoins supérieure à celle initialement attendue ;
- confirmer le dimensionnement des soutènements des ouvrages de grande dimension ;
- améliorer les connaissances sur les propriétés physiques et chimiques des bétons dans leur état initial et évolué, en tenant compte de l'influence sur ces propriétés des conditions de mise en œuvre industrielle des composants cimentaires ;
- vérifier la pertinence du pré-dimensionnement des composants métalliques du stockage (chemisage des alvéoles et surconteneurs) au regard des phénomènes de corrosion. En effet, il existe des incertitudes significatives relatives aux vitesses de corrosion de ces composants, du fait notamment d'un manque de connaissances des conditions d'environnement transitoires et de leur durée. En l'état actuel des connaissances, l'IRSN estime que les données rassemblées ne permettent pas de garantir que le système de confinement en acier non allié constitué par les (sur)conteneurs restera étanche pour les durées prises en compte dans le Dossier 2005 Argile.

L'IRSN souligne que ces compléments devront notamment s'appuyer sur des essais in situ, dans des conditions aussi proches que possible de celles prévues dans une installation de stockage. Des démonstrateurs d'ouvrages de stockage seront selon l'IRSN nécessaires, en vue de démontrer à l'échelle industrielle la sûreté d'une telle installation. Il s'agira en particulier, pour lever les incertitudes sur les points précités, de réaliser en laboratoire souterrain un ouvrage de dimensions représentatives des plus grands alvéoles de stockage envisagés par l'ANDRA, creusé dans l'unité géomécanique et avec les techniques de réalisation définitivement retenues, ainsi qu'un démonstrateur représentatif d'alvéoles de stockage des déchets exothermiques, comprenant notamment un chemisage et des (sur)conteneurs. Par ailleurs, la réalisation d'un scellement de galerie à l'échelle 1 est nécessaire pour confirmer les performances que ce type d'ouvrage est susceptible d'atteindre, ainsi qu'il est montré dans la suite du présent rapport. Un essai de ce type réalisé en laboratoire pourrait être mis à profit pour évaluer les effets possibles d'une montée en pression des gaz sur un tel ouvrage.

L'IRSN constate toutefois que les incertitudes mentionnées ci-dessus sont prises en compte par l'ANDRA dans ses évaluations de sûreté, par le biais notamment de différents scénarios postulant la perte partielle ou totale des fonctions des barrières ouvragées. Les résultats de ces évaluations montrent que ces pertes ne remettraient pas gravement en cause la capacité de confinement d'ensemble de l'installation de stockage.

## **6 ÉVALUATION DE SÛRETÉ EN PHASE DE CONSTRUCTION, D'EXPLOITATION, DE RÉVERSIBILITÉ ET DE FERMETURE**

Les installations de surface requises pour la construction, l'exploitation et la fermeture d'un stockage, présentées par l'ANDRA dans le tome « *Architecture et gestion du stockage géologique* » [2], se répartissent en plusieurs zones :

- une zone nucléaire, où les colis primaires de déchets sont réceptionnés dans leur emballage de transport, déchargés, entreposés, puis mis en place dans le conteneur ou surconteneur de stockage avant d'être introduits dans une hotte blindée pour leur transfert en stockage,

- une zone industrielle, qui regroupe les ateliers et les installations conventionnelles nécessaires au soutien des travaux souterrains et une zone administrative composée de bureaux et de bâtiments connexes pour le personnel,
- une verse où les déblais sont entreposés.

Les caractéristiques générales de ces installations, décrites dans [2], devraient procurer les fonctionnalités nécessaires à la gestion d'un stockage. Les moyens d'exploitation, en particulier de la zone nucléaire, ne sont, à ce stade du projet, que sommairement exposés, ce qui ne permet pas d'évaluer l'adéquation des dispositions envisagées aux exigences de sûreté des opérations qui seront à réaliser et de protection radiologique des travailleurs et du public. Toutefois, il existe un retour d'expérience important pour des installations analogues. Aussi, l'IRSN estime que les installations de surface ne présentent pas de difficulté particulière et que le savoir faire actuel permettra l'obtention d'un niveau de sûreté satisfaisant de ces installations.

Le présent chapitre concerne donc plus particulièrement les installations souterraines et celles qui les relient aux installations de surface. Il traite successivement du fonctionnement normal de ces installations, de l'analyse des risques et de la gestion réversible du stockage.

## 6.1 FONCTIONNEMENT NORMAL DE L'INSTALLATION

### 6.1.1 ORGANISATION DES ACTIVITÉS DE CONSTRUCTION, D'EXPLOITATION ET DE FERMETURE DU STOCKAGE

Selon l'ANDRA, la conception modulaire du stockage, présentée notamment dans le tome « *Architecture et gestion du stockage géologique* » [2], permet d'envisager l'exploitation d'ouvrages alors que d'autres sont en cours de construction ou ont été fermés. La réalisation progressive du stockage induit ainsi une concomitance d'activités d'exploitation nucléaire (transfert et mise en place des colis ; fermeture) et de génie civil pour la construction des ouvrages (creusement, soutènement, revêtement et équipement). La Figure 30 illustre un exemple possible d'activités simultanées. L'ANDRA précise qu'un seul type d'activité (construction ou exploitation nucléaire) est exercé dans une même unité de stockage.

La séparation des flux de colis, de matériaux et de personnels associés aux travaux de construction d'une part, aux travaux d'exploitation nucléaire d'autre part, repose sur les dispositions suivantes ([2] et lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0207 du 19 septembre 2005) :

- un puits dédié au transfert des colis. Le transfert du personnel et celui des matériaux est assuré par deux autres puits distincts ;
- entre la zone de recette des puits et les sous-zones de stockage, des galeries spécifiques à chaque type d'activité (cf. Figure 30). Un point de contrôle radiologique dans la zone des puits matérialise l'entrée du secteur d'activité nucléaire ;
- au sein d'une même sous-zone de stockage, des barrages en pleine section disposés dans le réseau de galeries de liaison (quatre ou cinq galeries parallèles, recoupées par des galeries perpendiculaires ou « recoupes »). Ces barrages, dont certains sont munis de sas pour le passage du personnel d'exploitation en cas d'évacuation d'urgence, sont déplacés (fréquence annuelle) au fur et à mesure de la progression des différentes activités.

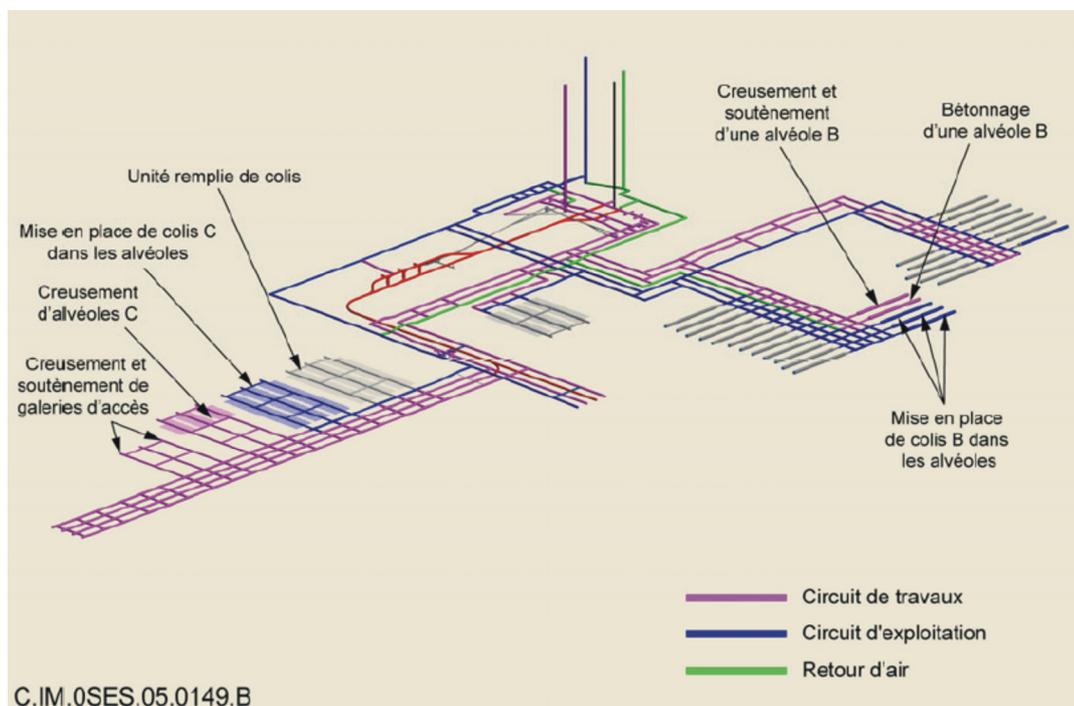


Figure 30 - Séparation des circuits d'exploitation et de travaux de construction [2].

L'ANDRA précise que la zone de recette des puits, essentiellement dédiée à la réception des flux et aux installations de support à l'ensemble des activités, « est une zone complexe, dont la conception doit être approfondie » [2]. Elle pourra être adaptée et optimisée en fonction des options qui seront retenues en matière d'organisation et d'exploitation. Cette zone pourrait abriter des ateliers d'entretien, des magasins, une centrale à béton, des stations de stockage et de distribution de gas-oil, d'huile et d'eau. Certaines de ces installations pourraient également être localisées en surface (ateliers et centrale à béton notamment) ou être réparties dans les infrastructures de liaison. À titre d'exemple, l'utilisation d'une cuve centrale de gas-oil pourrait être combinée à celle de citernes mobiles ou de cuves décentralisées.

En premier lieu, l'IRSN considère que le dimensionnement global des principales infrastructures du stockage (puits, galeries, zones de stockage) ne présente pas de difficulté majeure vis-à-vis de la gestion des principaux flux (colis, déblais d'excavation, béton, remblais...) estimés par l'ANDRA à ce stade du projet (cf. chapitre 4.1 du présent rapport).

En second lieu, l'IRSN considère que le principe de séparation physique des activités de construction et d'exploitation nucléaire au moyen de galeries spécifiques au-delà de la zone de recette des puits est globalement satisfaisant. Les caractéristiques des barrages, sommairement décrites à ce stade du projet, et le cas échéant de leurs fonctions additionnelles, devront cependant être précisées ultérieurement, en tenant compte notamment des exigences de résistance au feu et de radioprotection. L'IRSN estime que cette disposition conceptuelle ne pose a priori pas de difficulté majeure quant à sa faisabilité.

Par ailleurs, l'ANDRA indique que les activités de fermeture qui se dérouleront à proximité des colis de stockage (scellement des alvéoles notamment) relèvent de l'exploitation nucléaire, mais que celles relatives à la fermeture d'ouvrage plus éloignés (scellement et remblayage de galeries par exemple) pourraient être considérées comme des activités non nucléaires. À cet égard, un déclassement d'ouvrages qui ont été utilisés pour l'exploitation

nucléaire pourrait être possible mais devra reposer sur une étude de risques conformément aux exigences de sûreté et de radioprotection. En outre, l'IRSN observe qu'il conviendra de s'assurer dans les études futures d'optimisation des infrastructures, que le réseau de galeries est compatible avec un déclassement partiel de certaines d'entre elles.

Pour ce qui concerne la zone de recette des puits, dont la conception est à un stade préliminaire, l'IRSN observe que l'utilisation d'un même puits pour le transfert de personnels des deux secteurs d'activité, ainsi que la mise en commun de moyens nécessaires au fonctionnement de ces deux secteurs (ateliers, station de stockage de carburant...), implique un passage du personnel et d'engins au point de contrôle radiologique localisé dans la zone de recette souterraine. Par ailleurs, les activités du secteur nucléaire génèrent des déchets (effluents, consommables, matériels usagés) qui, par principe, ne peuvent pas être mélangés avec ceux issus de la zone de construction du fait de leur contamination potentielle. Ces activités de contrôle et les déchets induits n'ont actuellement pas fait l'objet d'études spécifiques de la part de l'ANDRA. L'IRSN estime qu'elles pourraient, selon leur fréquence et leur quantité, être plus difficiles à gérer dans les installations souterraines qu'en surface.

À cet égard, l'IRSN observe que les principes de fonctionnement d'installations de stockage en profondeur existante, ou en projet, dans d'autres pays sont variés. Par exemple, un transfert du personnel d'exploitation nucléaire séparé de celui du personnel du secteur de construction est envisagé dans certains cas (projets « Argiles à Opalines » en Suisse et « Olkiluoto » en Finlande), alors qu'un transfert commun est retenu dans d'autres cas (projet « Konrad » en Allemagne, installation WIPP<sup>18</sup> en opération aux États-unis). L'ouvrage de transfert des colis, qu'il s'agisse d'un puits ou d'une descenderie, est strictement affecté à cette seule fonction (« Olkiluoto », « Konrad ») ou est aussi utilisé pour le transfert de personnels (installations arrêtée ERAM<sup>19</sup> en Allemagne, WIPP, projet « Argiles à Opalines »). Le point de contrôle radiologique est implanté en surface (ERAM, WIPP) ; un contrôle est également possible dans les installations souterraines (WIPP). L'IRSN constate que le projet développé par l'ANDRA comporte des similitudes avec des installations existantes, ou en projet, mais que, contrairement à certaines d'entre elles, l'ANDRA ne retient pas une continuité de la séparation des deux secteurs d'activité depuis la surface jusqu'en profondeur. Toutefois, l'IRSN souligne que chaque installation comporte des spécificités (nature, radioactivité et nombre de colis ; type, positionnement et nombre de liaisons jour-fond) qui peuvent conduire à des choix différents en terme de séparation des deux types d'activité. Aussi, l'IRSN ne préjuge pas de la nécessité de modifier à ce stade l'orientation prise par l'ANDRA sur ce point. L'IRSN considère néanmoins qu'il conviendra de s'assurer dans une phase ultérieure d'optimisation tenant compte de l'ensemble des contraintes liées aux opérations d'exploitation et de construction (en particulier la définition du zonage radiologique de l'ensemble des installations de surface et souterraines, les dispositions de contrôle radiologique associées ainsi que la gestion des déchets secondaires issus du secteur d'activité nucléaire), que l'option de séparer de manière continue les activités nucléaire et non nucléaire depuis la surface ne procure pas de gain significatif sur la sûreté opérationnelle et la protection radiologique des travailleurs par rapport aux dispositions actuellement envisagées.

**En conclusion, l'IRSN estime qu'il devrait être possible de séparer les activités de construction et d'exploitation nucléaire selon les principes généraux retenus par l'ANDRA. Le schéma de principe de séparation devra toutefois être précisé, et le cas échéant ajusté, afin de tenir compte notamment des contraintes associées au contrôle radiologique du personnel et des équipements et à la gestion des déchets induits.**

---

<sup>18</sup> Waste isolation pilot plant.

<sup>19</sup> Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben.

## 6.1.2 SYSTÈME DE VENTILATION

Le principe de conception retenu par l'ANDRA [2] pour la ventilation des installations souterraines, schématisé en Figure 31, consiste en :

- un circuit de ventilation assuré par des ventilateurs situés en surface. L'entrée d'air frais de la zone de construction et de la zone d'exploitation nucléaire est assurée par des ventilateurs soufflants en tête du puits de transfert du personnel et du puits de transfert des matériaux. L'entrée d'air frais de la zone du puits de transfert des colis est assurée par des ventilateurs aspirants situés en surface au niveau du puits de retour d'air. Les arrivées d'air frais sont ainsi en surpression par rapport au retour d'air et au désenfumage ;
- une arrivée d'air en pleine section de galeries et un retour dans des galeries dédiées ou des gaines situées en voûte des galeries (cf. Figure 32). Les gaines sont munies de trappes permettant l'aspiration des fumées en cas d'incendie ;
- une séparation des circuits de ventilation. La zone d'exploitation nucléaire dispose d'une alimentation en air frais indépendante de celle de la zone de construction. Les circuits de retour d'air et de désenfumage peuvent être communs aux deux types de zone « du fait de l'absence de risque de dissémination de substances radioactives dans les procédés d'exploitation nucléaire ». Par ailleurs, le puits de transfert des colis constitue avec le puits de retour d'air muni d'une gaine intérieure spécifique, un circuit séparé des autres circuits de ventilation, « afin de se prémunir des conséquences d'une chute de colis dans le puits ». Il est isolé des installations de surface et des galeries souterraines par des sas.

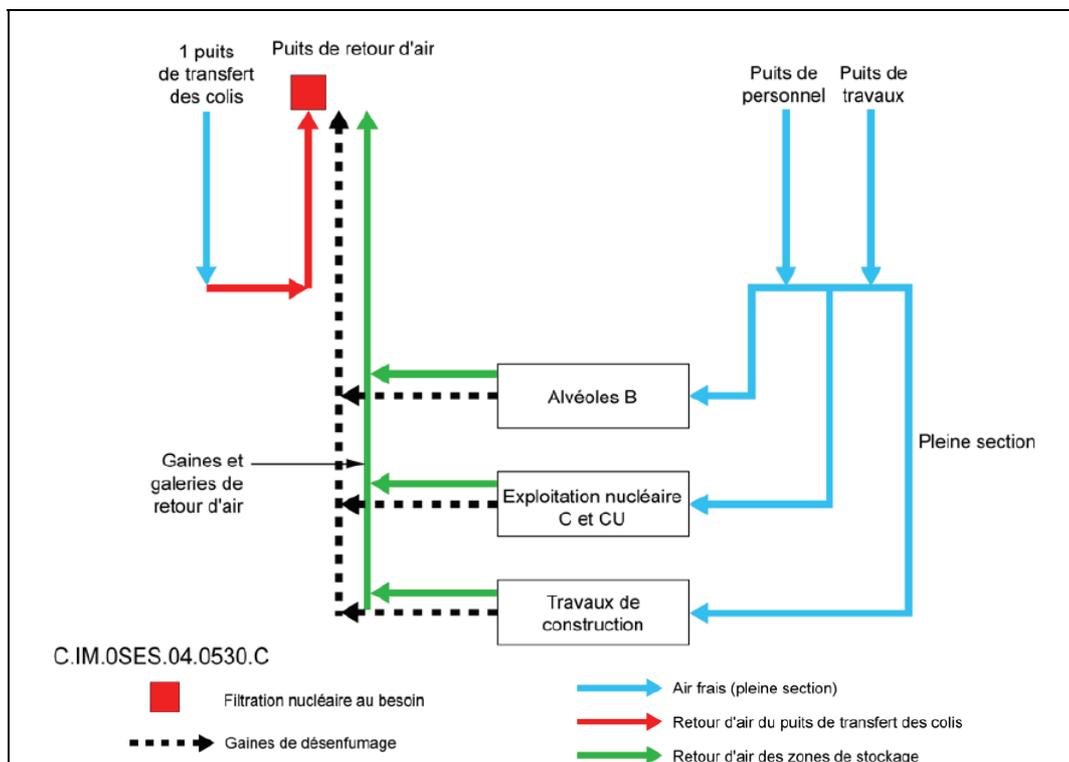


Figure 31 - Principe de ventilation [2].

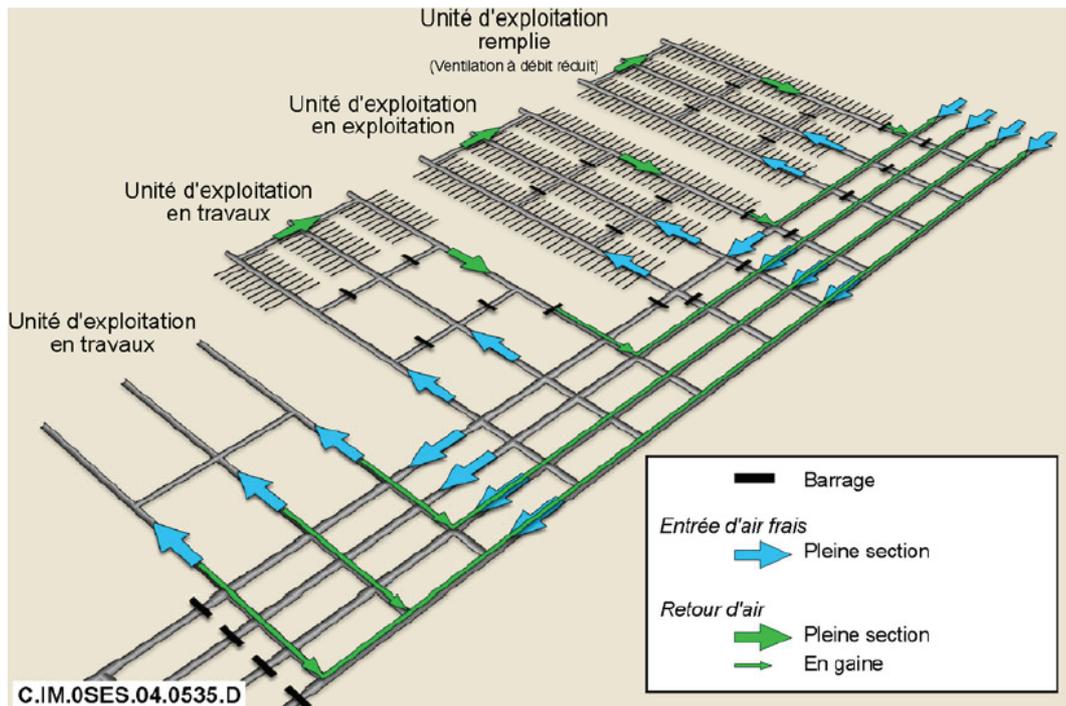
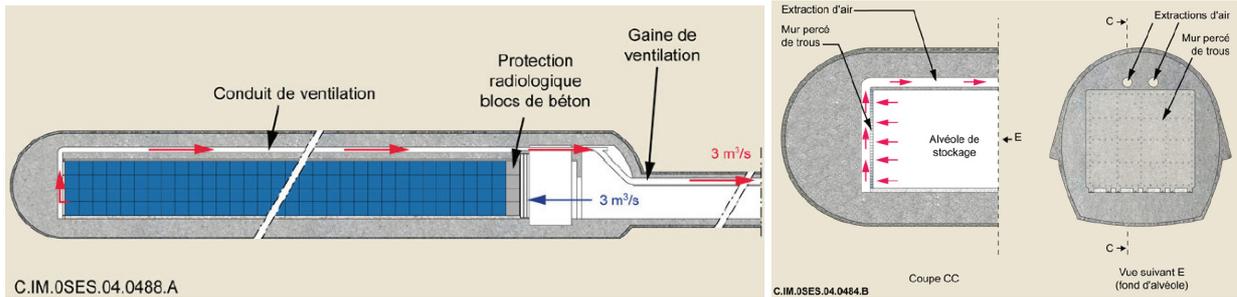


Figure 32 - Principe de ventilation d'une sous-zone de stockage de déchets C [2].

Le réseau de ventilation souterrain évolue au fur et à mesure de la progression des activités de construction et d'exploitation nucléaire, comme l'illustre la Figure 32. L'ANDRA indique [2] que l'architecture arborescente du stockage conduirait à réaliser de longues galeries borgnes (jusqu'à plusieurs kilomètres) qui génèrent de fortes pertes de charges aérauliques, prises en compte dans la conception. La lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0207 du 19 septembre 2005 précise que le dimensionnement du système de ventilation respecte divers critères parmi lesquels l'évacuation des poussières, la dilution des gaz d'échappement, les conditions de travail et la stabilité du système d'aéragé.

L'estimation préliminaire de besoin en ventilation effectuée par l'ANDRA conduit à un débit d'ensemble de 500 à 650 m<sup>3</sup>/s (selon les hypothèses retenues sur le nombre et la puissance thermique des déchets à stocker). Les débits envisagés sont de 10 m<sup>3</sup>/s minimum dans les galeries de transfert de colis et de 2 m<sup>3</sup>/s dans les galeries d'accès des unités de stockage de déchets C ou de combustibles usés déjà remplies, pour que celles-ci soient en légère dépression. L'ANDRA précise, dans la lettre précitée, qu'une intervention dans ces galeries d'accès pourrait nécessiter d'augmenter le débit d'aéragé ou de refroidir l'air compte tenu de l'élévation de température générée par la présence de colis exothermiques à proximité. En condition accidentelle, les débits de désenfumage sont dimensionnés à 50 m<sup>3</sup>/s et 80 m<sup>3</sup>/s respectivement pour les galeries de transfert des colis et les galeries de travaux de construction (en fonction de la puissance des incendies susceptibles de s'y produire).

Les seuls alvéoles de stockage que l'ANDRA prévoit de ventiler sont les alvéoles de déchets B qui relâchent de l'hydrogène et des gaz radioactifs. Le principe retenu par l'ANDRA pour assurer une répartition homogène de la ventilation dans l'alvéole, illustré par la Figure 33, repose sur le passage de l'air à travers un système de forte résistance aéraulique muni d'orifices répartis de façon uniforme (« effet de plenum ») : en tête d'alvéole, des chicanes verticales sur toute la hauteur des portes coulissantes du sas et en fond d'alvéole, un mur percé de trous. Le retour d'air s'effectue par deux conduits de ventilation ménagés dans le béton de remplissage puis par une gaine qui rejoint le système de retour d'air général. L'ANDRA indique qu'un débit d'air de 3 m<sup>3</sup>/s permet une dilution suffisante des gaz dans un alvéole en cours de remplissage ou rempli.



**Figure 33 - Principe de ventilation d'un alvéole de déchet B [2]. Coupe longitudinale d'un alvéole en attente de scellement (à gauche). Coupe longitudinale et section du fond d'un alvéole vide (à droite).**

De façon globale, l'IRSN considère que les ordres de grandeur des débits d'air retenus par l'ANDRA semblent en première approximation suffisants pour permettre de gérer les contraintes de ventilation des installations (normes de confort pour le personnel, stabilité du système d'aéragé...). Néanmoins, l'IRSN estime que le nombre important de galeries, leur longueur évolutive au cours du temps et leur caractère borgne, ainsi que les différents débits d'air requis en divers points de l'architecture constituent un système aéraulique complexe. Les éléments préliminaires présentés par l'ANDRA relatifs à la ventilation de ces infrastructures souterraines conduisent l'IRSN à émettre des réserves, notamment sur les aspects suivants :

- l'adéquation du seul système de ventilateurs implantés en tête de puits pour assurer une ventilation satisfaisante des infrastructures souterraines, du fait notamment des réglages nécessaires lors de la progression des secteurs de construction et d'exploitation nucléaire. L'IRSN estime que des adaptations seront très probablement nécessaires, en particulier la mise en place de systèmes relais dans les installations souterraines et qu'il conviendra, dans une étape ultérieure du projet, de préciser les dispositions qui permettront de maintenir une répartition de l'air dans les galeries ainsi que les débits requis, en tenant compte de l'évolution spatiale et temporelle des infrastructures souterraines. À cet égard, l'ANDRA a indiqué au cours de l'instruction (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0207 du 19 septembre 2005) que l'installation de ventilateurs d'appoint est envisagée, en complément d'autres dispositifs permettant d'ajuster les paramètres de ventilation (registres, vitesses des pales des ventilateurs principaux...);
- les conséquences potentielles du principe de retour d'air commun au secteur de construction et d'exploitation, en cas de perte temporaire de ventilation. En premier lieu, l'IRSN souligne qu'une perte de ventilation constitue un dysfonctionnement dont l'occurrence ne peut être considérée comme exceptionnelle (au vu du retour d'expérience des installations nucléaires existantes). Cette situation peut conduire à une inversion de pression dans le circuit de ventilation. En second lieu, bien que le risque de dissémination de matières radioactives puisse raisonnablement être considéré comme faible, l'IRSN considère qu'une contamination atmosphérique ne peut pas être totalement exclue dans le secteur d'activité nucléaire et dans le réseau de retour d'air de ce secteur. En effet, les colis de stockage de déchets B relâchent de faibles quantités de gaz radioactifs. Le transfert des colis de déchets C et de combustibles usés pourrait constituer une autre source potentielle de contamination. À cet égard, l'IRSN signale qu'une contamination surfacique a été constatée dans quelques cas en surface extérieure des emballages de transport de colis. Une longue période d'exploitation pourrait de plus conduire à l'accumulation d'une contamination surfacique dans le réseau de retour d'air. Enfin, une perte accidentelle de confinement des colis (risques de chute) ne peut pas être totalement écartée à ce stade du projet, comme indiqué au chapitre 6.2.1.1 du présent rapport. Aussi, l'IRSN considère qu'une perte de ventilation qui conduirait à une inversion de pression et donc un risque de contamination du secteur de construction par l'air du secteur d'exploitation ne peut pas être exclue à ce stade du projet. Par ailleurs, l'atmosphère dans la zone de construction est susceptible d'être chargée en poussières, dont il convient de limiter le transfert vers la zone d'exploitation. **Aussi, l'IRSN considère qu'il sera nécessaire de**

préciser, dans les étapes futures du projet, les dispositions prises pour éviter des transferts d'air entre la zone en exploitation et la zone en construction via les gaines ou les galeries de retour d'air, lors d'un arrêt de la ventilation ;

- la ventilation des alvéoles de stockage de déchets B, qui revêt une importance particulière au regard de la gestion des gaz (cf. notamment le risque d'explosion, examiné ci-après au chapitre 6.2.1.2). L'IRSN note que l'ANDRA a retenu un principe de ventilation basé sur un « effet de plenum » et convient que ce principe tend à favoriser une bonne répartition de l'air dans l'alvéole. Toutefois, l'IRSN signale, d'une part qu'il n'existe pas d'ouvrage analogue du point de vue aéraulique (en terme notamment de dimensions et de configuration de remplissage), d'autre part que les simulations aérauliques sont peu fiables si elles ne s'appuient pas sur des essais représentatifs effectués à une échelle transposable aux dimensions réelles de l'ouvrage. Il n'est donc pas possible en l'état actuel des connaissances de statuer sur l'efficacité du principe de ventilation retenu par l'ANDRA, et en particulier d'exclure la possibilité de « zones mortes » au sein de ce type d'ouvrage. Aussi, l'IRSN considère que l'efficacité du système de ventilation des alvéoles de déchets B devra faire l'objet de tests et qu'il conviendra d'identifier notamment sur cette base, si des adaptations de concept (dimensions, configuration de remplissage) sont nécessaires.

### 6.1.3 SYSTÈME DE TRANSFERT ET DE MANUTENTION DES COLIS

La manutention des colis de stockage, toute catégorie confondue (B, C et combustibles usés), nécessite une protection radiologique pour le personnel compte tenu du débit d'équivalent de dose résiduel de ces colis. Le principe retenu par l'ANDRA [2] consiste à introduire chaque colis dans une hotte blindée au niveau des installations de surface. La hotte est transférée jusqu'à l'entrée de l'alvéole de stockage au niveau de laquelle le colis de stockage est extrait et mis en place dans l'alvéole. L'ANDRA [2] [31] présente les différents principes de manutention qu'elle a identifiés puis explicite les raisons des choix effectués à ce stade du projet. Les systèmes retenus pour le transfert en puits, en galeries, et la mise en alvéole sont examinés ci-après.

#### Le transfert des colis de stockage en puits

La solution de référence retenue par l'ANDRA à ce stade du projet pour transférer les colis de la surface vers les installations souterraines est l'utilisation d'un puits. Le recours à une descenderie n'est considéré qu'à titre de variante et n'est pas évalué dans le présent rapport.

L'équipement du puits comprend un système à friction « Koepe » constitué d'une poulie motorisée autour de laquelle sont suspendus deux mobiles (la cage transportant le colis et son contrepoids) par l'intermédiaire de câbles (dix câbles de 70 mm de diamètre) équilibrés par d'autres câbles attelés au fond des deux mobiles. Le système est dimensionné pour permettre le transfert d'une charge utile de 110 tonnes (charge suspendue de 300 tonnes) à une vitesse de 1 m/s. La sécurité de cet équipement est assurée par quatre dispositifs indépendants, schématisés par la Figure 34 :

- un système de freinage par freins à disques qui agit directement sur la poulie, avec deux circuits indépendants (frein de service statique et frein de sécurité dynamique),
- un système anti-chute permettant d'immobiliser la cage sur des câbles spécifiques,
- deux systèmes de freinage de fin de course installés dans la tour en surface et sous la recette fond, qui permettent d'arrêter la cage en cas de dépassement de sa course normale, par déformation de profilés métalliques qui absorbent l'énergie cinétique de la cage (système « SELDA »),

- un système amortisseur de chute passif, constitué d'un matériau de type « nid d'abeilles », placé en partie inférieure du puits.

L'ANDRA indique que les systèmes antichute et amortisseur de chute nécessitent des études complémentaires compte tenu de la masse transportée. Par ailleurs, l'ANDRA précise que le fonctionnement de l'équipement du puits est entièrement automatique. Aucune personne ne se trouve dans la cage ni dans les sas fermés de surface et de fond au moment de la descente d'un colis.

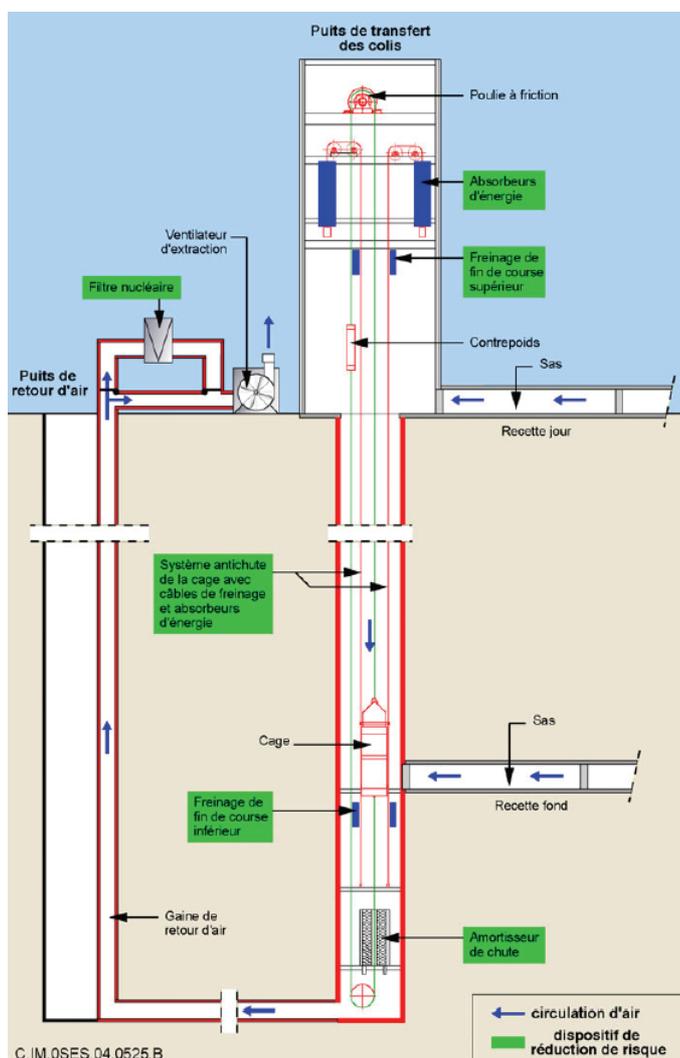


Figure 34 - Système de sécurité du puits de transfert des colis [2].

L'IRSN constate que le processus de transfert des colis en puits retenu par l'ANDRA résulte d'une transposition des pratiques industrielles éprouvées en contexte minier et du retour d'expérience de l'exploitation du stockage souterrain du WIPP. L'IRSN convient de la fiabilité de la technologie « Koepe » et des systèmes de freinage au regard du risque de chute de cage. Le besoin d'adaptation lié notamment à la masse importante de la charge à transporter (colis + hotte) a bien été identifié par l'ANDRA. À cet égard, selon l'étude réalisée par GRS<sup>20</sup> pour le compte de l'IRSN, les études réalisées en Allemagne par le DBE<sup>21</sup> (sur la base de tests en puits) permettent de considérer que la démonstration de la sûreté de systèmes de transfert de charges, comparables (85 tonnes) à celles envisagées par l'ANDRA, est accessible. L'IRSN souligne toutefois que les systèmes antichute et amortisseur

<sup>20</sup> Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.

<sup>21</sup> Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH.

de chute, sommairement décrits dans le Dossier 2005, ne sont pas des systèmes utilisés de façon conventionnelle dans les mines. Il s'agit de systèmes nouveaux développés par l'ANDRA, dont l'efficacité n'est pas encore démontrée. Aussi, l'IRSN considère en première approche que les dispositions envisagées par l'ANDRA ne présentent pas d'obstacle au transfert des colis en puits. L'IRSN estime néanmoins que des études complémentaires seront indispensables afin de démontrer l'efficacité des dispositifs envisagés. Ce point est repris au chapitre 6.2.1.1 du présent rapport relatif à l'évaluation du risque de chute de colis au cours de leur transfert en puits.

#### Le transfert des colis dans les galeries jusqu'à l'entrée des alvéoles

L'ANDRA [2] indique que le processus de transfert dans les installations souterraines vise notamment à minimiser la dimension des galeries et des ouvrages de croisement. À ce stade des études, l'ANDRA privilégie un transfert des colis en deux étapes, illustrées par la Figure 35. La première étape consiste à transférer la hotte depuis la cage du puits au travers du réseau de galeries jusqu'à un quai d'échange à proximité de l'alvéole de stockage. Ce transfert est réalisé à l'aide d'un « *véhicule de transfert* » capable de transporter des charges lourdes sur de longues distances. La deuxième étape est effectuée par une « *navette d'accostage* » utilisée sur de courtes distances pour reprendre la hotte et l'accoster sur la tête de l'alvéole. L'ANDRA expose les avantages de ce processus en deux étapes (réduction de l'encombrement, véhicule de transfert disponible pendant les opérations de mise en place des colis, mécanique d'accostage transportée sur de faibles distances). L'IRSN n'a pas de commentaire particulier sur ces avantages mais observe qu'une rupture de chaîne est par nature susceptible d'augmenter le risque d'incidents. Aussi, l'IRSN considère qu'il conviendra que l'ANDRA examine la pertinence des options envisagées à ce stade du projet au regard de ce risque. À cet égard, l'ANDRA précise que « *la pertinence d'une rupture de charge imposée par l'utilisation de deux véhicules pourrait éventuellement faire l'objet d'un réexamen* » [2].



Figure 35 - Transfert d'une hotte de déchets C [2] et accostage de la hotte par la navette sur la tête d'alvéole [32].

Les engins de transfert et d'accostage sont des engins surbaissés de type auto-élévateur automoteur électrique sur pneumatiques, qui possèdent un rayon de braquage très court (roues multidirectionnelles). L'ANDRA souligne que ce type de véhicule correspond à une technique existante largement éprouvée notamment en contexte nucléaire. À chaque type de hotte (B, C et combustibles usés) correspond un véhicule de transfert et une navette d'accostage dédiées, en raison notamment des spécificités de dimensions et de processus d'accostage. Ces engins de transferts sont conduits par un chauffeur situé dans une cabine dotée de vitres blindées, en complément de la protection apportée par la hotte. L'ANDRA précise que les galeries de liaison ne sont pas dimensionnées pour permettre le croisement d'un engin de transfert des colis avec un autre véhicule. Cela est envisageable du fait d'un trafic faible (une dizaine de trajets par jour), de faibles vitesses de circulation des engins de transfert des colis (5 à 10 km/h) et d'une circulation de personnel dans ces galeries strictement limitée.

L'IRSN convient que ce type de véhicules de manutention bénéficie d'un large retour d'expérience et ne nécessite pas de développement nouveau majeur. L'IRSN constate que le transfert en galeries s'opère dans un réseau sans inclinaison importante, majoritairement en ligne droite, avec un croisement possible de véhicule restreint aux intersections de galeries. Le procédé de manutention limite de plus les hauteurs de manutention, ce qui permet de réduire le risque de chute dommageable pour les colis (cf. chapitre 6.2.1.1). **Aussi, l'IRSN considère que le système de transfert des colis dans les galeries de liaison et les galeries d'accès aux alvéoles n'appelle pas, dans son principe, de commentaire de l'IRSN.**

La conduite des équipements d'exploitation nucléaire sous le contrôle d'un opérateur situé dans une cabine embarquée sur le véhicule est privilégiée par l'ANDRA, alors que les principes de radioprotection tendent plutôt vers une généralisation autant que possible du principe de commande à distance sans présence humaine à proximité. À cet égard, l'ANDRA a indiqué au cours de l'instruction (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0207 précitée) que *« la conduite des équipements d'exploitation nucléaire n'a pas fait l'objet, à ce stade, d'une étude approfondie »*. Le principe retenu *« présente l'avantage de l'automatisme qui permet de maintenir le personnel à une certaine distance vis-à-vis de l'exposition aux débits de dose résiduels tout en nécessitant une validation manuelle du bon accomplissement des cycles élémentaires. [...] Cette logique, retenue à ce stade des études pour sa simplicité, ne constitue cependant pas une solution figée. [...] Il pourrait être envisagée une architecture du contrôle commande faisant une plus grande part à des automatismes complets »*. **L'IRSN considère qu'il conviendra, dans le cadre des futures études d'optimisation, d'examiner les adaptations possibles des procédés de transfert et d'accostage au regard des gains éventuellement réalisables en terme de radioprotection.**

#### La mise en place des colis dans les alvéoles

L'ANDRA souligne que *« le choix de la solution privilégiée à ce stade des études résulte de considérations de robustesse, de minimisation du gabarit des engins pénétrant dans les alvéoles et de réduction des vides résiduels après la mise en place des colis »* [2]. Dans les trois configurations étudiées (déchets B, déchets C et combustibles usés), un engin unique assure l'extraction du colis de la hotte et sa mise en place dans l'alvéole. L'ANDRA précise que le processus peut être inversé pour retirer les colis des alvéoles, le cas échéant. Les moyens et procédés exposés par l'ANDRA [2] [31] sont les suivants.

Dans le cas des déchets B, l'engin retenu est un chariot élévateur sans contrepoids appelé « stockeur », caractérisé par un centre de gravité de la charge qui reste à l'intérieur du polygone de sustentation formé par les roues (cf. Figure 36). Sa masse est du même ordre de grandeur que celle de la charge à soulever (environ 25 tonnes). Son alimentation en énergie pourrait se faire par des batteries embarquées. Le cycle de mise en stockage d'un colis B se décompose en plusieurs étapes. Le stockeur extrait tout d'abord le colis de la hotte accostée par la navette sur la porte guichet du sas de l'alvéole. Après fermeture du guichet d'accostage, un plancher mobile fait subir au stockeur une rotation de 180° et le translate face à la rangée de stockage sélectionnée. Le stockeur pénètre dans l'alvéole après ouverture de portes coulissantes du sas. Pendant le trajet dans la chambre de stockage, le colis est en position basse. Il est soulevé le cas échéant à proximité du front de colis déjà stockés puis déposé à très petite vitesse. Le stockeur revient ensuite en marche arrière dans le sas.

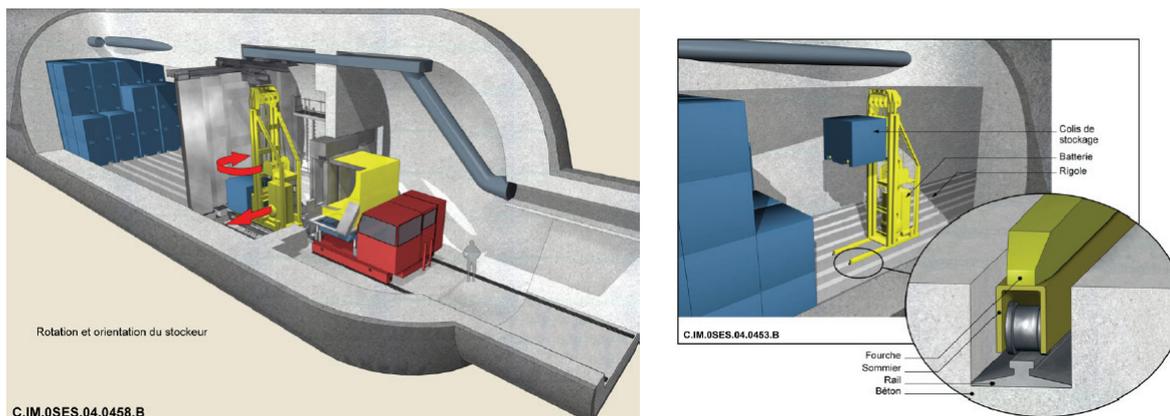


Figure 36 - Mise en alvéole d'un colis de stockage de déchets B [2]. Rotation et translation du stockeur dans le sas ; manutention du colis à proximité de sa position finale.

Dans le cas des déchets C, l'option privilégiée par l'ANDRA est un robot pousseur intégré dans l'enceinte blindée de la hotte de transfert (cf. Figure 37). La poussée est exercée par un vérin hydraulique axial. La reprise d'effort est réalisée par des vérins radiaux qui s'appuient sur le chemisage. Le robot muni de galets de roulement avance par rétraction du vérin de poussée. Le cycle de mise en place d'un colis débute par l'accostage de la hotte sur l'operculaire de la tête d'alvéole. L'ouverture de la porte de la hotte actionne celle de l'operculaire de l'alvéole. Le colis de stockage est alors transféré « pas à pas » jusqu'à sa position finale dans l'alvéole par le robot pousseur relié à la hotte par un ombilical (câble et flexibles hydrauliques qui alimentent le robot en eau déminéralisée). Le robot est ensuite ramené dans la hotte à l'aide d'un treuil de rappel implanté sur l'embase extérieure de la hotte, puis les portes de l'operculaire et de la hotte sont refermées.

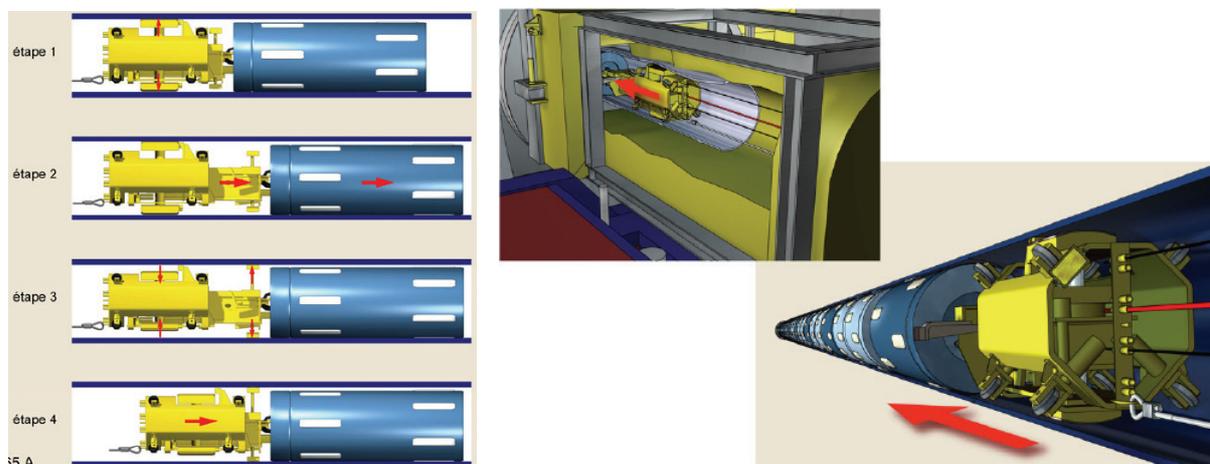
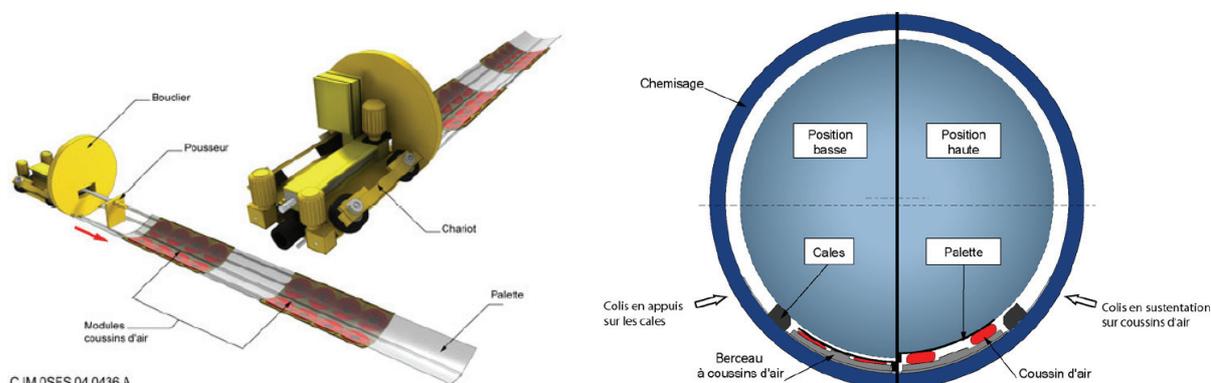


Figure 37 - Mise en alvéole d'un colis de stockage de déchets C [2]. Principe de fonctionnement du robot pousseur et illustration du processus d'extraction de la hotte et de mise en place du colis dans l'alvéole.

Pour ce qui concerne les combustibles usés, l'ANDRA indique que le principe privilégié pour la mise en alvéole de colis de petit diamètre (type CU2, CU3) est similaire à celui présenté pour les colis C. Dans le cas de colis à quatre assemblages (type CU1), une manutention par un robot aéroporteur est préférée. L'aéroporteur est constitué d'un chariot électrique et d'un berceau porteur de modules de coussins d'air (cf. Figure 38). Le berceau est positionné sous le colis de stockage dans l'espace ménagé par des rails fixés sur le chemisage de l'alvéole. Le gonflement des modules de coussins d'air (pression d'environ 4 bars) décolle la charge de ses appuis. L'air s'échappe ensuite pour former une lame d'air (quelques dixièmes de millimètre) assurant la sustentation du colis. Celui-ci peut alors être déplacé avec peu d'effort. Le chariot possède une structure roulante qui assure le déplacement de l'aéroporteur à vide, et d'un vérin mécanique qui déplace le colis lorsque celui-ci est en sustentation. La masse du chariot et l'adhérence de ses galets de roulement sur le chemisage de l'alvéole permettent de reprendre l'effort de poussée

lorsque le vérin est activé. Un ombilical (câble et flexibles pneumatiques) relie le chariot aux équipements solidaires de la hotte qui l'alimentent en air et en électricité. Le cycle de mise en stockage d'un colis de type CU1 est réalisé selon les mêmes étapes que celles décrites pour les déchets C.



**Figure 38 - Mise en alvéole d'un colis de stockage de combustibles usés (type CU1) [2]. Schématisation d'un aéroporteur et principe de fonctionnement des coussins d'air.**

L'ANDRA précise que, dans les trois cas (B, C et CU), l'ensemble des opérations est réalisé de façon semi-automatique, par une succession d'étapes élémentaires validées manuellement par un opérateur qui contrôle l'ensemble du processus depuis la cabine de la navette d'accostage. La maîtrise de la position de stockage est réalisée à l'aide d'un système « distancemètre laser ». Le temps pour réaliser un cycle de mise en place d'un colis de déchet B sur une distance d'environ 120 mètres est estimé à 2 heures. Il est du même ordre de grandeur pour le cycle de mise en place d'un colis C ou CU sur une distance d'environ 20 m (respectivement 2 et 3 heures). La fonction de radioprotection du personnel pendant la mise en œuvre de l'ensemble du processus est assurée par la hotte de protection et l'équipement fixe de la tête de l'alvéole sur lequel la hotte est accostée.

L'ANDRA prévoit également ([31] complété par la lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-207 du 19 septembre 2005) des dispositions de secours dans le cas de panne affectant les équipements de mise en place des colis. De façon générale, l'ANDRA indique que ces derniers sont conçus pour que l'opération en cours puisse être terminée en sécurité et qu'une intervention de réparation soit possible en offrant au personnel des conditions de radioprotection optimales. Parmi les dispositions mentionnées par l'ANDRA et à titre d'exemple, le stockeur de colis de déchets B est doté de deux treuils indépendants et redondants. Un chariot « dormant » installé au fond de l'alvéole dans les réservations aménagées pour les sommiers du stockeur, muni d'un câble de traction relié à un treuil positionné en tête d'alvéole, permet de rapatrier le stockeur si besoin. En cas de blocage d'un colis C ou de combustibles usés dans le chemisage, celui-ci serait désolidarisé du pousseur ou de l'aéroporteur ramené dans la hotte, puis un autre équipement de plus grande capacité de traction pourrait être utilisé [32].

Des tests contribuant à la validation des technologies retenues ont été effectués. À cet égard, l'ANDRA précise que le principe de poussée par glissement retenu pour la mise en place des déchets C bénéficie du retour d'expérience de deux essais réalisés par l'ONDRAF et par l'ANDRA, qui « ont montré que le point clé réside dans la nature du contact entre le colis et le chemisage. En particulier, les contacts de type « métal sur métal » sont à proscrire. [...] La prise en compte de cette difficulté a conduit à envisager l'utilisation de patins de glissement en céramique intégrés sur le colis » [2]. L'ANDRA ajoute que des tests complémentaires sont réalisés dans le cadre du projet européen ESDRED<sup>22</sup> coordonné par l'ANDRA. Des essais relatifs au principe de patins de glissement en céramique (colis de déchets C et colis de type CU2 et CU3) ont montré l'intérêt de tels patins. D'autres essais ont confirmé le bon fonctionnement du principe de berceau de coussins d'air (colis de type CU1) en configuration « nominale » et « dégradée » (dysfonctionnement d'un coussin d'air, défauts géométriques du chemisage). Le projet ESDRED

<sup>22</sup> Engineering studies and demonstration of repository designs.

comporte également un démonstrateur complet à l'échelle 1 pour chacun de ces deux types de processus de mise en alvéole. Chaque démonstrateur consiste en un tube d'une vingtaine de mètres simulant le chemisage de l'alvéole, un colis factice (équipé de patins le cas échéant), de même masse et dimensions qu'un colis réel, et un robot prototype (pousseur ou aéroporteur selon le démonstrateur). Des défauts géométriques et des obstacles sur le tube sont créés pour valider le bon fonctionnement du processus de transfert du colis. Un dispositif permet de simuler l'accostage de la hotte sur la tête d'alvéole, de tester des défauts d'alignement et de définir les limites de fonctionnement pour l'extraction et l'introduction du colis en tête d'alvéole. La lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-207 du 19 septembre 2005 précise que ces démonstrateurs sont en cours de fabrication et que les équipements de mise en alvéole de déchets B pourraient aussi être testés par une démonstration technologique en atelier de surface ou en souterrain. Enfin, l'ANDRA mentionne l'équipement analogue envisagé dans l'installation de stockage du WIPP pour la mise en place par robot pousseur de colis irradiants en tunnels courts horizontaux de faible diamètre, et les études effectuées par l'agence suédoise SKB<sup>23</sup> qui envisage le recours à la technologie du coussin de fluide pour la mise en place en tunnel horizontal de conteneurs de combustibles usés enveloppés par des anneaux de bentonite.

L'IRSN note que les études de conception menées par l'ANDRA identifient les principales caractéristiques de moyens et procédés qui pourraient être utilisés pour la mise en place des colis de stockage dans les alvéoles, de façon compatible avec les concepts retenus (dimensions des ouvrages, masse des colis, précisions des déplacements, alvéoles irradiantes...). L'IRSN constate que l'ANDRA se base sur le retour d'expérience disponible issu d'installations nucléaires (WIPP et Konrad notamment) et a recours à des technologies mises en œuvre dans l'industrie pour développer les adaptations nécessaires au présent projet. L'IRSN considère que cette démarche, appuyée par une analyse comparative de différentes solutions possibles, confère une certaine crédibilité aux systèmes de manutentions retenus. Toutefois, l'IRSN souligne que le retour d'expérience invoqué concerne des conditions d'opérations présentant des différences notables avec celles envisagées par l'ANDRA. En particulier, l'IRSN observe que dans le cas du WIPP, l'utilisation d'un robot pousseur est envisagée pour la mise en place d'un seul colis par alvéole. Par ailleurs, le retour d'expérience industriel dans des conditions se rapprochant de celles envisagées par l'ANDRA est inexistant pour la mise en place de colis à l'horizontale sur des distances décamétriques (jusqu'à une trentaine de mètres). L'IRSN observe que la mise en place de colis dans les stockages de surface ou les entreposages est généralement effectuée à la verticale au moyen de ponts roulants dont la fiabilité est éprouvée. Il reste toutefois que les concepts envisagés par l'ANDRA, qui contraignent le développement d'équipements de manutention dont l'efficacité et la fiabilité restent à démontrer, présentent certains avantages pour la sûreté du stockage (chapitre 7 du présent rapport). Aussi, l'IRSN n'a pas d'opposition de principe sur les orientations prises par l'ANDRA en matière de manutention des colis dans les alvéoles, mais ne peut se prononcer aujourd'hui sur l'adéquation des moyens retenus aux exigences de sûreté opérationnelle. **L'IRSN considère que cette démonstration nécessitera de réaliser, in situ, un démonstrateur d'alvéoles de déchets C et de CU afin de qualifier les systèmes de mise en place compte tenu notamment des exigences que pourraient entraîner la possibilité d'un retrait aisé des colis sur des durées longues (cf. chapitre 6.3 relatif à la réversibilité).**

L'IRSN note que l'ANDRA a déjà réalisé des tests (patins de céramique, aéroporteur pour les colis de type CU1...) et qu'une campagne de validation est inscrite dans les perspectives tracées par l'ANDRA. En outre, l'IRSN note que l'ANDRA a bien tenu compte dans ces tests de possibles dysfonctionnements et a mené une première réflexion sur les solutions envisageables pour remédier à diverses situations possibles.

---

<sup>23</sup> Svensk Kärnbränslehantering AB.

## 6.1.4 ÉVALUATION DOSIMÉTRIQUE

L'ANDRA [2] présente une évaluation dosimétrique « préliminaire » en exploitation des installations, pour le personnel travaillant en zone nucléaire et pour le public en limite de site. Cette évaluation considère les risques d'exposition externe (irradiation relative aux colis primaires) et d'exposition interne (inhalation de gaz et d'aérosols radioactifs émis par certains colis de déchets B et de radon émis par le milieu géologique). Pour la phase d'exploitation, l'ANDRA a retenu comme objectif de radioprotection une dose annuelle individuelle inférieure à 5 mSv pour le personnel travaillant en zone nucléaire et inférieure à 0,25 mSv pour le public.

Pour ce qui concerne les travailleurs, les principales dispositions de radioprotection prévues par l'ANDRA consistent notamment en l'interposition d'écrans de protection radiologique entre les sources radioactives (colis primaires) et les personnes pendant toutes les opérations de transfert des colis jusqu'à leur mise en alvéole de stockage. Les hottes de transfert des colis de stockage, les operculaires des alvéoles C et CU ainsi que les portes du sas des alvéoles B tiennent ce rôle. La protection ou l'éloignement du poste de commande des engins utilisés pour le transfert ou pour l'introduction des colis en alvéole contribuent aussi à diminuer les doses reçues par le personnel. La mise en place d'écrans de protection définitifs lors des opérations de fermeture d'un alvéole est également prévue (blocs de béton pour les alvéoles B, bouchons métalliques pour les alvéoles C et CU). En outre, l'ANDRA indique que des contrôles de non-contamination des colis et des hottes seront réalisés systématiquement et que des mesures de surveillances seront mises en œuvre.

L'évaluation dosimétrique pour le personnel affecté aux installations nucléaires souterraines est réalisée pour différents postes de travail (transfert des colis, pose des bouchons des alvéoles, contrôle de hottes de transfert...) et le cas échéant pour les différents types de colis (B, C et CU). Les doses les plus importantes sont associées aux opérations de transfert et de mise en alvéole des colis de stockage CU (4 mSv/an) ainsi qu'à la surveillance et à la maintenance des installations (2,2 mSv/an). L'ANDRA indique que ces résultats préliminaires ne tiennent pas compte d'une démarche ultérieure d'optimisation.

Pour le public en limite de site (à 500 m des installations de surface), l'ANDRA ne retient pas dans son estimation l'exposition externe, compte tenu de la distance qui le sépare des installations nucléaires. L'exposition interne liée à l'inhalation des gaz radioactifs émis par certains colis B et rejetés dans l'environnement estimée par l'ANDRA est extrêmement faible (1 µSv/an en supposant le stockage en fin d'exploitation avec l'ensemble de l'inventaire de déchets B).

L'IRSN note que l'ANDRA s'est fixé comme objectif de radioprotection une contrainte de dose annuelle pour les travailleurs (5 mSv/an) inférieure à la limite réglementaire (20 mSv/an en moyenne), ce qui correspond à une pratique satisfaisante. L'IRSN constate que les estimations préliminaires réalisées par l'ANDRA tendent à montrer que le respect de la contrainte qu'elle s'est fixée est accessible et que les expositions susceptibles d'être délivrées au public sont négligeables. Pour ce qui concerne les travailleurs en zone nucléaire, l'ANDRA précise dans sa lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-207 du 19 septembre 2005, que l'évaluation dosimétrique relative aux opérateurs est à considérer « *comme un outil permettant de mettre en exergue les postes de travail pour lesquels un effort doit être porté en matière de radioprotection* ». À cet égard, l'IRSN note que l'exposition la plus importante en fonctionnement nominal correspond aux opérations de transfert et de mise en alvéole des colis de combustibles usés pour lesquelles une automatisation plus importante est a priori possible. Par ailleurs, l'IRSN constate que les doses qui seraient reçues par les opérateurs au cours de situations incidentelles (défaut de protection biologique, non respect des consignes...) n'ont pas été évaluées à ce stade du projet. Compte tenu des débits de dose très élevés ( $\leq$  à 10 Gy/h) de certains colis, l'IRSN considère que les dispositions pour prévenir ce type d'incidents et protéger les travailleurs méritent une attention particulière et s'interroge à cet égard sur la pertinence de la présence de travailleurs à relativement faible distance des colis lors des opérations « de routine ». Si l'IRSN ne doute pas que, compte tenu du retour d'expérience existant en la matière, des dispositions efficaces puissent être mises en œuvre afin de respecter les exigences de protection radiologique des travailleurs et du public pour un fonctionnement normal de l'installation, il apparaît important d'étudier

plus avant les risques encourus par les travailleurs lors des opérations de transfert et de mise en place des colis dans les alvéoles, dans la mesure où ces risques pourraient nécessiter des adaptations des systèmes de manutention des colis (contrôle à distance notamment).

## 6.2 ANALYSE DES RISQUES

### 6.2.1 RISQUES D'ORIGINE INTERNE

#### 6.2.1.1 Risques de chute de colis lors de leur manutention

Les systèmes de transfert et de mise en alvéole des colis envisagés par l'ANDRA, présentés au chapitre 6.1.3 du présent rapport, font intervenir des hauteurs de manutention variables. Lors des transferts de colis dans les galeries souterraines, le déplacement est effectué à faible hauteur (limitée à 2 m). De ce fait, la chute de colis dans ces galeries n'entraînerait pas de conséquences importantes au regard de la fonction de confinement des matières radioactives. En revanche, des hauteurs de manutention des colis plus importantes sont envisagées pendant l'étape de transfert des colis en puits et celle de mise en alvéole des colis de déchets B. Le risque de chute au cours de ces deux étapes de mise en stockage et les conséquences potentielles sont examinés ci-après.

#### Transfert de colis en puits

L'ANDRA indique que « *l'expérience acquise en mines et l'ensemble des mesures de prévention et de contrôles sont tels qu'une chute de cage est un événement dont la vraisemblance est extrêmement faible* » [2]. Comme indiqué au chapitre 6.1.3 du présent rapport, l'IRSN convient que les orientations retenues par l'ANDRA pour l'équipement du puits (poulie « Koepe » et dispositifs de freinage) s'appuient sur des technologies fiables de prévention du risque de chute et considère que ce risque est a priori faible. Il reste néanmoins à qualifier le dispositif complémentaire anti-chute que l'ANDRA envisage de mettre en place pour adapter les technologies existantes aux masses transportées qui sont plus importantes que celles usuellement manipulées en mines.

Le scénario accidentel de chute dans un puits retenu par l'ANDRA est une chute libre de la cage sur toute la hauteur du puits. Selon l'ANDRA, l'amortisseur positionné en fond de puits et la cage absorberaient la majeure partie de l'énergie. L'ANDRA souligne à cet égard l'intérêt d'installer un amortisseur de chute. La structure métallique de la hotte de transfert serait déformée, sans création d'ouverture. L'ANDRA indique que les colis primaires (B, C et CU) devraient rester intègres, même si dans le cas des colis B, l'enveloppe en béton de leur colis de stockage serait endommagée. L'ANDRA précise cependant que, compte tenu des incertitudes liées au déroulement de la chute de la cage qui ne seraient pas couvertes par les études, des scénarios de relâchement de matières radioactives ont été envisagés afin d'obtenir un ordre de grandeur des conséquences radiologiques de la chute et de s'assurer qu'il existe des moyens techniques permettant, le cas échéant, d'en limiter les conséquences à un niveau acceptable.

Pour cela, l'ANDRA a fait l'hypothèse d'une rupture de la porte de la hotte de transfert, du colis de stockage et du colis primaire qui induirait un relâchement de matière radioactive mises en suspension dans le puits et rejetées dans l'environnement, pour les colis qui présentent le contenu radiologique le plus pénalisant au sein de chaque catégorie (B5, C3 et CU1). Les conséquences radiologiques d'un éventuel rejet radioactif dans l'environnement en sortie de puits de ventilation ont été estimées en tenant compte de l'ensemble des voies potentielles d'exposition (exposition externe et interne liée au passage du panache de radionucléides et aux dépôts laissés par ce panache). Les voies prépondérantes d'exposition seraient l'inhalation due au passage du panache et, à un moindre degré, l'ingestion alimentaire. L'ANDRA indique que les premières estimations des doses délivrées « *amèneraient à envisager des mesures de réduction du risque avec, notamment, la possibilité d'une filtration sur le circuit de*

retour d'air des installations souterraines » [2]. L'ANDRA précise qu'avec ce type de dispositif (filtration nucléaire), la dose totale d'exposition serait de l'ordre de 1 mSv pour une personne en limite de site.

Par ailleurs, l'ANDRA indique qu'aucune estimation n'a été faite pour le personnel affecté aux installations souterraines compte tenu des mesures envisagées pour éviter l'exposition des personnes (sas au niveau des recettes de surface et souterraine, interdiction d'accès à la zone du puits pendant une opération de transfert de colis).

De façon globale, l'IRSN considère que l'approche retenue, qui consiste en priorité à prendre les dispositions nécessaires pour limiter le risque de chute de cage, mais néanmoins à postuler qu'une perte de confinement des colis est possible et prévoir des dispositions pour circonscrire la dissémination de matière radioactive (ventilation), est pertinente. À cet égard, il est satisfaisant de prévoir des dispositifs visant à limiter la perte de confinement du colis lors de sa chute et à en prévenir les effets (amortisseur en fond de puits de transfert des colis, filtration nucléaire THE en tête de puits de retour d'air). Compte tenu de ces dispositifs, les conséquences radiologiques dues à une perte de confinement des colis sur le public n'apparaissent pas, en première approche, inacceptables. L'IRSN souligne néanmoins que ce type d'évaluation comporte des incertitudes importantes quant aux hypothèses à retenir, notamment sur les niveaux d'activité que le colis est susceptible de libérer. En outre, bien que des dispositions soient prévues afin de limiter l'impact radiologique d'un tel incident pour les travailleurs, il conviendra de définir plus précisément ces dispositions pour apprécier leur capacité à circonscrire la dissémination de matière radioactive et à en limiter les effets (systèmes destinés à empêcher la contamination des infrastructures de surface et souterraine, absence d'aspiration d'air contaminé depuis la surface, absence de travailleurs à proximité du point de sortie du panache...). **L'IRSN considère que ces points devront être précisés dans une phase ultérieure du projet afin de vérifier que les dispositions prévues sont suffisantes pour considérer que les conséquences radiologiques pour le public et les travailleurs d'une chute de colis dans le puits ne seraient pas inacceptables, compte tenu de la faible probabilité de cet événement.**

#### Mise en alvéoles de colis de déchets B

Le système de manutention des colis de déchets B envisagé par l'ANDRA pour leur mise en place dans un alvéole est un engin commandé à distance par un opérateur situé hors de l'alvéole (cf. chapitre 6.1.3 du présent rapport). L'ANDRA souligne que plusieurs dispositions sont prévues pour limiter l'occurrence du risque de chute du colis pendant sa manutention en alvéole et ses conséquences (acheminement du colis en position basse, vérification préalable de la position de stockage pour éviter toute erreur au moment de la dépose du colis, stabilité de l'engin, redondance de constituants du système de levage, protection des colis primaires par le surconteneur en béton...).

L'ANDRA retient comme scénario accidentel une chute d'un colis au moment où celui-ci est placé au niveau supérieur d'une pile de colis (hauteur de 4 à 6 m). Une estimation par calcul des déformations subies par le conteneur et les colis primaires lors d'une chute de 6 m en un coin du couvercle a été effectuée par l'ANDRA. L'ANDRA en conclut qu'une telle chute induirait des détériorations mécaniques du colis de stockage mais n'entraînerait pas une perte de confinement des colis primaires. L'ANDRA tempère néanmoins ce résultat du fait des incertitudes de modélisation relatives notamment au comportement lors du choc du sertissage du couvercle des colis primaires et de la jonction entre le corps et le couvercle du surconteneur. À cet égard, l'ANDRA a indiqué lors de la réunion d'information du groupe permanent « déchets » relative à la présentation du Dossier 2005 Argile du 25 octobre 2005, que les premiers essais de chute de colis de stockage B2 (conteneur standard) et B5 (conteneur à capacité de rétention renforcé) à échelle réelle avaient été effectués. Selon l'ANDRA, les résultats de ces essais confirmeraient les conclusions des simulations précitées. L'IRSN n'a pas connaissance du détail de ces essais qui viennent d'être réalisés et n'est donc pas en mesure de se prononcer.

Par ailleurs, l'ANDRA a étudié des scénarios de relâchement de matières radioactives qui seraient mises en suspension dans l'alvéole de stockage puis relâchées dans l'environnement via le circuit de ventilation, pour le

conteneur standard contenant des colis B2. Dans cette étude, la mise en suspension instantanée au moment de l'impact est prépondérante par rapport à la mise en suspension continue par léchage des matières radioactives par la ventilation, et les voies prépondérantes d'exposition du public seraient les mêmes que celles du scénario de chute de colis en puits (inhalation au passage du panache et ingestion alimentaire). L'ANDRA estime que les conséquences radiologiques pour le public (à 500 m du point de rejet) et l'environnement seraient négligeables.

L'IRSN estime que l'approche suivie par l'ANDRA consistant en priorité à minimiser le risque de chute de colis en alvéole est dans son principe satisfaisante et convient que le scénario de chute retenu peut être considéré en première approche comme un scénario enveloppe vis-à-vis des opérations de manutention en alvéole. Toutefois, l'IRSN note que la perte de confinement des colis n'a été étudiée que sous l'angle des conséquences qu'elle pourrait générer pour le public, mais pas en termes de contamination possible des infrastructures et d'exposition des travailleurs. En particulier, l'IRSN observe que l'ANDRA n'a pas identifié les opérations qui pourraient être nécessaires pour la reprise du colis endommagé et les conséquences radiologiques associées, et n'a pas étudié la conception du réseau de ventilation au regard de la contamination atmosphérique relâchée dans l'alvéole.

L'IRSN considère que les caractéristiques des colis de stockage de déchets B devront au moins permettre, d'une part de récupérer le colis après sa chute, d'autre part de limiter la contamination dans l'alvéole. À cet égard, l'IRSN estime nécessaire que, dans le cadre d'une réalisation industrielle, l'ANDRA présente une analyse des risques liés à la chute d'un colis dans un alvéole de déchets B et le cas échéant, les spécifications du conteneur qui tiennent compte de cette analyse. Dans le cas où le maintien d'une étanchéité suffisante du colis de stockage ne pourrait pas être garanti, la mise en place d'un système de confinement dynamique provisoire des alvéoles dans lesquels des colis sont en cours de manutention, permettant de collecter et filtrer l'air à la sortie de l'alvéole, pourrait être prévue.

**De manière plus générale, l'IRSN attire l'attention sur le fait que l'ensemble des dispositions permettant de remédier à une situation résultant de la chute d'un colis peut avoir une incidence non négligeable sur la conception du colis de stockage, de l'alvéole et des moyens de manutention associés. Il importe donc de prévoir ces dispositions suffisamment tôt dans l'élaboration du projet de stockage en cas de poursuite de celui-ci après 2006.**

### **6.2.1.2 Risques d'incendie et d'explosion**

La méthode d'analyse du risque d'incendie retenue par l'ANDRA est la suivante :

- définition des options de prévention et de limitation des conséquences des incendies ;
- caractérisation des incendies de référence en fonction notamment des différents engins utilisés pour les travaux et pour le transport des colis de déchets ;
- détermination des débits de désenfumage ;
- étude de scénarios d'incendie ;
- étude de l'impact des incendies de référence sur les colis de déchets.

Pour ce qui concerne les options de prévention et de limitation des conséquences des incendies dans les installations souterraines, le retour d'expérience des incendies en ouvrages souterrains montre que, le potentiel calorifique des galeries proprement dites étant très faible, seuls les engins et équipements peuvent être à l'origine d'un incendie important. Les trois causes principales des incendies d'engins sont les courts-circuits électriques (de l'ordre de 50 %), une fuite d'huile sur une surface chaude (de l'ordre de 25 %) et une surchauffe de moteur (pour 10 % des cas environ). L'ANDRA indique que le risque de collision induisant un feu est réduit compte tenu des faibles vitesses de déplacement et de la faible fréquence de croisements entre engins.

Les mesures essentielles de prévention de l'incendie dans les installations souterraines envisagées par l'ANDRA portent essentiellement sur l'utilisation préférentielle de matériaux ininflammables, la limitation et le contrôle des produits inflammables présents (carburant notamment) ainsi que la mise en place de procédures de contrôle et de maintenance des engins et équipements. L'ANDRA ajoute que des équipements de détection d'incendie (détecteurs de fumées, de flammes ou de température) seront installés pour permettre une intervention rapide et une maîtrise de l'incendie avant atteinte de toute sa puissance. Ces systèmes seront installés au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Les mesures de protection contre l'incendie seront d'abord les moyens de première intervention mis à la disposition du personnel, avec des extincteurs et un réseau d'eau sous pression qui seront installés jusqu'à proximité du chantier. Des systèmes d'extinction automatique fixes, installés dans des zones à risque (stockage de carburants ou d'huiles), et des systèmes embarqués sur engin pourront être aussi des moyens efficaces à utiliser. Indépendamment de ces actions sur l'incendie, l'ANDRA estime que les installations souterraines devront être équipées d'un système d'extraction des fumées. Enfin, l'installation de systèmes d'alerte, d'alarme et d'un poste de contrôle (PC) centralisé permettant de suivre la situation et de diriger les opérations pourra contribuer à organiser les opérations d'intervention contre l'incendie.

Pour ce qui concerne la caractérisation des incendies de référence, l'ANDRA [2] indique que les engins utilisés pour la réalisation des ouvrages (engins de creusement, de boulonnage, de transport...) ou les activités d'exploitation (engins de transport des hottes...) ainsi que quelques équipements particuliers (convoyeurs à bande pour le transport des déblais...) peuvent être à l'origine d'un incendie à potentiel calorifique élevé. L'étude de l'ensemble des engins susceptibles d'être utilisés montre que deux grandes catégories de feux d'engins se distinguent. Les engins diesel ou diesel-électrique (tombereau, engin de chargement, engin de creusement, engin de boulonnage/foration...) peuvent générer des feux de puissance thermique maximale proche de 25 MW tandis que les engins de transport électriques ont une puissance thermique maximale proche de 15 MW. L'ANDRA a utilisé pour ses études d'incendie des courbes standardisées définies par le CETu (Centre d'études des tunnels). Ces courbes, issues de l'expérience des feux en tunnels, correspondent à des incendies de véhicules routiers avec des puissances totales respectives de 30 MW et 15 MW.

Pour ce qui concerne la détermination des débits de désenfumage, l'ANDRA [121] indique que les débits de désenfumage dépendent du principe de désenfumage retenu. Les études des feux en tunnels routiers ont permis de dégager deux principes :

- le principe de désenfumage « longitudinal » qui consiste à assurer un courant d'air dans une direction par rapport à la zone d'incendie avec une vitesse suffisante (vitesse critique calculée par la résolution de l'équation de Kennedy) interdisant toute remontée de fumées vers l'amont. Les fumées ainsi maîtrisées sont alors extraites par une reprise massive ponctuelle située en aval de l'incendie ;
- le principe de désenfumage « par confinement » qui consiste à assurer une extraction des fumées au plus près de l'incendie en recherchant à limiter leur déplacement au droit de cette zone (cantonement) et à essayer également de favoriser au mieux leur stratification en limitant la vitesse de l'air (environ 1 m/s) en galerie et en recherchant à diriger les flux d'air vers la zone de l'incendie.

D'une manière générale, partout où les dispositions constructives le permettent, le choix est orienté vers le principe de désenfumage par confinement. Ce principe est envisagé pour les principales galeries d'infrastructure (galeries de liaison et de desserte). Le principe de désenfumage longitudinal est retenu pour les galeries de manutention et les zones en cul de sac lors de la réalisation des travaux. Les débits sont alors définis pour le désenfumage de confinement comme étant au moins égal au débit de production de fumées par l'incendie (défini par les incendies de référence et la courbe CETu correspondante) et pour le désenfumage longitudinal en fonction de la vitesse critique.

Pour ce qui concerne l'étude de scénarios d'incendie et l'adéquation des moyens d'intervention, l'ANDRA a étudié une série de scénarios d'incendie à différents endroits de l'installation (front de taille, section courante, galerie

de manutention...) [121]. Pour chaque scénario, elle identifie les moyens matériels et humains qui seraient nécessaires à une intervention.

Ainsi, elle conclut que l'infrastructure devrait disposer d'un service de sécurité spécialisé de pompiers qui pourraient partir en intervention dans un délai de deux minutes après avoir été mis en alerte. Dans un premier temps, le poste d'intervention se trouverait dans la zone des puits puis, lorsque l'infrastructure s'étendra, un poste d'intervention avancé devra être mis en place en fonction de l'avancement des zones de chantier. Le phasage de l'implantation du poste avancé avec la progression des travaux permettra aux pompiers de ne jamais se trouver à plus de 3,5 km du lieu d'intervention avec un délai d'arrivée sur les lieux de l'intervention de 7 mn.

Par ailleurs, l'ANDRA expose les modalités possibles d'intervention de personnel sur un incendie (organisation, utilisation d'engins mobiles avec réserve d'eau puis raccordement au réseau d'eau sous pression...).

Pour ce qui concerne l'étude de l'impact des incendies de référence sur les colis de déchets, l'ANDRA [117] [118] [119] a étudié les conséquences d'un incendie de l'engin de transfert des hottes de colis de déchets, pour chaque type de colis (B, C, combustibles usés), et d'un incendie de l'engin de manutention utilisé pour la mise en alvéole de colis de déchets B. Par ailleurs, les propriétés d'inflammation ou de fragilisation de chaque type de colis ont été prises en compte pour déterminer les températures acceptables par chacun d'eux :

- enrobés bitumineux : point éclair de 230 °C et température d'auto inflammation de 350 °C ;
- déchets vitrifiés : température de fragilisation du verre de 450 °C ;
- combustibles usés : température de fragilisation de la gaine de l'élément combustible supérieure à 500 °C.

L'incendie retenu pour ces études est un incendie d'une puissance thermique de 15 MW pendant une durée d'une heure. En effet, sur la base des études du CETu, l'incendie d'un fourgon chargé de produits inflammables, sans épandage, délivre une puissance de 15 MW pendant une durée d'une heure pour un potentiel calorifique de 63 000 MJ. L'engin de transport de colis, représentant une charge calorifique de 240 000 MJ (dont 194 000 MJ pour les pneumatiques), n'étant pas spécifiquement inflammable et ne transportant pas d'hydrocarbures, la base d'un incendie délivrant une puissance de 15 MW pendant une heure a été jugée enveloppe. L'ANDRA ajoute que cette hypothèse est également justifiée par le fait que l'expérience montre que la combustion des pneumatiques n'est généralement pas complète (de l'ordre de 40 %).

Selon les simulations réalisées par l'ANDRA, en cas d'incendie de l'engin de transfert des hottes de colis de déchets B, la température des enrobés bitumineux pourrait atteindre 216 °C. Compte tenu du niveau trop élevé de cette température vis-à-vis du risque de reprise des réactions exothermiques au sein de l'enrobé bitumineux, l'ANDRA a retenu de protéger le colis de stockage en incorporant un écran thermique dans la structure de la hotte. L'ANDRA précise que cette disposition (couche de plâtre de 20 mm placée en parois de la hotte, hormis en face inférieure pour des raisons de simulations) permet de limiter la température de l'enrobé à moins de 120 °C, sauf en partie basse des fûts sur environ 20 mm où la température est comprise entre 118 °C et 143 °C. Dans le cas d'un incendie dans un alvéole de déchets B (colis de stockage sans hotte), l'ANDRA indique que les températures maximales atteintes sont inférieures à 100 °C en présence d'un écran thermique modélisé sur toutes les faces du colis de stockage mais qui serait dans la réalité à demeure sur l'engin de manutention. Pour les déchets vitrifiés, une couche de plâtre polyéthylène boré incorporé à la hotte permet de limiter la température des déchets (verres) à 92 °C. De la même manière, pour les combustibles usés, une couche de plâtre de polyéthylène boré permet de conserver une température de la gaine inférieure à 100 °C. Dans ces conditions, l'ANDRA conclut qu'il n'y a pas de rupture du confinement suite à l'incendie.

Par ailleurs, l'ANDRA a prévu de vérifier les conséquences du feu sur du plâtre polyéthylène boré ainsi que de compléter les connaissances sur d'autres éléments de la hotte et du colis.

Enfin, pour ce qui concerne les risques liés à l'explosion, l'ANDRA [2] a étudié les risques liés à l'émission de gaz de radiolyse (H<sub>2</sub>) par les colis de déchets B et indique que dans les alvéoles de stockage en exploitation, un délai de 30 jours est nécessaire pour atteindre la LIE<sup>24</sup> en cas d'arrêt de la ventilation. Une fois les alvéoles de stockage remplis, ceux-ci seront scellés et la ventilation arrêtée. Ces alvéoles pourraient donc contenir une quantité non négligeable de gaz explosifs à considérer en cas de retour dans ceux-ci. Dans ce cas, l'ANDRA envisage la réalisation d'un forage en atmosphère inerte maintenue par un sas pour éviter toute introduction d'air dans les alvéoles. Des appareils miniers anti-déflagrants pourraient être utilisés pour éviter toute source d'ignition. En outre, l'ANDRA prévoit de rétablir la ventilation pour l'ensemble des opérations de remise en exploitation de l'alvéole et de retrait des colis, par exemple en perçant une galerie spécifique permettant l'évacuation de l'air par le fond de l'alvéole.

L'IRSN considère que les évaluations présentées par l'ANDRA dans le Dossier 2005 Argile relatives à la maîtrise du risque d'incendie et d'explosion s'appuient sur une méthodologie satisfaisante et sont fondées sur des éléments qui reflètent l'état de l'art en la matière. **De manière générale, à ce stade du dossier, l'IRSN estime que les études effectuées ne mettent pas en lumière de point susceptible de remettre en cause les concepts de stockage actuellement envisagés par l'ANDRA au regard des risques d'incendie et d'explosion.**

**Cependant, l'IRSN considère qu'un certain nombre de points devront être précisés en cas de poursuite d'un projet de stockage aboutissant le cas échéant à la réalisation industrielle d'une telle installation. Ces points concernent notamment :**

- les hypothèses retenues pour caractériser les incendies de référence et les débits de désenfumage associés. En effet, l'ANDRA considère que les courbes standardisées de puissance des incendies et de production de fumées, issues des pratiques appliquées aux tunnels routiers (CETu), sont enveloppes des incendies envisageables dans les infrastructures souterraines de stockage. Or l'IRSN remarque que ces incendies n'impliquent qu'un seul engin. Étant donné qu'il reste difficile d'écarter à ce stade la présence d'un deuxième engin à proximité de la source de l'incendie, notamment dans la zone de construction, **l'IRSN estime qu'il conviendra de justifier à l'avenir que les courbes standardisées utilisées sont bien majorantes des effets d'un incendie réel se propageant le cas échéant à plusieurs engins.** Par ailleurs, l'IRSN note que les engins de transfert des colis peuvent présenter une charge calorifique supérieure à celle du fourgon considéré pour l'établissement des courbes standardisées. Même si cette charge est associée à des produits moins inflammables que ceux transportés par le fourgon, elle demeure près de quatre fois supérieure (du fait de la présence de pneumatiques) à la charge de ce dernier. **Aussi, l'IRSN considère que le caractère enveloppe de l'hypothèse retenue à ce stade devra être justifié de manière plus approfondie ;**
- le risque de reprise des réactions exothermiques dans les colis de bitumes impliqués dans un incendie. L'IRSN constate que l'enrobé bitumeux pourrait atteindre localement (sur une épaisseur de 20 cm à la base du colis primaire) des températures entre 118 et 143°C dans le cas d'un incendie de l'engin de transfert des hottes. À cet égard, dans sa lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0235 du 23 novembre 2005 consécutive à la réunion préparatoire tenue le 8 novembre 2005, l'ANDRA indique qu'*« au vu des températures atteintes, de la marge possible de progrès dans une phase ultérieure par l'ajout d'un écran thermique [au niveau de la hotte de transfert] en partie basse et/ou par l'augmentation de son épaisseur, il est raisonnable de penser qu'une température inférieure à 120°C en tout point de l'enrobé est atteignable »*. L'IRSN souligne que des essais effectués dans des installations de surface sur un colis primaire non confiné (absence de couvercle, ventilation...) indiquent que le risque précité ne peut être exclu à partir d'une température de 120°C. Aussi, l'IRSN estime qu'une température de 120°C constitue

---

<sup>24</sup> La limite inférieure d'explosivité (LIE) est la concentration minimale en gaz à partir de laquelle il y a risque d'explosion en présence d'une source d'ignition. La LIE est de 4 % pour l'hydrogène.

une borne supérieure et qu'il est probable que des marges devront être prises pour définir un critère thermique permettant de s'affranchir du risque de reprise des réactions exothermiques dans les enrobés bitumeux par rapport à cette valeur. En tout état de cause, **l'IRSN considère que ce risque devra être pris en compte et que le cas échant, des dispositions complémentaires devront être examinées en vue de s'en affranchir. Il conviendra également de s'assurer que ce risque peut être exclu en cas d'incendie de l'engin de manutention dans l'alvéole de stockage ;**

- le risque d'explosion lié à l'émission de gaz de radiolyse ( $H_2$ ) par les colis de déchets B. L'IRSN constate que l'ANDRA a défini des premières options pour prévenir les risques d'explosion, notamment en cas de retour dans les alvéoles de stockage de déchets B. L'IRSN n'a pas de remarque à ce stade sur les moyens prévus (forage en conditions inertes, ventilation de l'alvéole...). L'IRSN considère néanmoins qu'il conviendra de détailler à l'avenir les options retenues et notamment les moyens mis en œuvre pour prévenir les risques d'explosion lors de l'aspiration des gaz explosifs présents dans les alvéoles de stockage de déchets B scellés. Par ailleurs, **l'ANDRA devra analyser les risques d'explosion dans les alvéoles de stockage de déchets B scellés en dehors du cas particulier du retour dans ceux-ci, l'allumage de l'atmosphère explosive ne pouvant pas être exclu uniquement en raison de l'absence d'accès du personnel et de l'absence de sources électriques. En effet, l'énergie nécessaire à l'ignition de l'atmosphère explosive est faible et pourrait être délivrée par de simples chocs (par exemple liés à une chute d'un morceau du revêtement suite à son vieillissement). Enfin, l'IRSN rappelle que les scellements des alvéoles de déchets B ne seront pas totalement resaturés pendant la période durant laquelle les activités sont susceptibles de se poursuivre dans les galeries adjacentes. L'IRSN estime que, de ce fait, il existe un risque de fuite des gaz accumulés dans l'alvéole. L'ANDRA devra évaluer ce risque et s'assurer qu'il ne peut pas être une source d'explosion dans les galeries.**

Par ailleurs, l'IRSN souligne que d'autres points, qu'il n'était pas nécessaire de développer pour l'étude de faisabilité d'une installation de stockage, devront être précisés dans le cadre d'une réalisation industrielle de celle-ci. Il s'agit notamment des options de sectorisation des installations souterraines (par exemple les zones coupe feu pour les réserves de matières combustibles...), des mesures mises en œuvre pour protéger des effets de l'incendie la filtration nucléaire si celle-ci devait être installée en certains points de l'installation et les principes de pilotage de la ventilation associés, la validité du code de calcul utilisé pour les simulations, les risques de perte d'alimentation en électricité et en fluides des installations liés à des événements d'origine externe (chute d'avion, foudre, environnement industriel...), les modalités d'intervention des pompiers extérieurs. Enfin, il conviendra de vérifier l'absence de risque d'incendie pour les colis de déchets C et de combustibles usés lors de leur mise en alvéole lorsque ceux-ci ne sont pas protégés par leur hotte de transfert.

### **6.2.1.3 Risques de criticité**

L'ANDRA présente, dans le Dossier 2005 Argile, une synthèse de l'analyse des risques de criticité et des études de criticité relative à un stockage en formation argileuse profonde [36]. L'ANDRA a identifié, sur la base des masses de matières fissiles définies dans le modèle d'inventaire de dimensionnement (MID), les colis pour lesquels le risque de criticité peut être raisonnablement écarté à toutes les étapes de la vie du stockage. Cette pré-analyse a permis d'identifier un nombre limité de colis dit « à risque de criticité » pour lesquels l'ANDRA a réalisé des analyses détaillées. Les colis ainsi identifiés sont :

- pour les déchets B : le colis B5 (CSD-C)<sup>25</sup>,
- pour les déchets C : les colis C3 (CSD-V UOX2, MOX) et C4 (CSD-V UOX, Pu),

---

<sup>25</sup> Les « colis types » sont décrits en Annexe T1 du présent rapport.

- l'ensemble des combustibles usés (UOX, MOX...) compte tenu de l'importance des masses de matières fissiles.

**L'IRSN estime que les colis identifiés sont bien ceux qui présentent le risque de criticité le plus important.**

Pour les phases d'exploitation et de réversibilité, l'ANDRA s'appuie, pour l'analyse des risques de criticité, sur la RFS I.3.c. Les critères d'admissibilité retenus sont :

- $keff + 3\sigma \leq 0,95$  pour une situation normale définie par l'ANDRA. Par exemple, pour les combustibles irradiés, la situation normale correspond à l'entreposage de combustibles complets (264 crayons fissiles) ;
- $keff + 3\sigma \leq 0,95$  lorsqu'une configuration ne diffère que d'un seul paramètre (assemblages incomplets ou intrusion accidentelle d'eau ...) de la situation normale. Ceci permet de prendre en compte, dès la conception des colis et des alvéoles, des situations pouvant potentiellement se produire même si, in fine, ces situations ne représentent qu'un très petit nombre de cas ;
- $keff + 3\sigma \leq 0,97$  lorsqu'une configuration peut être jugée hautement improbable car nécessitant l'évolution d'au moins deux paramètres indépendants par rapport à la situation normale.

L'IRSN souligne que l'approche de l'ANDRA, qui introduit une notion probabiliste (nombre de cas limité ou situations hautement improbables), ne correspond pas à celle habituellement adoptée dans les installations du cycle du combustible et ne répond pas aux principes de la RFS I.3.c. En effet, cette dernière spécifie que les hypothèses les plus pessimistes, du point de vue des risques de criticité, doivent être retenues pour définir le domaine de fonctionnement normal d'une installation. L'application de ce principe conduit à retenir l'ensemble des colis entrant dans le domaine de fonctionnement du stockage, même si leur nombre est faible (assemblages incomplets). En outre, il est à noter qu'un phénomène de criticité peut être lié à une défaillance d'un seul colis. Par ailleurs, la modération n'étant pas retenue comme mode de contrôle de la criticité, l'introduction d'eau ne correspond pas formellement à une situation incidentelle mais doit être considérée a priori dans l'ensemble des configurations. Aussi, certaines configurations considérées comme hautement improbables, sur la base de la définition de l'ANDRA, seraient, au sens de la RFS I.3.c, associées au fonctionnement normal (par exemple, un colis avec des assemblages incomplets et présence d'eau). Néanmoins, **l'IRSN estime que la définition des critères d'admissibilité retenue par l'ANDRA n'est pas de nature à remettre en cause la démarche d'analyse qu'elle a suivie pour l'étude de faisabilité. Toutefois, dans une phase ultérieure, en cas de poursuite du projet de stockage, l'IRSN estime que la définition des critères d'admissibilité devra être revue sur la base des principes de la RFS I.3.c.**

L'examen de l'analyse détaillée des risques de criticité des différents types de colis conduit l'IRSN à formuler les remarques suivantes.

Pour ce qui concerne les colis de déchets B, l'ANDRA a déterminé les masses maximales admissibles par colis pour des configurations représentatives du fonctionnement normal des installations de stockage (CSD-C isolé, colis de stockage isolé, réseau de longueur infini de 4 x 4 colis). Elle considère pour ces configurations une réflexion par une épaisseur saturante de béton. L'IRSN note toutefois que lors du transfert des colis, ceux-ci sont placés dans une hotte qui assure notamment la protection radiologique des opérateurs. Aussi, il conviendrait formellement de vérifier, suivant la nature du blindage entourant le colis de stockage, que la réflexion par 60 cm de béton considérée reste pénalisante. Toutefois, les masses de matières fissiles maximales admissibles déterminées par l'ANDRA (550 g) sont nettement supérieures à celles attendues pour le colis CSD-C d'après le modèle d'inventaire (120 g), ce qui ménage des marges.

Pour ce qui concerne les colis de déchets C, l'ANDRA considère un mélange homogène de matières fissiles, de SiO<sub>2</sub> et d'eau. Pour les colis type C4, il est en outre pris en compte 1 % de bore. L'ANDRA indique que ces deux milieux fissiles sont sous-critiques en milieu infini, ce qui couvre les situations envisageables en phase d'exploitation et de réversibilité. L'IRSN note toutefois que cette analyse ne couvre que partiellement les situations accidentelles associées à une arrivée d'eau. En effet, le milieu fissile retenu est sous-critique si la proportion volumique d'eau

dans le mélange ne dépasse pas 70 %. En fonctionnement normal, le volume libre à l'intérieur du CSD-V n'autorise pas un tel apport d'eau. Toutefois, en conditions accidentelles, en particulier en cas de chute d'un colis dans le puits de transfert, le maintien de la géométrie du CSD-V n'est pas assuré et la présence d'eau en fond de puits n'étant pas exclue dans l'analyse de l'ANDRA, ceci pourrait conduire à l'obtention du mélange précité. Néanmoins, les configurations étudiées qui ne considèrent pas (colis type C3) ou minimisent (colis type C4) la présence du bore dans la matrice vitreuse (1 % au lieu de 18,2 %) apparaissent très enveloppées pour l'analyse des risques de criticité pendant la phase d'exploitation et de réversibilité. Aussi, la sous-criticité du colis en cas de chute dans le puits devrait être démontrable.

Pour ce qui concerne les colis de combustibles usés :

- l'ANDRA a réalisé des études pour des colis renfermant 4 combustibles de type UOX dont le taux de combustion est supérieur ou égal à 40 GWj/t ou un seul assemblage de type UOX ou MOX sans contrainte sur l'irradiation.

Pour la prise en compte du taux de combustion, l'ANDRA considère l'anti-réactivité apportée par les produits de fission (6 ou 15 PF) et certains actinides. Cette méthode est en cours d'élaboration par un groupe de travail national qui n'a pas encore rendu ses conclusions. Par ailleurs, l'IRSN ne disposant que des grandes hypothèses de calcul et des résultats obtenus, sans le détail des études réalisées, il n'est pas possible de se prononcer sur la méthode utilisée. Néanmoins, l'IRSN note que l'ANDRA a retenu un profil de taux de combustion pénalisant. De plus, les premiers dépouillements des expériences critiques menées à Valduc destinées à la qualification de la prise en compte des 6 produits de fission stables ne laissent pas supposer de biais de calculs importants. Aussi, l'IRSN estime que les résultats des études présentées par l'ANDRA peuvent être utilisés dans le cadre d'une démonstration de la faisabilité d'un stockage. Par ailleurs, l'ANDRA prévoit d'implanter un poste de mesure au niveau des installations de surface permettant de valider le taux de combustion moyen et le profil d'irradiation requis de chaque assemblage avant conditionnement en colis ;

- le critère d'admissibilité ( $k_{eff} + 3\sigma \leq 0,95$ ) est respecté pour l'ensemble des colis, excepté pour le colis CU1 mono-assemblage ( $k_{eff} + 3\sigma = 0,96$ ). Pour ce dernier, le critère précité n'est respecté que pour des taux de combustion supérieurs à 5 GWj/t, en considérant l'anti-réactivité de 6 produits de fission. Le conservatisme du modèle de colis mono-assemblage est également plus faible que celui du colis à 4 assemblages (conditions de réflexion réalistes, assemblage incomplet non considéré). Toutefois, le nombre d'assemblages UOX très faiblement irradiés est réduit. De plus, des dispositions complémentaires destinées à diminuer le keff du colis pourraient être facilement mises en place (chemise avec poison neutronique...). **Aussi, l'IRSN considère qu'il conviendra à l'avenir de préciser les dispositions retenues pour le stockage, le cas échéant, de ces combustibles.** Néanmoins, l'IRSN estime que ce point ne remet pas en cause la faisabilité du stockage ;
- pour ce qui concerne la chute d'un colis de combustibles usés dans le puits de transfert, l'ANDRA conclut au maintien de la géométrie de l'insert et de l'étanchéité du colis. Par ailleurs, l'ANDRA s'appuie sur l'étude de l'influence de la dégradation des crayons à long terme en présence d'eau pour justifier l'absence de risques de criticité en cas de dégradation des crayons suite à la chute. L'IRSN considère toutefois que les contraintes dynamiques exercées sur les crayons suite à une chute de 500 m et celles résultant d'une dégradation physico-chimique étalée sur plusieurs millénaires ne sont pas comparables. **Aussi, l'analyse des risques de criticité liés à la chute d'un colis de combustibles usés dans le puits de transfert devra être complétée sur ce point.**

L'IRSN considère que l'ensemble des remarques formulées ci-avant devront être prises en compte dans une phase ultérieure en cas de poursuite du projet de stockage. Toutefois, à ce stade, l'IRSN n'identifie pas de point rédhibitoire à la faisabilité de l'exploitation d'un stockage profond en milieu argileux au regard des risques de criticité.

## 6.2.2 RISQUES D'ORIGINE EXTERNE : EFFETS DES SÉISMES

Le risque sismique concerne l'effet des mouvements sismiques sur les ouvrages du stockage et sur le bâti géologique, qui comprend la barrière géologique du Callovo-Oxfordien et les encaissements calcaires renfermant des horizons aquifères. À cet égard, l'IRSN distingue les effets des séismes d'ordre **dynamique**, induits par le passage des ondes sismiques et de durée limitée à leur passage, de ceux d'ordre **statique**, résultant de la modification du champ de contrainte induite par la rupture sismique, dont les caractéristiques dépendent de celles du séisme. En revanche, les effets des séismes étant plus importants pour le bâti géologique pendant la phase post-fermeture soumise au SMPP, leur analyse est détaillée dans le chapitre 7.2.2 du présent rapport.

L'ANDRA [99] [100] a réalisé des études analytiques et numériques de la stabilité mécanique d'ouvrages ouverts sous l'effet dynamique d'un séisme de niveau SMS.

Globalement, les mouvements sismiques associés au spectre SMS retenu par l'ANDRA n'affecteraient pas la stabilité des ouvrages (absence d'écroulement). Les cavités les plus sensibles au phénomène de diffraction sont les galeries de desserte et de manutention, et les unités de stockage des déchets B et C. L'effet de diffraction apporté par le réseau complet de galeries de desserte (le plus sensible) reste négligeable pour des fréquences inférieures à 20 Hz. Les liaisons jour-fond (puits) peuvent constituer un point sensible de l'installation, mais plus en raison de l'hétérogénéité des terrains traversés susceptibles d'induire des amplifications locales, que des effets d'amplification dynamique d'ensemble.

L'ANDRA montre également que les incréments de contraintes dus aux effets dynamiques sont négligeables ( $\ll 1$  MPa), en particulier pour des fréquences inférieures à 15 Hz. Par ailleurs, l'endommagement des roches (EDZ) ne devrait pas être sensiblement modifié : l'extension de la zone endommagée resterait de l'ordre de 0,5R (R étant le rayon de l'ouvrage), la zone plastifiée augmenterait très légèrement (de 0,1R à 0,13R).

L'IRSN observe que pour la phase d'exploitation-réversibilité, l'ANDRA a retenu le spectre SMS minimal forfaitaire de la RFS 2001-01 calé à 0,1g, atténué en profondeur d'un facteur 1,5. L'IRSN n'a pas de commentaire sur le choix du spectre forfaitaire, mais considère que l'ANDRA ne devrait pas retenir d'atténuation pour les hautes fréquences (chapitre 2.2.3.1 du présent rapport). Par ailleurs, l'IRSN note que l'ANDRA retient un amortissement des amplitudes de 5 % pour l'évaluation du comportement des ouvrages, en considérant que l'amortissement par la couche du Callovo-Oxfordien, plus faible qu'un sol classique (2 %), serait accru par la présence de l'EDZ. L'IRSN estime que cette dernière hypothèse n'est pas justifiée dans la mesure où le volume affecté par l'EDZ n'est pas suffisant pour affecter l'amortissement des mouvements dans la formation hôte qui est corrélé au taux de déformation global du massif encaissant ; l'ordre de grandeur de l'amortissement à considérer serait donc plutôt de 2 %, valeur caractéristique des argilites. Néanmoins, l'IRSN observe que l'ANDRA a également évalué les effets, sur des ouvrages ouverts, de séismes d'intensité supérieure au SMS (niveau SMP). Ces études concluent que tels séismes n'auraient pas d'effets notablement différents de ceux d'un séisme de niveau SMS. L'IRSN estime donc que les évaluations effectuées par l'ANDRA couvrent l'incertitude précitée sur les taux d'amortissement et les coefficients d'atténuation des spectres en profondeur.

Concernant les liaisons jour-fond, l'IRSN estime que les puits pourraient être endommagés, mais pas au point de ne pouvoir réaliser leur réparation au moyen de techniques usuelles. L'IRSN considère qu'un séisme pourrait également provoquer une fracturation affectant les aquifères supérieurs et mettre en connexion les puits avec des poches karstiques. Ce risque peut néanmoins être raisonnablement écarté si les puits sont situés à distance suffisante de telles poches qui peuvent être reconnues à partir de la surface, par des méthodes telles que la résistivité électrique ou la microgravimétrie, complétées par des sondages destructifs.

Concernant les ouvrages de stockage, l'IRSN considère, comme l'ANDRA que les augmentations de pression dans les ouvrages provoqués par les effets dynamiques d'un séisme ne devraient pas affecter sensiblement leurs propriétés de confinement. Par ailleurs, l'IRSN observe qu'en considérant le spectre SMS retenu par l'ANDRA, des mouvements d'amplitude centimétrique sont envisageables. Ces déplacements ne devraient donc pas affecter

l'intégrité des ouvrages. L'IRSN observe néanmoins que l'amplitude des mouvements attendus est du même ordre de grandeur que les espaces prévus entre les colis et le chemisage des alvéoles de déchets C et de CU (respectivement 3 cm et 10 cm au diamètre). L'IRSN estime qu'il conviendra de s'assurer que ces espaces restent suffisants en cas d'occurrence d'un séisme, pour maintenir la possibilité d'un retrait aisé des colis, sachant que l'ANDRA envisage une phase de réversibilité pluriséculaire (cf. chapitre suivant).

Par ailleurs, l'IRSN constate que sous les effets (statiques comme dynamiques) d'un séisme de niveau SMS, les incréments de contraintes (< 1 MPa) et les mouvements (centimétriques) envisageables ne seraient pas en mesure d'activer des fractures dans le Callavo-Oxfordien, ou de modifier les écoulements dans les encaissants calcaires. Ainsi, l'IRSN s'accorde avec l'ANDRA pour conclure au caractère négligeable des effets possibles d'un séisme SMS sur la roche hôte et les encaissants calcaires.

Pour conclure, l'IRSN considère en première analyse que la stabilité mécanique des ouvrages devrait être assurée sous l'effet dynamique d'un séisme de niveau SMS. Cependant, un certain nombre de dispositions complémentaires pourraient s'avérer nécessaires pour la reprise éventuelle des colis pendant la phase de réversibilité et la protection des puits contre des incursions hydrauliques pouvant survenir après un séisme.

## 6.3 PHASES DE RÉVERSIBILITÉ

L'ANDRA [1] [2] définit la réversibilité comme « *la possibilité d'un pilotage progressif et flexible du stockage* ». L'objectif retenu est « *de pouvoir intégrer le retour d'expérience et les progrès techniques dans la gestion du stockage et, plus généralement, de laisser aux générations futures une liberté de décision pour la gestion des déchets radioactifs* ». L'ANDRA identifie plusieurs étapes clés, « *dont la durée n'est pas fixée a priori* », dans le processus de stockage et de fermeture qui sont notamment :

- l'étape « **après mise en place des colis** », pendant laquelle l'alvéole est rempli de colis mais n'est pas scellé. Des dispositifs en tête d'alvéole protègent les personnes présentes dans les galeries d'accès qui restent entièrement accessibles. À cette étape, l'alvéole de déchets B est ventilé, alors que l'alvéole de déchets C ou de combustibles usés est obturé. L'ANDRA considère que cette étape « *est comparable à une configuration d'entreposage* ». Un éventuel retrait des colis de déchets B pourrait être réalisé par « *simple inversion* » du processus de mise en place. La durée de retrait possible, qui correspond à l'intégrité du revêtement en béton (déchets B) ou du chemisage métallique (déchets C ou combustibles usés), est « *d'au moins 200 à 300 ans* » ;
- l'étape « **après scellement de l'alvéole** » qui débute après la fermeture des alvéoles par un bouchon d'argile gonflante soutenu par du béton dans le cas des déchets C et des combustibles usés (la galerie d'accès reste accessible et ventilée) ou, dans le cas des déchets B, par l'arrêt de la ventilation de l'alvéole et le scellement de sa galerie d'accès. La reprise des colis pendant cette étape nécessite des travaux préparatoires pour retirer les bouchons et scellements. Comme pour l'étape précédente, l'ANDRA précise que l'absence d'évolution notable du revêtement et du chemisage permet le retrait des colis de manière relativement simple pendant au moins 200 à 300 ans après leur mise en place.

Les étapes suivantes concernent la fermeture d'un module (scellement et remblayage de tous les composants d'un module), la fermeture d'une zone de stockage (fermeture des galeries de liaison internes à une zone de stockage), puis la post-fermeture (après scellement et remblayage des puits). L'ANDRA souligne que la progressivité de la fermeture, associée à un programme d'observation d'alvéoles témoins, offre la possibilité de mettre en œuvre un processus décisionnel pour statuer sur le maintien de l'installation en l'état, le passage vers une réversibilité moindre, ou le retour en arrière. L'ANDRA précise que « *le terme ultime en matière de gestion réversible du processus de stockage est la rupture mécanique du revêtement des alvéoles* ». Au-delà, la mise en œuvre simultanée de moyens miniers et nucléaires, bien que techniquement possible, caractérise un faible niveau de

réversibilité. De ce fait, l'ANDRA considère qu'« une durée de deux à trois siècles constitue [...] la durée minimale pendant laquelle le processus de gestion réversible par étape peut être mis en œuvre sans nécessiter d'opérations lourdes d'un point de vue technique », avec des moyens de manutention comparables à ceux utilisés pour la mise en place.

L'IRSN considère que le principe de gestion progressive envisagé par l'ANDRA est pertinent dans la mesure où il permet de laisser des choix ouverts pour gérer l'installation. Cette position est cohérente avec celle déjà exprimée par l'IRSN [193]. Cette gestion confère à l'installation de stockage des niveaux de réversibilité, avec une possibilité d'un retrait des colis tant que l'intégrité de l'alvéole est conservée. Toutefois, en dehors des opérations préalables de rétablissement de l'accès à l'alvéole (déconstruction des bouchons, scellements et remblais) qui seraient nécessaires dans certaines configurations, le retrait des colis appelle les remarques suivantes.

L'IRSN rappelle tout d'abord que les connaissances actuelles relatives à l'évolution des composants d'un alvéole et de son environnement, examinées au chapitre 5 du présent rapport, comportent des incertitudes sur le maintien de leurs propriétés qu'il conviendra de réduire en s'appuyant sur des démonstrateurs in situ. Les éléments issus de ces démonstrateurs devraient notamment permettre de préciser le dimensionnement du revêtement en béton (alvéoles de déchets B) et du chemisage métallique (alvéoles de déchets C et des combustibles usés) et d'apprécier si le risque de rupture « en grand » peut être raisonnablement écarté pendant une durée séculaire voire pluriséculaire. Toutefois, en dehors de ce phénomène majeur qui mettrait fin à la période de réversibilité « aisée » du stockage, il est probable que l'évolution des composants d'alvéole sur ces durées conduise à des désordres (écaillages et chutes de pièces de béton, collage par corrosion du chemisage et du (sur)conteneur...) qui pourraient compliquer les opérations de reprise des colis de stockage. Ces derniers peuvent également se dégrader (endommagement initié pendant la mise en place, vieillissement du béton lié par exemple à la présence locale d'eau ou à des interactions avec les colis primaires, corrosion). L'altération des caractéristiques physiques des colis de stockage, et plus généralement le vieillissement des alvéoles, pourrait créer des difficultés pour les opérations de reprise et de transfert des déchets stockés.

Il est à noter que la modélisation du vieillissement d'une installation est particulièrement complexe dans la mesure où elle doit généralement prendre en compte une multitude de phénomènes dont la connaissance précise des effets est difficilement accessible. C'est pour cette raison que la sûreté des installations existantes des entreposages de déchets n'est pas fondée sur des modélisations prospectives des possibilités de reprendre les colis à plus ou moins longue échéance, mais sur le contrôle et la maintenance de l'installation. Ainsi, les concepts d'entreposages doivent être tels qu'ils permettent :

- de surveiller le comportement de l'installation de préférence au plus près de la source (chaque colis ou groupe de colis),
- de pouvoir anticiper les défaillances au moyen de cette surveillance et/ou d'examen particuliers (auscultation, ré-examen de sûreté),
- de pouvoir remédier aux désordres identifiés.

En outre, il est recherché des moyens simples et robustes pour la mise en place et le retrait des colis.

L'IRSN observe que les concepts d'alvéoles de stockage présentés par l'ANDRA ne sont pas fondés sur ces principes, en particulier du fait du caractère borgne des alvéoles, sans accès aisé aux colis sur des distances relativement longues (40 et 250 m), ainsi que des systèmes de manutention horizontale des colis qui ne bénéficient pratiquement pas de retour d'expérience industriel quant à leur efficacité.

Aussi, même si le stockage réversible des déchets HAVL vise à remplir certaines fonctions similaires à celles d'un entreposage, l'IRSN considère que l'assimilation des concepts adoptés à des configurations d'entreposage doit être utilisée avec une grande prudence dans la mesure où les options de conception retenues par l'ANDRA ne sont pas basées sur les principes de conception et de gestion sûre préconisée pour les entreposages.

L'IRSN considère néanmoins que les concepts proposés sont dans leur principe globalement pertinents au regard de la sûreté à long terme du stockage (diminution de l'EDZ, minimisation des vides et des effets thermiques, alvéoles borgnes...) ainsi qu'il résulte de l'évaluation de l'IRSN qui fait l'objet du présent rapport. Par ailleurs, des actions de surveillance sont bien prévues par l'ANDRA qui indique en particulier que les choix de gestion d'un stockage doivent s'appuyer sur l'observation<sup>26</sup> de l'évolution des différents ouvrages et de leur environnement, qui aide en particulier au pilotage du processus réversible de stockage et contribue à la sûreté opérationnelle et à long terme. De façon plus générale, l'observation permet de vérifier que le fonctionnement demeure conforme aux prévisions et d'améliorer les modèles de comportement du stockage sur la base des données acquises. Ce retour d'expérience constitue également un support en vue d'améliorer la conception des ouvrages à construire.

Le programme d'observation défini par l'ANDRA [2] comprend des « alvéoles témoins », qui font l'objet d'une observation approfondie. D'autres alvéoles, appelés « alvéoles courants » sont instrumentés de façon plus légère en vue de confirmer le comportement observé sur les « alvéoles témoins » et transposer les résultats à l'ensemble de la zone de stockage concernée. Le nombre et la répartition des ouvrages « témoins », ainsi que les moyens de mesure, sont donnés à titre indicatif et pourront être ajustés en fonction du retour d'expérience des premiers ouvrages observés. Dans la zone de stockage de déchets B (une quarantaine d'alvéoles au total), une ou deux alvéoles « témoins » pour chaque grand type d'alvéole (colis de déchets bitumés, colis exothermiques et colis avec dégagement de gaz) pourraient être retenus. Dans les zones de stockage de déchets C ou de combustibles usés, qui se caractérisent par un très grand nombre d'alvéoles identiques, l'ANDRA envisage de sélectionner parmi les premiers modules construits un « module témoin » contenant moins de 10 % d'« alvéoles témoins », soit moins de 1% de l'ensemble des alvéoles nécessaires pour stocker l'inventaire des colis. L'ANDRA indique que les paramètres observés sont essentiellement ceux relatifs à la stabilité mécanique du revêtement de l'alvéole et à l'appréciation de sa durabilité (contraintes mécaniques induites par la formation géologique, déformations éventuelles du revêtement, état de saturation en eau de l'environnement proche...), à la composition de l'atmosphère de l'alvéole (analyse des gaz, notamment de l'hydrogène dans le cas des alvéoles de déchets B et de l'oxygène dans le cas des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés) et à l'évolution thermique de l'alvéole et de son environnement. Les moyens d'observation possibles présentés par l'ANDRA sont recensés sur la base d'un bilan des contraintes spécifiques de l'observation des ouvrages de stockage (durée de vie des moyens d'observation, conditions potentiellement agressives en termes notamment de rayonnement et de température pour le fonctionnement des appareils, limitation de l'impact de l'observation sur les fonctions de sûreté attribuées aux ouvrages...) et du retour d'expérience industriel en matière d'observation.

Compte tenu de l'ensemble des éléments présentés ci-avant, l'IRSN n'exclut pas que les dispositions prévues par l'ANDRA, qui visent à minimiser la dégradation des colis et des ouvrages à long terme, puissent permettre le cas échéant un retrait relativement aisé des colis de déchets sur des durées significatives à l'échelle industrielle, mais il n'est pas possible de se prononcer en l'état actuel des connaissances sur le fait que cette possibilité soit d'ores et déjà acquise sur deux ou trois siècles. En tout état de cause, la démonstration de cette possibilité devra s'appuyer fortement sur le programme d'observation et de surveillance. À cet égard, l'IRSN considère que les pistes envisagées par l'ANDRA sont pertinentes mais devront à l'avenir comprendre un certain nombre de clarifications. En particulier, l'IRSN estime qu'il sera nécessaire :

- de montrer dans un premier temps, au moyen de démonstrateurs in situ, que la mise en place et le retrait d'objets représentatifs des colis sont effectivement aisés et qu'il n'apparaît pas

---

<sup>26</sup> L'ANDRA distingue l'« observation » et la « surveillance », de par les objectifs assignés à chacune d'elles, qui sont respectivement d'« aider à la gestion réversible » et de « contribuer à la maîtrise de la sûreté » opérationnelle et à long terme. L'ANDRA précise que les mesures mises en œuvre sont pour l'essentiel les mêmes dans les deux cas. Les aspects spécifiques à la surveillance, par exemple les conditions ambiantes dans les ouvrages (gaz, poussières...) et le contrôle de la non-dissémination radioactive, ne sont toutefois pas détaillés à ce stade du projet dans la mesure où ils relèvent de méthodologies classiquement appliquées dans l'exploitation nucléaires d'installations existantes. De ce fait, le terme « observation » est utilisé au sens large dans le présent rapport.

d'endommagement des composants de ces démonstrateurs qui traduirait des difficultés importantes pour reprendre les colis sur les durées visées,

- d'examiner périodiquement, lors de la phase d'exploitation d'un stockage, les alvéoles « témoins » et les colis en vue de vérifier leur état et l'absence de dégradation significative,
- d'instrumenter les alvéoles de stockage en vue de vérifier que leur comportement ne dérive pas significativement par rapport à celui des alvéoles « témoins ».

Enfin, compte tenu des difficultés probables pour connaître précisément l'état d'évolution des alvéoles de stockage, il conviendra de prendre des dispositions préventives lors de la réouverture éventuelle de ceux-ci. Ces dispositions devront en particulier concerner :

- le risque de contamination de tout ou partie de ces alvéoles en cas de relâchement précoce de matière radioactive en leur sein dû à des colis défailants,
- les risques associés aux possibles accumulations de gaz (gaz radioactifs, hydrogène) dans les alvéoles.

Enfin, l'IRSN attire l'attention sur le fait que les longues durées considérées à l'heure actuelle pour la gestion réversible du stockage soulèvent la question du risque d'abandon de celui-ci. L'IRSN observe que la fermeture progressive des modules de stockage (remblaiement des galeries d'accès aux alvéoles internes à un module de stockage) puis des sous-zones de stockage (remblaiement des galeries de liaison qui desservent les modules d'une sous-zone de stockage) confère un caractère « passif » à la gestion de ces secteurs de l'infrastructure souterraine. Elle contribue par conséquent à une mise en sécurité de parties de l'installation (d'autres parties pouvant être encore en exploitation) au regard de situations extrêmes telles que le risque d'abandon précité. Sans préjuger du processus décisionnel qui régira le passage à un niveau de réversibilité moindre par fermeture progressive des ouvrages, l'IRSN considère qu'il serait intéressant d'évaluer à l'avenir si le maintien d'un accès aisé aux ouvrages de stockage est à privilégier au nom de la réversibilité par rapport au gain que pourrait procurer la mise en place de dispositifs de fermeture en cas d'abandon.

## 6.4 CONCLUSION

L'IRSN constate une avancée significative, en comparaison des précédents dossiers, des études de conception menées par l'ANDRA relatives aux moyens et procédés qui pourraient être mis en œuvre pour le transfert et la mise en place des colis de stockage dans les installations souterraines. Une première évaluation de la sûreté de l'exploitation d'un stockage est présentée.

L'IRSN considère que ces études, qui intègrent le retour d'expérience industriel d'installations nucléaires et minières et sont basées sur une analyse comparative de solutions possibles, montrent qu'il devrait être possible de séparer les activités de construction et d'exploitation nucléaire selon les principes généraux retenus par l'ANDRA. L'IRSN estime en première approche que les dispositions envisagées par l'ANDRA ne présentent pas d'obstacle au transfert dans des conditions sûres des colis dans les infrastructures du stockage. Enfin, de manière générale, les études effectuées ne mettent pas en lumière à ce stade de point susceptible de remettre en cause les concepts de stockage actuellement envisagés par l'ANDRA au regard des risques d'incendie, de criticité et d'occurrence d'un séisme de niveau SMS.

Il reste néanmoins que la définition des moyens et procédés d'exploitation et l'évaluation de sûreté associée sont encore à un stade préliminaire en comparaison des autres éléments développés dans le Dossier 2005 Argile. Aussi, un certain nombre de points, qui pourraient avoir une incidence forte sur les concepts de stockage qui seront à retenir in fine en cas de réalisation industrielle d'une installation, nécessitent d'importants compléments d'études. Il s'agira notamment :

- de s'assurer de l'efficacité du système de ventilation des alvéoles de déchets B au moyen de tests et d'analyser les risques d'explosion dans les alvéoles de stockage de déchets B scellés et dans les galeries attenantes en dehors du cas particulier du retour dans ceux-ci,
- de définir les dispositions permettant de remédier à une situation résultant de la chute d'un colis de déchets B lors de sa mise en place dans un alvéole,
- de s'assurer, au moyen de démonstrateurs in situ, que la mise en place et le retrait d'objets représentatifs des colis de déchets C et de combustibles usés sont effectivement aisés et qu'il n'apparaît pas d'endommagement des composants de ces démonstrateurs qui traduirait des difficultés importantes pour reprendre les colis sur les durées visées de réversibilité du stockage. À cet égard, l'IRSN n'exclut pas que les dispositions prévues par l'ANDRA puissent offrir la possibilité de retrait aisé des colis de déchets sur des durées longues, mais l'IRSN ne peut se prononcer en l'état actuel des connaissances sur le fait que cette possibilité soit d'ores et déjà acquise sur deux ou trois siècles.

Par ailleurs, d'autres points seront à préciser dans une étape ultérieure du projet si celui-ci devait aboutir à une réalisation industrielle, en vue de démontrer la sûreté en exploitation de l'installation. Ces compléments portent notamment sur :

- la ventilation du stockage, en particulier les dispositions prises pour éviter des transferts d'air entre la zone en exploitation et la zone en construction, lors d'un arrêt de la ventilation,
- l'efficacité des dispositifs complémentaires envisagés pour prévenir la chute de cage dans le puits de transfert des colis, ainsi que des dispositions prises pour s'assurer que les conséquences radiologiques pour le public et les travailleurs d'une chute de colis dans le puits ne seraient pas inacceptables, compte tenu de la faible probabilité de cet événement,
- les risques d'exposition des travailleurs lors des opérations de transfert et de mise en place des colis dans les alvéoles, pour des conditions normales d'exploitation ou en cas d'incidents, en vue d'optimiser ces opérations au regard de la protection radiologique des personnes,
- l'adaptation éventuelle du schéma de principe de séparation des activités, afin de tenir compte notamment des contraintes associées au contrôle radiologique du personnel et des équipements, ainsi qu'à la gestion des déchets induits,
- la justification du caractère enveloppe des hypothèses prises pour évaluer le risque d'incendie et ses conséquences. Il conviendra également de vérifier que les températures maximales que pourraient atteindre les enrobés bitumés lors d'un incendie ne conduiraient pas à une reprise des réactions exothermiques au sein de ces colis.

Enfin, bien qu'il ne soit pas anticipé à ce stade de difficulté importante pour aboutir à une gestion efficace du risque de criticité, l'IRSN estime que les critères d'admissibilité des colis au regard de ce risque devront être revus conformément aux principes énoncés dans la RFS I.3.c et que l'analyse du risque de criticité lié à la chute d'un colis de combustibles usés dans le puits de transfert devra être complétée.

## 7 ÉVALUATION DE SÛRETÉ EN PHASE DE POST-FERMETURE

### 7.1 ÉVOLUTION DES PERFORMANCES DE CONFINEMENT DES BARRIÈRES DU STOCKAGE

#### 7.1.1 LES COLIS DE DÉCHETS

##### 7.1.1.1 Les colis de déchets vitrifiés

Les déchets conditionnés dans les colis de déchets vitrifiés, décrits dans le document [7], sont des solutions de haute activité contenant des produits de fission et des actinides mineurs, ainsi que des fines, issues du traitement des combustibles usés (colis produits à La Hague et à Marcoule). Ce mélange est calciné, puis incorporé dans une pâte de verre alumino-borosilicatée en fusion et coulé dans un conteneur en acier inoxydable (enveloppe). Dans le matériau obtenu, les radionucléides s'intègrent chimiquement au réseau vitreux en formant des liaisons chimiques avec les éléments formateurs du réseau. Ces colis sont fermés par un couvercle en acier inoxydable soudé.

Comme indiqué précédemment, l'ANDRA envisage de placer les déchets vitrifiés dans des surconteneurs en acier non allié de 55 mm d'épaisseur, fermés par soudure [2]. Ce complément de colisage a pour fonction d'empêcher le contact entre l'eau de resaturation des alvéoles et la matrice vitreuse pendant la phase dite « thermique » (température au cœur du colis supérieure à 50 °C) [4]. En effet, la vitesse de relâchement des radionucléides par lixiviation est d'autant plus élevée que la température au contact du déchet est importante. Selon l'ANDRA, les conteneurs en acier sont étanches pendant une durée minimale de 4 000 ans (cf. chapitre 5.4.3 du présent rapport). Même lors de la phase « thermique », la température au cœur des colis ne devrait pas excéder 130 °C ce qui permet d'exclure que des phénomènes de recristallisation modifiant les caractéristiques physico-chimiques des colis vitrifiés puissent apparaître [57]. En tant que de besoin, les surconteneurs de déchets vitrifiés seront séparés dans l'alvéole par des intercalaires constitués d'une enveloppe métallique et d'une matrice intérieure. L'ANDRA n'a pas encore défini les matériaux qui seront utilisés pour ces intercalaires mais indique que la matrice intérieure devra permettre d'obtenir « *un bon compromis entre conductivité thermique, compatibilité chimique et résistance métallique* » [2].

Après la perte d'étanchéité du surconteneur (l'ANDRA n'attribue aucun rôle de confinement à l'enveloppe en acier inoxydable du colis primaire), la présence d'eau au contact du verre provoque sa dissolution et conduit au relâchement des radionucléides incorporés dans le réseau. Le premier mécanisme d'altération de la matrice vitreuse par l'eau est l'interdiffusion (échange ionique d'un métal alcalin du réseau avec l'ion H<sup>+</sup>), puis intervient un phénomène d'hydrolyse des liaisons chimiques du réseau, entraînant la dissolution du verre à une vitesse relativement élevée (« V<sub>0</sub> »). La valeur de la vitesse de dissolution V<sub>0</sub> est estimée à partir d'essais réalisés entre 50 °C et 100 °C et pour des pH compris entre 7 et 10 sur des échantillons de verre inactifs. Typiquement, pour le verre de type R7/T7, la valeur de la vitesse V<sub>0</sub> à 100 °C à pH neutre estimée par l'ANDRA est de l'ordre de 2 g.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>. Selon l'ANDRA, les essais effectués sur des verres actifs n'ont pas montré une augmentation des vitesses de dissolution V<sub>0</sub>. Par ailleurs, l'ensemble des études menées sur les verres inactifs de type R7/T7 montre que la vitesse de dissolution du verre diminue, du fait de l'établissement d'un équilibre entre le verre et l'eau de lixiviation qui se charge en silice (9 < pH < 10,5) et à la formation d'une pellicule d'altération à la surface du verre (gel). La vitesse de dissolution observée est appelée « vitesse résiduelle » (V<sub>r</sub>). Par exemple, pour le verre de type R7/T7, la valeur de la vitesse V<sub>r</sub> à 90 °C est de l'ordre de 10<sup>-4</sup> g.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>. Le temps nécessaire à la diminution de la vitesse de lixiviation est variable en fonction du caractère irradiant des colis et du pouvoir de rétention de la silice par les matériaux environnant. Selon l'ANDRA, ce temps est compris, en fonction de la température au contact des colis, entre 3 et 10 ans et correspond à la dissolution d'environ 1 % de la masse du déchet à la vitesse V<sub>0</sub>.

Pour décrire le relâchement des radionucléides, l'ANDRA a retenu deux modèles : le modèle «  $V_0.S$  » qui correspond à une dissolution du verre à la vitesse constante  $V_0$  et un deuxième modèle «  $V_0.S \rightarrow V_r$  » qui correspond à une dissolution à la vitesse  $V_0$  suivie, après saturation en silice des matériaux entourant le colis et obtention de l'équilibre, d'une dissolution à la vitesse résiduelle  $V_r$ . Le relâchement calculé avec ces modèles dépend de la surface lixiviée. Cette surface est fonction du taux de fracturation du verre (taux de fracturation =  $S(\text{réellement lixiviée}) / S(\text{théorique initiale du colis})$ ) qui a été estimé par tomographie sur des colis inactifs (compris entre 2 et 15) et d'après les résultats d'expériences de lixiviation (compris entre 4 et 40). Les valeurs retenues par l'ANDRA sont 5 pour le régime de dissolution à vitesse  $V_0$  et 40 pour celui à vitesse  $V_r$ . Le choix de ces valeurs est justifié par le fait que, selon l'ANDRA, les fractures les plus fines ne sont pas accessibles à la lixiviation dans les premiers temps. La valeur de  $V_0$  utilisée dans le modèle «  $V_0.S$  » est variable en fonction de la température du déchet (entre 25 et 100°C) et des conditions de pH (7 et 10) ; elle est estimée sur la base des résultats des essais. Selon le modèle «  $V_0.S$  » un colis de déchet vitrifié relâche toute son activité sur une période variant, selon les colis, entre 35 ans et 9 900 ans. Le modèle «  $V_0.S$  » a été retenu par l'ANDRA pour les colis de déchets vitrifiés anciens (Marcoule) et pour les colis UMo (aucune étude n'étant actuellement disponible quant à la formation du gel sur un verre de type vitrocéramique) et pour tous les colis dans le cadre des scénarios d'évolution altérée (SEA) (cf. chapitre 7.3.1 du présent rapport). La valeur de la vitesse de dissolution résiduelle  $V_r$ , utilisée dans le modèle «  $V_0.S \rightarrow V_r$  » est, elle aussi, variable en fonction de la température. Sa valeur est estimée sur la base des résultats des essais de lixiviation effectués entre 50 et 150°C. Pour les températures inférieures à 50°C, l'ANDRA fait le choix de retenir, de façon conservatrice, la valeur  $V_r(50^\circ\text{C})$ , mesurée à 50°C, alors que celle-ci décroît pour les températures plus basses. Selon le modèle «  $V_0.S \rightarrow V_r$  », un colis de déchet vitrifié relâche toute son activité sur une période d'environ 300 000 ans [57]. Ce modèle a été retenu pour les colis R7/T7 et pour les colis futurs (colis de déchets vitrifié de puissance thermique plus élevée que les colis R7/T7 actuels, colis issus du traitement des combustibles UOX/MOX et verres au Pu).

**L'IRSN estime que la description de l'évolution des déchets vitrifiés en présence d'eau, présentée par l'ANDRA dans le document [7], est en accord avec l'état des connaissances actuelles. Les modèles utilisés pour décrire cette évolution sont applicables et conduisent à une estimation raisonnablement enveloppe des relâchements d'activité par les colis de déchets vitrifiés, suffisante dans le cadre des études de faisabilité du stockage. Par ailleurs, l'ANDRA a effectué une étude de sensibilité en situation normale en appliquant l'un ou l'autre des deux modèles à l'ensemble des colis. En situation altérée, le modèle «  $V_0.S$  » a été retenu et l'étude de sensibilité a porté sur la vitesse de la valeur  $V_0$ . Les valeurs utilisées correspondent bien, dans les conditions étudiées (défaut de scellement, défaut de conteneur) à des valeurs traduisant de façon pénalisante les effets possibles des défauts postulés. Toutefois, pour ce qui concerne les colis de déchets vitrifiés futurs qui seraient éventuellement produits selon de nouvelles spécifications (environ 27 000 sur les 36 000 colis de déchets vitrifiés totaux, cf. Annexe T1 au présent rapport), l'IRSN relève que l'ANDRA fait l'hypothèse qu'ils possèdent des propriétés de confinement équivalentes à celle des verres R7/T7 actuellement produits ; cette hypothèse devra être validée, notamment au regard des différences attendues pour ces colis (utilisation éventuelle du creuset froid, nouvelles formulations du verre, incorporation d'une quantité de curium plus élevée que dans les verres R7/T7 actuels, puissance thermique plus élevée...). L'IRSN relève également que l'ANDRA a identifié certains mécanismes susceptibles de faire évoluer le taux de fracturation en stockage (fissuration chimique, relaxation des contraintes thermiques, mise en charge des colis par la roche, colmatage des vides résiduels du colis primaires). Cependant, le taux de fracturation n'est pas considéré comme variable dans le temps dans les modèles. L'IRSN estime que des connaissances doivent encore être acquises afin d'apprécier plus précisément les taux de fracturation des colis de déchets vitrifiés produits de façon industrielle, notamment par des essais à l'échelle 1 plus nombreux que ceux disponibles actuellement. À cet égard, l'IRSN estime que l'intérêt d'observer la fracturation de colis réels, entreposés depuis quelques années, devra être évalué. De telles investigations pourraient également être mises à profit pour valider les caractéristiques et les propriétés du déchet produit industriellement (incorporation des fines, recristallisation, homogénéité de répartition de l'activité, vitesse de lixiviation...). Enfin, la possibilité de fracturations supplémentaires liée à la remise en charge des colis par la roche**

devra être évaluée. Pour ce qui concerne la mise en place du régime de lixiviation du verre à vitesse résiduelle  $V_r$ , des incertitudes subsistent encore sur les mécanismes de formation du gel et sur sa pérennité, notamment au regard de l'influence des matériaux environnant les colis (produits de corrosion de l'acier, matériaux argileux). Toutefois, étant donnés les faibles renouvellements d'eau attendus sur le long terme au contact des déchets, la saturation en silice de l'eau de lixiviation devrait, indépendamment des propriétés du gel, limiter la dissolution de la matrice vitreuse. L'IRSN estime donc que le modèle «  $V_0.S \rightarrow V_r$  », retenu par l'ANDRA, reste pertinent malgré les incertitudes précitées. L'IRSN estime néanmoins que l'ANDRA devra s'assurer que les matériaux qui seront retenus pour les intercalaires et, plus généralement, les matériaux qui entourent les colis, ne possèdent pas de propriété de rétention importante de la silice préjudiciable au maintien des conditions de saturation en silice du champ proche.

### 7.1.1.2 Les colis de combustibles irradiés

Les colis de stockage de combustibles usés, décrits dans le document [2] sont constitués de conteneurs métalliques qui ont notamment pour fonction d'empêcher le contact entre l'eau de resaturation des alvéoles et les assemblages pendant une période au moins égale à 10 000 ans (cf. chapitre 5.4.3). Les assemblages de combustibles usés, éventuellement conditionnés individuellement dans un étui en acier inoxydable, sont groupés par quatre au sein des conteneurs (virole en acier noir d'épaisseur 110 mm, diamètre 1 250 mm, poids total d'environ 40 tonnes), séparés par un insert en fonte. Cette géométrie est retenue pour les assemblages contenant des pastilles d'oxyde d'uranium (assemblages de type UOX et URE). Pour les combustibles contenant des pastilles d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (assemblages de type MOX), leur puissance thermique impose, afin de préserver une température de 90°C en surface des colis, de n'introduire qu'un seul assemblage par conteneur (virole en acier noir d'épaisseur 120 mm, diamètre 620 mm, poids total d'environ 10 tonnes).

Dans les assemblages de combustibles usés, les radionucléides sont localisés majoritairement dans les pastilles d'UOX et de MOX, mais également dans les matériaux métalliques de structure (gainnes des crayons, ressorts, embouts, vis...). Il faut aussi noter que des gaz de fission sont présents dans les vides situés à l'intérieur des crayons. Pour décrire le relâchement des radionucléides par les colis de combustibles usés, l'ANDRA utilise trois modèles en fonction de la localisation des radionucléides [7].

Pour ce qui concerne l'activité contenue à l'intérieur des crayons, l'ANDRA considère un relâchement immédiat, dès l'arrivée de l'eau au contact du déchet après corrosion du conteneur, des radionucléides présents dans les vides entre la pastille et la gaine, entre les pastilles (gap), dans les joints de grains, dans le « rim » (zone périphérique des pastilles soumise au flux neutronique le plus intense et où le taux de combustion est localement élevé), ainsi que dans les amas de Pu [7]. Cette fraction de l'inventaire est appelée fraction labile et concerne les radionucléides  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{125}\text{Sn}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ; elle varie en fonction du taux de combustion des assemblages. L'ANDRA retient des pourcentages d'activité labile variant en fonction du radionucléide concerné entre 2 et 10 % environ pour les combustibles UOX et entre 5 et 30 % environ pour les combustibles MOX.

Les radionucléides présents dans les grains de la pastille sont relâchés au fur et à mesure de la dissolution de l'oxyde au contact de l'eau de resaturation. Celle-ci est accélérée par les produits agressifs issus de la radiolyse de l'eau (dissolution dite « radiolytique »). L'ANDRA tient compte de ce phénomène dans la modélisation du relâchement des radionucléides par les pastilles. Par ailleurs, de façon conservative, l'ANDRA ne tient pas compte de certains phénomènes susceptibles de diminuer la dissolution « radiolytique », notamment la présence éventuelle d'espèces réductrices ou la formation d'une couche d'uranium VI à la surface de la pastille [7] [57]. La durée totale du relâchement des pastilles UOX ou MOX est d'environ 100 000 ans.

Pour ce qui concerne l'activité associée aux pièces métalliques de structure (produits d'activation), l'ANDRA considère qu'elle est relâchée au fur et à mesure de leur corrosion. Les autres radionucléides associés à ces pièces métalliques (produits de fission implantés dans la couche de zircone à l'intérieur des crayons et contaminants à l'extérieur des crayons) sont considérés comme labiles [7] [57]. Les vitesses de corrosion des pièces métalliques

attendues sont plus élevées dans le cas des combustibles irradiés que dans le cas des déchets B (cf. chapitre 7.1.1.3 du présent rapport) et sont de l'ordre des vitesses dites « majorantes » trouvées dans la littérature (par exemple  $2.10^{-2} \mu\text{m.an}^{-1}$  pour la gaine en zircaloy). Elles conduisent à un relâchement total de l'activité des pièces métalliques, en fonction de leur taille, compris entre 500 ans (pièces en Inconel) et 20 000 ans (gaines en zircaloy).

Dans le rapport DSU n° 32 présenté le 8 juin 2004 lors de la réunion du groupe permanent « déchets » consacrée à l'examen des phénomènes géochimiques dans un stockage en formation géologique sur le site de Bure, l'IRSN estimait qu'afin de tenir compte des incertitudes relatives au pourcentage d'activité labile, aux valeurs des vitesses de dissolution des pastilles et aux vitesses de corrosion des pièces métalliques des assemblages, l'ANDRA devait mener des études de sensibilité afin d'apprécier l'influence de ces paramètres sur la sûreté globale du stockage. L'IRSN relève que l'ANDRA a effectué des études de sensibilité sur les vitesses de dissolution dans le cadre du scénario d'évolution normale (SEN) et du SEA, pour les combustibles autres que les MOX (cf. chapitre 7.3.1 du présent rapport) et, indirectement, sur la corrosion des déchets activés par l'intermédiaire des études sur les déchets B (cf. chapitre 7.1.1.3 du présent rapport). Pour ce qui concerne la proportion d'activité labile, l'ANDRA n'a pas formellement effectué cette étude, cependant, les vitesses de dissolution de la matrice dans le cas du SEA sont pénalisantes (relâchement en 100 ans) et conduisent à un relâchement qui s'apparente à un relâchement labile. Par ailleurs, l'étude de sensibilité effectuée sur les taux de combustion entraîne également des variations de la fraction d'activité labile.

**L'IRSN estime que les modèles utilisés par l'ANDRA sont en accord avec les connaissances actuelles et qu'ils sont suffisants pour estimer le relâchement de l'activité des colis de combustibles usés dans le cadre des études de faisabilité du stockage.** La connaissance des phénomènes mis en jeu lors du relâchement des radionucléides par des objets aussi complexes que les assemblages combustibles, même si elle a beaucoup progressée à la suite des programmes d'études menés ces dernières années, reste cependant encore parcellaire sur un certain nombre de points (diffusion accélérée par auto-irradiation alpha, solubilité des amas de Pu, effet de l'hydrogène, influence de la composition de l'eau, influence des cycles en réacteur, mode de contrôle de la dissolution de l'oxyde...). Il est possible qu'une meilleure connaissance de ces phénomènes puisse contribuer à retenir des cinétiques de relâchement plus lentes pour ce type de colis. Cependant, au stade actuel, il semble, comme l'indique l'ANDRA, que ce gain restera limité et ne permettra pas de gagner des marges significatives conduisant à une baisse d'un ordre de grandeur sur les conséquences radiologiques du stockage (cf. chapitre 7 du présent rapport).

### **7.1.1.3 Les colis de déchets B**

**Colis de déchets activés, colis de coques et embouts cimentés et colis standard de coques et embouts compactés**

Les colis de déchets activés (grappes et déchets métalliques divers provenant des réacteurs à eau pressurisée et à neutrons rapides d'EDF), les colis de coques et embouts cimentés et les colis standards de coques et embouts compactés (CSD-C) contiennent des déchets, totalement, ou à forte proportion, métalliques, pour lesquels une grande partie de l'inventaire est composée de produits d'activation ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ...). En stockage, ces radionucléides ne peuvent pas être relâchés préalablement à l'altération des pièces métalliques par corrosion. Les métaux présents dans ces colis sont les alliages de zirconium des coques produites par le cisailage des crayons de combustible lors des opérations de traitement, l'acier inoxydable provenant, notamment, des embouts des assemblages combustibles traités et l'Inconel des petites pièces de structure des assemblages, par exemple certains ressorts de grilles. L'ANDRA considère que le relâchement des produits d'activation contenus dans ces pièces métalliques est linéaire, l'activité relâchée par an, par type de pièce, étant appréciée à partir de la vitesse de corrosion du matériau en milieu cimentaire, issue de la littérature (cf. Tableau 13), et de la taille des pièces métalliques. L'ANDRA considère comme conservatif le fait de ne pas tenir compte, dans sa modélisation du

relâchement, de la présence de la couche d'oxyde (diffusion, dissolution). Selon le modèle utilisé, les pièces métalliques relâchent toute leur activité sur des périodes variant, selon les pièces, entre 14 000 et 200 000 ans ([7]). L'ANDRA a identifié un certain nombre de phénomènes susceptibles d'accélérer la corrosion en situation de stockage, notamment la corrosion galvanique (par exemple entre l'Inconel et le Zircaloy 4) ou la présence d'ions oxydants ( $\text{Sn}^{2+}$  ou  $\text{Pb}^{2+}$ ) ([7] complété par la lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0204 du 19 septembre 2005). L'ANDRA estime néanmoins que, les métaux en question se protégeant spontanément et rapidement de la corrosion par une couche d'oxyde, ces phénomènes ne sont pas susceptibles d'augmenter significativement les relâchements.

L'IRSN estime que le modèle utilisé par l'ANDRA est applicable, dans le cadre des études de faisabilité du stockage, pour traduire le relâchement des produits d'activation contenus dans les colis de déchets activés, les colis de coques et embouts cimentés et les colis standard de coques et embouts compactés. Toutefois, au vu de la complexité des phénomènes de corrosion, de tenue de l'oxyde, de radiolyse (création éventuelle d'espèces oxydantes au contact du déchet) qui seront mis en jeu en situation de stockage sur des mélanges de pièces métalliques d'états physico-chimiques plus ou moins maîtrisés (hydruration, présence de défauts d'irradiation, impact du traitement, fissuration au compactage...), l'IRSN considère que des vitesses de corrosion plus rapides auraient dû être retenues par l'ANDRA à titre d'hypothèse raisonnablement majorante convenant à la description de l'évolution normale du stockage. Toutefois, l'IRSN note que l'ANDRA a étudié l'influence d'un relâchement immédiat des radionucléides dans l'étude de sensibilité. Celui-ci n'entraîne pas de modification notable des conséquences radiologiques du stockage. La vitesse de corrosion ne semble donc pas, dans l'état actuel des études, être un paramètre sensible [4]. L'incertitude sur la vitesse de corrosion en stockage ne pèse donc pas significativement sur les résultats des études de sûreté et d'impact à ce stade, mais il faudra, en cas de poursuite du projet, mieux cerner les valeurs à retenir dans les évaluations de sûreté, notamment en identifiant celles qui caractérisent l'évolution normale du stockage (raisonnablement majorante) et celles qui caractérisent l'évolution altérée (éventuellement best-estimate), compte tenu des conditions physico-chimiques correspondant à ces situations. Par ailleurs, en situation altérée, il n'apparaît pas que des venues d'eau oxydante au contact des colis puissent être telles qu'elles modifient significativement l'environnement chimique des pièces métalliques au point d'augmenter le relâchement des radionucléides par ces colis.

Matériaux	Vitesse de corrosion ( $\mu\text{m.an}^{-1}$ )
Alliages de Nickel	$10^{-2}$ (vitesse dite « best estimate »)
	$2 \cdot 10^{-1}$ (vitesse dite « majorante »)
Aciers inoxydables	$10^{-2}$ (vitesse dite « best estimate »)
	$2 \cdot 10^{-1}$ (vitesse dite « majorante »)
Alliages de Zirconium	$2 \cdot 10^{-3}$ (vitesse dite « best estimate »)
	$2 \cdot 10^{-2}$ (vitesse dite « majorante »)

Tableau 13 - Vitesses de corrosion en stockage des alliages métalliques présents dans les déchets retenues par l'ANDRA [7].

Les autres radionucléides présents dans ces colis sont associés à des déchets qui peuvent être, soit non métalliques (carbure de bore, pyrex, éventuels déchets technologiques en matière organiques...), soit des alliages métalliques présents de façon globalement minoritaire dans des déchets particuliers (alliage AIC des barres, magnésium issu du traitement des UNGG...) ou qui s'apparentent à une contamination (produits de fission inclus dans la zircone, dépôts solides résiduels présents à la surface des coques, fines de taille inférieure au millimètre...). De façon pénalisante, l'ANDRA considère que tous ces radionucléides sont relâchés instantanément dès l'arrivée de l'eau de

resaturation au contact du déchet [7]. Au regard de la complexité des formes physico-chimiques dans lesquelles se trouvent les radionucléides en question et des aléas de connaissance concernant leurs mécanismes de relâchement, l'IRSN estime que le choix de l'ANDRA est pertinent.

### Colis de boues bitumées

Les déchets conditionnés dans les colis de boues bitumées sont des boues produites par les procédés de décontamination des effluents liquides collectés par les stations de traitement des usines de COGEMA (La Hague et Marcoule) par coprécipitation chimique (ajout de sels inorganiques pour insolubiliser les radionucléides). Ces boues sont séchées lors de leur mélange à chaud avec le bitume dans une extrudeuse. L'enrobé obtenu est coulé dans des fûts en acier inoxydable (les fûts produits à Marcoule avant 1994 ont été coulés dans des fûts en acier non allié, ils seront conditionnés avant stockage dans des surfûts en acier inoxydable, un matériau non compressible sera éventuellement ajouté entre le fût et le surfût). Le couvercle est serti afin que les gaz produits au sein des colis par la radiolyse de la matrice bitumineuse, principalement de l'hydrogène, soient évacués. Les colis de boues bitumées ne seront pas mélangés à d'autres colis de déchets B au sein des alvéoles de stockage. Ils disposeront d'alvéoles particuliers, dimensionnés de telle sorte (densité, éloignement des alvéoles contenant des déchets exothermiques) que leur température ne soit jamais supérieure à 30°C afin, selon l'ANDRA, de conserver le caractère visqueux du bitume et de pouvoir négliger les phénomènes de sédimentation des boues dans le colis [7].

Selon l'ANDRA, la cause du relâchement des radionucléides par les colis de boues bitumées, est la diffusion de l'eau de resaturation des alvéoles dans l'enrobé. L'eau transférée par diffusion vers l'intérieur des colis solubilise les sels inorganiques et les radionucléides ; ceux-ci sont relâchés après transfert vers l'extérieur du colis. La zone de l'enrobé dans laquelle se situent ces phénomènes de diffusion est appelée zone « perméable » ou zone « altérée ». Outre les espèces contenues dans les boues, des molécules organiques provenant du bitume et de sa dégradation sont également relâchées. En effet, des phénomènes susceptibles d'altérer la matrice bitume en situation d'entreposage ou de stockage (biodégradation, radiolyse, pH) et de favoriser sa solubilisation ont été identifiés, mais l'ANDRA ne considère pas qu'ils puissent accélérer significativement le relâchement des radionucléides par les colis. La diffusion de l'eau dans les enrobés conduit à leur gonflement [7].

Un modèle théorique a été présenté par l'ANDRA afin de rendre compte du relâchement des colis de déchets bitumés (modèle COLONBO). Ce modèle s'applique à un colis de forme cylindrique, contenant un enrobé homogène, susceptible de gonfler librement par reprise d'eau. Différentes options peuvent être envisagées selon que la diffusion à travers la zone « perméable » et la solubilité des radionucléides sont, ou ne sont pas, prises en compte. Conformément au caractère diffusif des transferts modélisés, les relâchements s'effectuent selon une cinétique en racine carrée du temps. Toutefois, des phénomènes observés lors de certains essais, notamment l'apparition de fissures à la surface des enrobés ou des relâchements à des vitesses plus élevées que prévues (notamment sur des enrobés de type STEL Marcoule ou sur des enrobés prélevés sur des colis réels) conduisent l'ANDRA à ne pas tenir compte de la limitation due au transfert des radionucléides solubilisés vers l'extérieur du colis à travers la zone « perméable ». Le modèle retenu par l'ANDRA dans le calcul de référence fait donc l'hypothèse que les radionucléides sont solubilisés et relâchés à la même vitesse que le nitrate de sodium, sel très soluble présent dans les colis ; ce modèle dit de « dégradation » conduit au relâchement de 90 % de l'activité sur une période de 10 000 ans selon une cinétique en racine carrée du temps [7].

L'ANDRA a identifié certains phénomènes susceptibles de rendre le modèle COLONBO inapplicable, notamment l'inhomogénéité de certains enrobés (par exemple celle des colis anciens de Marcoule), la présence éventuelle de bulles au sein de l'enrobé et l'observation d'accélération du relâchement lors de certains essais. Ainsi, « *la prédictibilité du modèle* » ne serait pas garantie. Par ailleurs, des études récentes, présentées par l'ANDRA, remettent en question la cinétique de relâchement en racine carrée du temps. Afin de couvrir toutes les incertitudes, un modèle n'attribuant aucun rôle de confinement à la matrice bitume a été développé ; les radionucléides (considérés comme associés au nitrate de sodium) sont dissous puis relâchés à mesure de l'arrivée de l'eau de resaturation dans l'alvéole ; ce modèle dit « pénalisant » conduit au relâchement de l'ensemble des

radionucléides sur une période de 1 000 ans selon une cinétique linéaire. C'est ce modèle qui a été utilisé dans les calculs de sensibilité pour estimer l'influence de la cinétique de relâchement des colis sur le confinement des radionucléides par le stockage ([7] [4]).

L'IRSN estime que la modélisation du relâchement de l'activité contenue dans les colis de boues bitumées est un problème extrêmement complexe. En effet, les propriétés physico-chimiques des radionucléides correspondants ne sont pas connues précisément (spéciation, solubilité...) et des incertitudes subsistent quant à l'impact, sur le relâchement, des propriétés de la matrice et de son évolution en situation de stockage (homogénéité de l'enrobé, fissuration, durcissement par radiolyse, cinétique du relâchement...). Au vu de la complexité chimique du déchet (mélange d'une dizaine de sels inorganiques plus ou moins altérés par le passage en extrudeuse ou le vieillissement en entreposage) et de la matrice utilisée pour le conditionner (le bitume est un mélange de plusieurs familles de composés organiques lourds), il est même peu probable que l'ensemble des phénomènes concourant à l'altération de l'enrobé et au relâchement des radionucléides puisse être accessible à la connaissance par le biais des études actuelles. À cet égard, il faut noter que les homologues étrangers de l'ANDRA (ONDRAF (Belgique), NAGRA (Suisse) et RWMC (Japon)) n'attribuent aucune performance de confinement à long terme aux déchets bitumés qu'ils étudient et considèrent, de manière conservatrice, leur relâchement comme immédiat (activité labile) [7]. Par ailleurs, les boues bitumées conditionnées présentent des caractéristiques diverses en terme de composition chimique (nature des réactifs de coprécipitation utilisés, teneur en sels solubles, teneur en complexants organiques qui peut être élevée), d'activité (teneur en émetteurs alpha), mais aussi, notamment pour les boues STE2, en terme de procédé de fabrication (ajout de sels de cobalt). De plus, une part importante des colis produits à Marcoule avant 1994 (environ 58 000 colis) pourrait faire l'objet, avant stockage, d'opérations d'ajout de matériau non compressible encore non définies à l'heure actuelle, afin de combler le vide présent entre le fût de déchet et le surfût dans lequel il est reconditionné. L'IRSN estime que cette variabilité rend difficile la validation de l'application d'un seul modèle de relâchement à l'ensemble des familles de colis. **Aussi, même si le modèle dit de « dégradation » utilisé par l'ANDRA dans le calcul de référence est basé sur des hypothèses de diffusion et de dissolution des radionucléides pénalisantes, son applicabilité n'est pas acquise en raison, d'une part des phénomènes évoqués ci-avant, d'autre part du fluage du bitume susceptible d'intervenir en stockage après dégradation mécanique des colis de stockage (corrosion des fibres et des armatures métalliques du surconteneur en béton, pression de gonflement sous eau de l'enrobé, écoulement dans les vides...).** Le seul modèle robuste dont dispose l'ANDRA est le modèle dit « pénalisant », basé sur l'arrivée de l'eau dans les alvéoles, même s'il surestime à l'évidence largement le relâchement qui est attendu de ces colis (non prise en compte du bitume et de la solubilité des radionucléides) ; il aurait dû être retenu dans le cadre du SEN. Toutefois, l'IRSN note que l'étude de sensibilité menée par l'ANDRA montre que l'utilisation de l'un ou l'autre des modèles n'entraîne pas de modification notable de l'impact et que la vitesse de relâchement des colis de boues bitumées ne semble donc pas, dans l'état actuel des études, être un paramètre sensible de l'évaluation de sûreté du stockage. L'incertitude sur la cinétique du relâchement des radionucléides par les colis de boues bitumées ne pèse donc pas significativement sur les résultats des études de sûreté et d'impact à ce stade, mais il faudra, en cas de poursuite du projet, faire des choix entre des modèles dont l'applicabilité a été démontrée afin de définir clairement les valeurs à retenir pour caractériser l'évolution normale du stockage (raisonnablement majorante) et l'évolution altérée (éventuellement « best-estimate »). L'IRSN estime que, dans le cas d'une situation altérée où les apports en eau dans les alvéoles seraient plus importants que ceux retenus dans le cadre du modèle « pénalisant », un certain rôle de confinement pourrait quand même être reconnu à la matrice bitume.

#### **Autres colis de déchets B**

Pour les autres colis de déchets B présents dans l'inventaire, c'est à dire notamment des colis contenant des déchets technologiques cimentés ou compactés, des déchets de structures et technologiques en vrac, des sources et des déchets contenant des émetteurs alpha (notamment radium et américium) (cf. Annexe T1 du présent rapport), l'ANDRA a fait le choix de considérer leur activité comme labile. Cette hypothèse est justifiée par le fait

que la nature de ces déchets est souvent complexe, que leur activité s'apparente souvent à une contamination et que la forme physico-chimique sous laquelle se trouvent les radionucléides correspondants n'est pas maîtrisée par les producteurs [7]. L'IRSN considère que ce choix est pertinent.

## 7.1.2 LES CONTENEURS DE DÉCHETS

### 7.1.2.1 Les compléments de colisage des déchets B

L'ANDRA prévoit, comme indiqué au chapitre 4.2 du présent rapport, de placer les colis primaires de déchets B dans des conteneurs parallélépipédiques en béton. Le principe de l'utilisation de surconteneur en béton pour le stockage des déchets B est une option également étudiée par NAGRA (Suisse) et par RWMC (Japon) [2]. L'IRSN estime que ce principe est préférable au stockage direct des colis primaires de déchet B. Il faut cependant souligner que, si des démonstrateurs industriels de ces surconteneurs ont été fabriqués à Marcoule, ils n'ont, jusqu'à présent, été utilisés que pour tester en laboratoire des procédés de fabrication (mise en œuvre des formulations de béton, réalisation des moules...) et pas les propriétés des conteneurs réalisés. La démonstration de l'obtention des propriétés recherchées pour ce surconteneur de stockage nécessitera par conséquent des compléments par rapport aux données disponibles. L'IRSN estime que cette démonstration devrait cependant pouvoir être apportée sans difficulté majeure. En tout état de cause, les performances de confinement qui sont actuellement visées concernent essentiellement la sûreté en exploitation/réversibilité du stockage. À long terme, l'ANDRA n'attribue aucun rôle spécifique au surconteneur de déchets. Seule sont prises en compte dans les alvéoles de déchets B des propriétés de rétention et d'insolubilisation typique des matériaux cimentaires (surconteneur et revêtement) pour estimer le flux d'activité relâché dans et hors des alvéoles. Comme indiqué au chapitre 5.4.2 du présent rapport, les propriétés de confinement hydraulique des surconteneurs retenues pour ces estimations par l'ANDRA sont faibles, afin de tenir compte des incertitudes existantes sur leur évolution à long terme. Ces hypothèses n'appellent pas de commentaires de la part de l'IRSN.

L'IRSN signale qu'à titre exploratoire, l'ANDRA développe, parallèlement au surconteneur décrit précédemment, un surconteneur de stockage possédant des propriétés de confinement des radionucléides sur une période plurimillénaire. Ce surconteneur, qui ne serait utilisé que pour les déchets primaires ne dégageant pas de gaz de radiolyse, est constitué d'un béton dit « de haute performance » présentant notamment des propriétés hydrauliques entraînant un retard à la diffusion des radionucléides [25]. L'IRSN souligne, d'ores et déjà, que la recherche d'une capacité de confinement élevée des surconteneurs présente par nature un intérêt pour la sûreté, mais considère que la démonstration de la faisabilité de ces objets sera difficile à apporter, notamment en raison des incertitudes existantes sur la conservation dans le temps des propriétés des bétons.

### 7.1.2.2 Les conteneurs et surconteneurs de déchets exothermiques

L'IRSN rappelle que la fonction principale allouée par l'ANDRA, dans le Dossier 2005 Argile, aux surconteneurs de déchets vitrifiés et aux conteneurs de combustibles usés est « *d'interdire l'arrivée d'eau au contact du verre ou des assemblages de combustibles usés pendant la période caractérisée par une température relativement élevée* » [4]. Dans l'évaluation des performances à long terme du stockage, l'ANDRA retient en référence une performance d'étanchéité totale des surconteneurs et conteneurs respectivement de 4 000 et 10 000 ans, et prend en compte plusieurs situations de défaillance représentées par une perte totale d'étanchéité (« disparition » de (sur)conteneurs) à une date de l'ordre du siècle après la fermeture du stockage.

Pour les calculs de référence en scénario d'évolution normale, une défaillance initiale due à un défaut de fabrication de 3 surconteneurs de déchets vitrifiés (sur un peu plus de 50 000) et de 2 conteneurs de combustibles usés (sur 17 500) est postulée. L'ANDRA considère que, compte tenu des systèmes de contrôles qu'il serait possible

de mettre en place sur la fabrication des (sur)conteneurs et du caractère relativement simple de la conception de ces objets, ce choix est basé sur les probabilités de un pour dix mille à un pour cent mille généralement considérées dans l'industrie nucléaire pour ce type de défaut. Des hypothèses de défaillance plus drastiques sont traitées en scénario d'évolution altérée (scénario « défaut de colis »). Un premier cas suppose un mois de fabrication défectueuse non détectée par le système de contrôle qualité, soit 135 surconteneurs de déchets vitrifiés et 42 conteneurs de combustibles usés. Le second cas prend en compte une défaillance complète de l'ensemble de l'inventaire des (sur)conteneurs de déchets vitrifiés et de combustibles usés, due par exemple à une mauvaise appréciation de la résistance à la corrosion des (sur)conteneurs.

L'IRSN convient qu'il existe des méthodes industrielles éprouvées qui permettent d'obtenir de bonnes qualités métallurgiques pour des objets en acier non allié de dimensions similaires à celles des (sur)conteneurs. Le taux de défaillance des (sur)conteneurs due à un défaut de fabrication non détecté par les systèmes de contrôles et qui s'exprimerait immédiatement après la mise en stockage devrait par conséquent rester faible. Par ailleurs, comme indiqué au chapitre 5.4.3 du présent rapport, l'IRSN considère que les connaissances actuellement disponibles sur la tenue des (sur)conteneurs à la corrosion en conditions de stockage ne permettent pas de garantir leur étanchéité sur les durées visées par l'ANDRA (4 000 et 10 000 ans) et estime qu'il conviendra de vérifier sur la base de nouvelles investigations la pertinence des épaisseurs retenues. À cet égard, l'IRSN constate que l'hypothèse d'une perte prématurée d'étanchéité de l'ensemble des (sur)conteneurs traitée en scénario altéré permet de couvrir le cas où les phénomènes de corrosion sont plus sévères que ceux retenus en référence par l'ANDRA.

Par ailleurs, l'IRSN convient, d'une part qu'il est difficile à ce stade des connaissances de fixer a priori des taux de défaillance caractéristiques de situations d'évolution normale ou altérées, d'autre part que l'hypothèse d'une disparition « complète » de la fonction de confinement après une durée de l'ordre du siècle est très pénalisante. En outre, l'IRSN observe que les trois cas de défaillance traités par l'ANDRA présentent l'intérêt de couvrir divers taux de défaillance possibles et permettent ainsi d'apprécier leur influence sur l'activité relâchée dans les ouvrages de stockage. Les résultats de calculs indiquent (cf. chapitre 7.3.1 du présent rapport) que le confinement des radionucléides à l'échelle du stockage est peu sensible à la perte prématurée d'étanchéité des (sur)conteneurs. Néanmoins, au titre des bonnes pratiques, l'IRSN considère qu'il conviendra de s'assurer que les taux de défaillances qui seront retenus dans les étapes futures du projet sont en accord avec les résultats des investigations qui auront été menées et les orientations qui auront été prises.

Aussi, l'IRSN considère que les cas de défaillance de (sur)conteneurs traités en première approche par l'ANDRA sont suffisants à ce stade. Il conviendra toutefois, dans une étape future du projet, de préciser les estimations des taux de défaillances possibles, sur la base notamment des résultats d'un programme d'étude et de développement des (sur)conteneurs.

### 7.1.3 LES BARRIÈRES OUVRAGÉES ARGILEUSES

#### Performances hydrauliques attendues

Les scellements ont pour principale fonction de « s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage ». Le tome « *Évaluation de sûreté du stockage géologique* » [4] rappelle que cette fonction n'a pas été confiée aux remblais, « *comme cela aurait également pu être imaginé a priori* » et bien que l'ANDRA considère qu'il soit possible d'atteindre des perméabilités de l'ordre de  $10^{-8}$  m/s. L'ANDRA précise également que les bouchons d'alvéoles de déchets C et de combustibles usés ne remplissent cette fonction qu'« *à titre complémentaire* », même s'ils sont considérés comme défaillants dans le scénario d'évolution altéré « *du fait de leur nature similaire à celle des autres scellements* ».

Typiquement, un scellement est constitué d'un noyau en argile gonflante encadré de massifs d'appui en béton qui ont pour fonction de limiter les déplacements longitudinaux du noyau et de favoriser le développement de la

pression de gonflement. À plus long terme, après dégradation des massifs d'appuis en béton, la fonction de confinement du noyau est reprise par les remblais adjacents.

Le tome « *Architecture et gestion du stockage géologique* » [2] indique que des dispositions particulières visant « à minimiser l'endommagement ou l'extension de la zone endommagée » sont envisagées pour les tronçons de galeries destinés à recevoir un scellement, notamment : un diamètre excavé limité à 7,50 m, une orientation parallèle à la direction de la contrainte naturelle majeure, une section droite pratiquement circulaire, un soutènement composé de cintres métalliques et de 30 cm de béton projeté fibré (de préférence aux boulons qui pourraient nuire à l'intégrité des argilites) posés à l'avancement et un revêtement en béton coulé de 80 cm d'épaisseur mis en place dans un délai inférieur à 2 mois. L'IRSN estime que ces dispositions vont effectivement dans le sens d'une limitation et d'une stabilisation de la zone endommagée. L'ANDRA ajoute qu'en fonction de l'étendue et de la perméabilité de la zone endommagée rencontrée, et plus particulièrement de la présence ou non d'une zone fracturée, deux options de conceptions sont considérées.

La première option concerne les ouvrages à sceller autour desquels la zone endommagée est d'extension limitée. Elle consiste à déposer le revêtement en béton sur toute la longueur du noyau d'argile et à mettre en place l'argile gonflante directement au contact des argilites. L'ANDRA se réfère aux essais EH et SELFRAC réalisés dans le laboratoire du Mont Terri et estime que dans cette configuration, la pression exercée par le gonflement du noyau d'une part, le comportement différé des argilites d'autre part, peuvent conduire à refermer la fissuration et à restaurer une perméabilité de la zone endommagée proche de celle de la roche non endommagée. Au stade actuel des connaissances, l'ANDRA retient cette option de conception pour le scellement des puits car le noyau gonflant devrait pouvoir être mis en place dans la partie supérieure de la formation hôte (unité géomécanique A) où les conditions géomécaniques sont plus favorables. L'IRSN note que l'essai EH réalisé au Mont Terri montre que la transmissivité hydraulique d'une fracture de décompression particulière peut diminuer d'un ordre de grandeur en quelques années avec le gonflement induit par la resaturation, et de deux ordres de grandeur pour un volume de roche instrumenté. L'essai SELFRAC montre que l'application d'une pression mécanique de 4 MPa à 5 MPa sur un volume de roche peut en diminuer la transmissivité hydraulique de deux ordres de grandeur supplémentaires. **L'IRSN estime que ces éléments sont encourageants mais qu'ils doivent néanmoins être confirmés au laboratoire souterrain de Bure.**

La seconde option concerne les ouvrages autour desquels existe une zone endommagée de plus grande extension, avec notamment la présence d'une zone fracturée. Dans ce cas, l'ANDRA considère que de plus grandes incertitudes subsistent sur la possibilité de retrouver une perméabilité de la zone endommagée proche de celle de la roche non endommagée. L'option consiste alors à ne déposer le revêtement que localement et à réaliser des coupures hydrauliques qui ont pour but de remplacer la roche fracturée par un matériau moins perméable. Au stade actuel des connaissances, l'ANDRA envisage d'utiliser une scie de type pré-voûte pour réaliser des saignées minces d'environ 30 cm d'épaisseur et d'y mettre en place une argile gonflante. Ces saignées pourraient avoir 1,5 m à 3 m de profondeur afin de traverser la zone fracturée et d'atteindre la zone microfissurée. Au stade actuel des connaissances et sur la base de modélisations, l'ANDRA envisage un espacement de 8 m entre les saignées mais précise que « *cette valeur pourra être ajustée, au vu de l'extension des zones endommagées induites, pour optimiser l'efficacité hydraulique des coupures* ». Le revêtement en béton ne serait déposé qu'au droit des saignées, sur une longueur métrique, afin de réaliser un « épaulement » qui permettrait de prévenir une perturbation alcaline. L'utilisation d'un béton à bas pH est également envisagée. Par prudence et au stade actuel des connaissances, l'ANDRA retient cette option de conception pour le scellement des galeries dans le niveau médian de la formation hôte où la zone endommagée attendue est la plus importante. L'IRSN souligne que la profondeur accessible par une scie manipulée depuis une galerie est a priori limitée par le rayon de la galerie considérée et que la solution proposée par l'ANDRA suppose donc que l'extension de la zone de perméabilité accrue à interrompre est inférieure à un rayon d'ouvrage.

La note [30] intitulée « *Scellements et remblais des galeries et des puits d'un stockage en formation argileuse profonde* » indique que la faisabilité d'une saignée mince, du point de vue de l'excavation et de la mise en place

d'une argile gonflante, a été vérifiée lors de l'expérience EZ-A (également appelée EDZ Cut-Off) réalisée au Mont Terri. Ceci n'appelle pas de commentaire de l'IRSN. L'ANDRA indique qu'au cours de cette expérience, des mesures de perméabilité à l'air entre forages ont montré qu'une saignée rendue étanche par application d'une résine est capable d'interrompre la connectivité de la zone endommagée. L'ANDRA ajoute que des mesures tomographiques (mesures de vitesses d'ondes entre forages) et l'utilisation d'un vérin plat pour simuler la pression de gonflement de l'argile gonflante ont montré qu'une pression de 2 MPa recomprime la roche sur les flancs de la saignée sans introduire d'endommagement supplémentaire à son extrémité. Lors de la réunion technique du 24 octobre 2005 (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0227 du 26 octobre 2005), l'ANDRA a indiqué que des essais similaires avaient lieu dans le laboratoire souterrain de Bure dans le cadre de l'expérimentation KEY et conduisaient à des résultats comparables pour ce qui concerne les mesures de perméabilité entre forages et tomographiques. L'ANDRA a souligné la qualité de la découpe et de la tenue des parois des saignées réalisées avec la nouvelle scie spécialement conçue. **L'IRSN estime que ces éléments de démonstration sont encourageants mais qu'ils demeurent qualitatifs et doivent encore être quantifiés au laboratoire souterrain de Bure.**

Pour ce qui concerne les performances d'un ouvrage de scellement, la note [30] précitée estime que l'essai TSX réalisé au Canada en milieu granitique montre qu'il est possible d'atteindre une perméabilité de l'ordre de  $10^{-12}$  m/s au niveau d'un noyau en argile gonflante et une perméabilité « globale » inférieure à  $10^{-11}$  m/s à l'échelle d'un ouvrage. L'ANDRA rappelle que, dans cet essai, la performance « globale » du scellement était conditionnée par un écoulement préférentiel dans la zone de contact noyau/granite et estime qu'« *en milieu argileux, les capacités de fluage, de gonflement et de plasticité de la roche sont plus favorables au regard de la transmissivité de l'interface* ». L'ANDRA ajoute que la transmissivité de l'interface pourrait encore être diminuée en augmentant la pression exercée par l'argile gonflante sur la roche et rappelle que celle-ci valait 1 MPa dans l'essai TSX, valeur que l'ANDRA propose de retenir comme une valeur « minimale ». L'ANDRA précise qu'« *il faut toutefois veiller à ne pas excéder la valeur qui conduirait à endommager l'argilite* » et qu'à long terme, « *la pression de gonflement s'équilibrera avec les contraintes effectives<sup>27</sup> de la formation hôte* » et retient ainsi une valeur « maximale » de la pression de gonflement de 7 MPa. L'IRSN rappelle que, lors de l'essai TSX, deux scellements, l'un en argile et l'autre en béton, étaient étudiés simultanément et estime que la précision des mesures était conditionnée par la perméabilité « globale » du scellement en béton, de l'ordre de  $10^{-10}$  m/s. L'IRSN convient que la perméabilité « globale » du scellement en argile était plus faible et constate que l'ANDRA retient  $10^{-11}$  m/s, soit un ordre de grandeur de moins. L'IRSN convient également que compte tenu de l'écoulement préférentiel observé dans l'interface, la perméabilité du noyau lui-même devait sans doute être encore plus faible et constate que l'ANDRA retient  $10^{-12}$  m/s, soit encore un ordre de grandeur de moins. Pour ce qui concerne l'effet favorable d'une augmentation de la pression exercée sur une interface au regard de sa transmissivité hydraulique, l'IRSN indique que les essais [192] réalisés à sa demande sur échantillons (répliques d'interfaces constituées d'argilites de Tournemire et de bentonite) confirment cette tendance et montrent qu'en conditions de laboratoire, au-delà d'une pression appliquée de 4 MPa, la transmissivité hydraulique de l'interface devient difficilement mesurable. Pour ce qui concerne « *les capacités [...] de gonflement et de plasticité de la roche [...] plus favorables au regard de la transmissivité de l'interface* » que dans le cas du granite, l'IRSN indique que les essais [192] montrent également qu'une interface argilites/bentonite a la capacité de rester fermée pendant les premiers pas de déchargement mécanique des échantillons. Cependant, les essais [192] montrent aussi une tendance à la chenalisation des écoulements dans la bentonite dont les conditions d'apparition restent à quantifier. **En conséquence, l'IRSN estime que les ordres de grandeur de perméabilité avancés par l'ANDRA sont possibles et cohérents avec l'état des connaissances, et que les pressions de gonflement retenues pour l'argile gonflante d'un noyau sont pertinentes et compatibles avec les capacités mécaniques de la formation hôte mais que l'ensemble nécessite néanmoins d'être vérifié in situ.**

---

<sup>27</sup> La contrainte effective est la contrainte totale moins la pression d'eau. La contrainte lithostatique de 12 MPa à 500 m de profondeur peut être décomposée en 7 MPa de poids des terres sèches et 5 MPa de pression d'eau.

Compte tenu de ces éléments, la note [30] évalue la perméabilité équivalente d'un scellement de puits à l'aide d'un calcul analytique relativement simple qui considère deux éléments mis en parallèle : premièrement, un noyau en argile gonflante mis en contact directement avec les argilites et dont la perméabilité « globale », i.e. compte tenu de son interface avec la roche, est de l'ordre de  $10^{-11}$  m/s ; deuxièmement, une zone endommagée, de forme elliptique, comprise entre les rayons  $R$  et  $1,2.R-1,7.R$  où  $R$  est le rayon du puits et dont la perméabilité est de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s. Ce calcul, illustré sur la Figure 39 ci-après, conduit à une perméabilité équivalente d'un scellement de puits de  $2 \cdot 10^{-11}$  m/s à  $3 \cdot 10^{-11}$  m/s. L'ANDRA ajoute que « des perspectives d'amélioration peuvent résider dans la capacité de l'argilite microfissurée à recouvrir par fluage une plus faible perméabilité. La perméabilité du scellement tendrait alors vers une valeur de  $10^{-12}$  m/s », valeur de la perméabilité du noyau lui-même, sans interface.

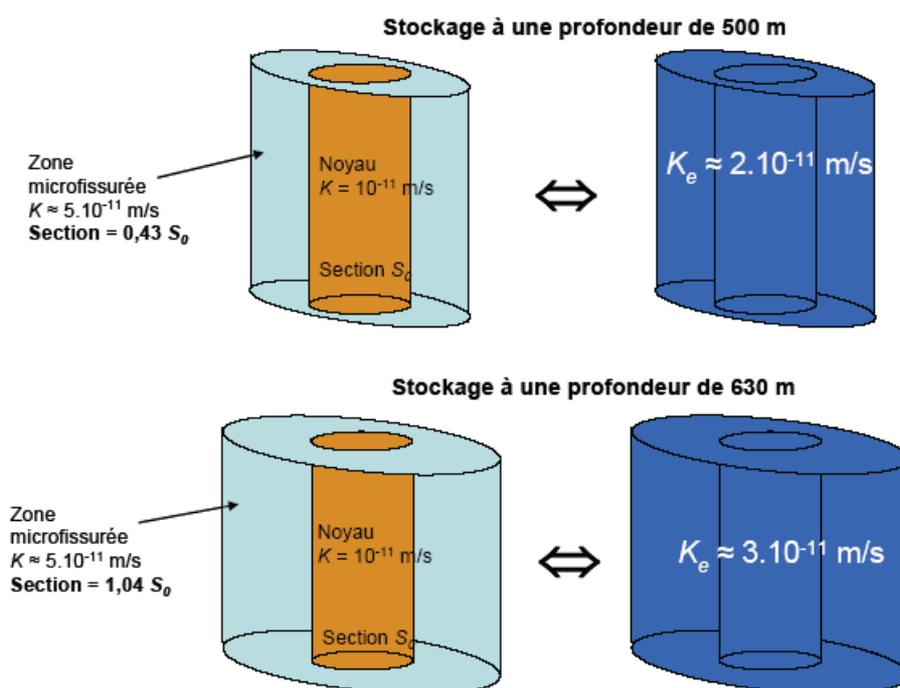


Figure 39 - Perméabilité longitudinale équivalente des scellements de puits « estimation prudente » [30].

L'IRSN constate que l'évaluation de la perméabilité équivalente d'un scellement de puits présentée par l'ANDRA repose sur une transposition de résultats possibles obtenus sur l'essai TSX au cas d'un ouvrage réel. L'IRSN rappelle que les conditions de réalisation de l'essai TSX, réalisé en milieu granitique dans une galerie d'environ 4 m de diamètre, sont différentes de celles d'un scellement de puits dont le diamètre pourrait atteindre 12 m, en milieu argileux et avec dépose complète du revêtement. Par ailleurs, l'IRSN considère que des incertitudes subsistent quant à l'extension de la zone endommagée autour d'un puits en fin de période d'exploitation et à son évolution suite à la dépose du revêtement. Aussi, la valeur de la perméabilité équivalente d'un scellement de puits proposée par l'ANDRA ne constitue au stade actuel des connaissances qu'un ordre de grandeur possible à confirmer par des essais plus représentatifs à réaliser in situ.

Pour ce qui concerne le scellement des galeries, l'ANDRA présente un raisonnement analogue à celui des puits et en évalue la perméabilité équivalente à l'aide de calculs un peu plus compliqués mettant en jeu différents éléments en série et en parallèle, ainsi qu'illustré sur la Figure 40 ci-après.

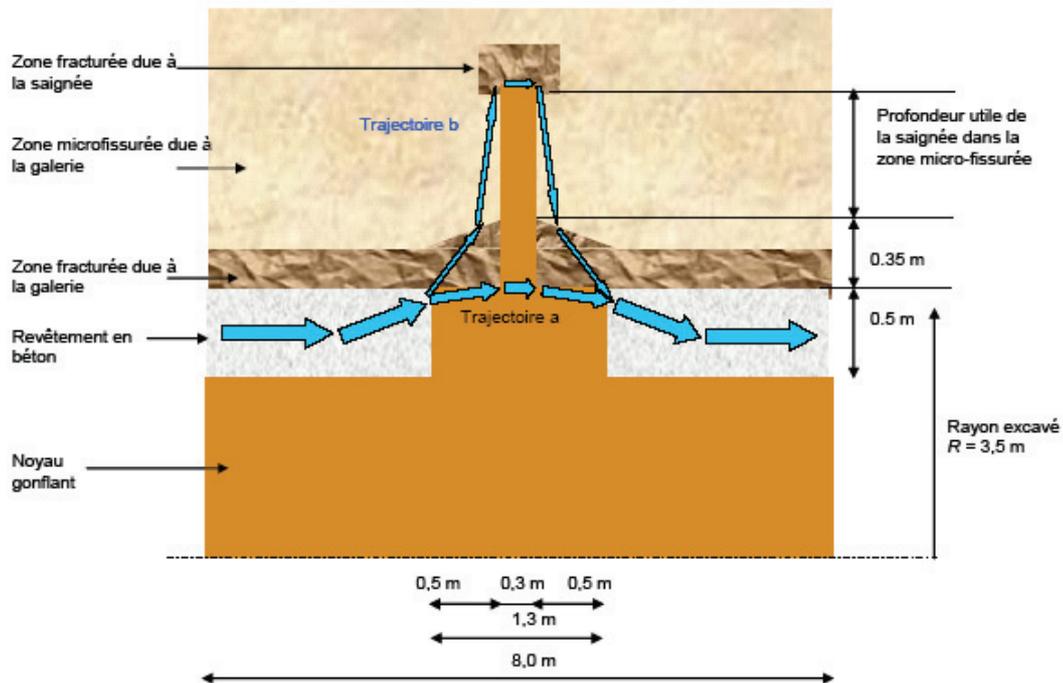


Figure 40 - Modèle schématique de fonctionnement d'une saignée mince [30].

En considérant une perméabilité « globale » de  $10^{-11}$  m/s pour le noyau en argile gonflante, de  $10^{-6}$  m/s pour le revêtement en béton laissé en place, de  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s pour la zone fracturée et de  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s pour la zone microfissurée, l'ANDRA aboutit à la conclusion qu'environ 10 % de l'écoulement traverse le noyau et que « la perméabilité équivalente du chemin préférentiel périphérique peut être de l'ordre de  $4 \cdot 10^{-10}$  m/s », la perméabilité équivalente de l'ensemble du scellement restant inférieure à  $10^{-10}$  m/s (cf. Figure 41).

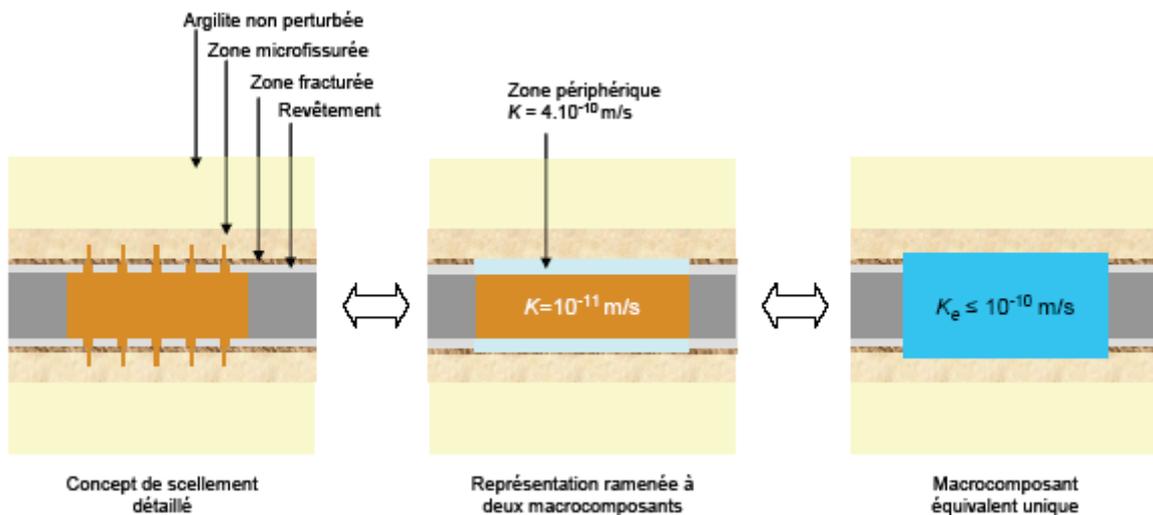


Figure 41 - Perméabilité équivalente des scellements de galerie à coupures hydrauliques [30].

L'ANDRA présente également une évaluation de « la sensibilité de la perméabilité équivalente du scellement à la profondeur des saignées » et estime que dans le cas où la saignée aurait une profondeur « limitée à celle de la zone fracturée », « la perméabilité équivalente du scellement [serait] accrue d'un ordre de grandeur par rapport à la géométrie précédente ». L'IRSN souligne que dans cette étude de sensibilité, la zone fracturée est néanmoins supposée interrompue car la « profondeur utile de la saignée dans la zone microfissurée » n'est pas supposée nulle mais égale à l'épaisseur de la saignée (la présence à l'extrémité de la saignée d'une « zone fracturée due à la saignée » représentée sur la Figure 40 n'est plus prise en compte). L'IRSN estime que cette étude de sensibilité

illustre aussi ce qui pourrait se passer si l'étendue de la zone fracturée était plus grande que les 0,1 R prévus, et donc la « *profondeur utile de la saignée dans la zone microfissurée* » plus petite.

L'IRSN considère que l'ordre de grandeur de ces résultats est en théorie possible à atteindre au stade actuel des connaissances mais que la faisabilité industrielle en vraie grandeur devra être confirmée par des essais plus représentatifs à réaliser in situ. L'IRSN rappelle que l'expérimentation KEY, actuellement en cours dans le laboratoire souterrain, vise à atteindre cet objectif.

L'IRSN constate que l'ANDRA a rassemblé un certain nombre d'éléments encourageants qui laissent à penser que pour les puits, la perméabilité équivalente des scellements pourrait être de l'ordre de  $10^{-11}$  m/s et que pour les galeries, tant que la zone fracturée peut être interceptée par une coupure hydraulique, la perméabilité équivalente des scellements pourrait être de l'ordre de  $10^{-10}$  m/s. L'IRSN estime cependant qu'au stade actuel des connaissances, ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur possibles, à confirmer par des essais plus représentatifs à réaliser in situ.

L'IRSN estime que le principe des coupures hydrauliques actuellement étudié par l'ANDRA reste utilisable tant que la zone de perméabilité accrue à interrompre est d'une extension inférieure au rayon de l'ouvrage et que des adaptations seraient à envisager au-delà.

Pour ce qui concerne les alvéoles de déchets C, leur diamètre excavé est relativement petit (70 cm) et l'ANDRA estime que l'extension et l'intensité de la zone endommagée devraient être suffisamment faibles pour que la mise en place des bouchons puisse être envisagée dans des conditions similaires à celles de la mise en place d'un scellement de puits, c'est à dire avec dépose du revêtement, mise en place du bouchon d'argile en contact direct des argilites et sans réalisation de coupure hydraulique. L'IRSN n'a pas de commentaire particulier sur ce point.

Pour ce qui concerne les alvéoles de combustibles usés, le bouchon d'alvéole complète un corps de barrière ouvragée constitué d'une juxtaposition de tores en bentonite pré-compactée. Compte tenu de la présence de joints de construction entre ces différents éléments dont le comportement thermo-hydro-mécanique pourrait être complexe et du rôle probablement mineur dans la limitation du transfert de radionucléides joué par la barrière ouvragée même supposée homogène, le rapport DSU n°21 présenté lors de la réunion du groupe permanent « déchets » consacrée à l'examen du comportement mécanique d'une installation de stockage sur le site de Bure du 2 mars 2004 concluait que « *les avantages annoncés par l'ANDRA en faveur des concepts « avec » barrière ouvragée nécessiteraient d'être justifiés dans une démarche globale d'évaluation des dispositions de conceptions pour diverses situations d'évolutions du stockage* ». À cet égard, l'ANDRA indique dans le tome « *Architecture et gestion du stockage géologique* » [2] que « *l'intérêt d'une telle option (dans une optique de comportement à long terme) pourrait être revu* ».

L'IRSN considère que les performances hydrauliques retenues par l'ANDRA pour les barrières argileuses des alvéoles de déchets C et de combustibles usés sont, à l'instar des scellements de galerie et de puits, des ordres de grandeur possible, qui nécessiteront eux aussi d'être confirmés au moyen de données expérimentales.

#### Perturbations chimiques

L'estimation des performances de confinement des barrières argileuses du stockage nécessite également de tenir compte de l'évolution chimique de ces barrières sur le long terme. L'IRSN rappelle que les principales sources de perturbations chimiques sont, en l'état actuel des connaissances, les interactions fer/argile et béton/argile (cf. chapitre 5.4.1 du présent rapport).

Le bouchon argileux d'une alvéole de déchets C ou de combustibles usés (3 m de longueur) est encadré par un bouchon métallique (du côté des colis) et un massif d'appui en béton (du côté de la galerie d'accès). Ce bouchon de bentonite est entouré d'un revêtement métallique perforé dans le cas de l'alvéole de combustibles usés.

L'ANDRA [3] [54] [56] indique sur la base notamment des simulations couplant géochimie et transport de solutés qu'elle a effectuées, que la perturbation due aux interactions fer/argile pourrait concerner après plusieurs centaines de milliers d'années une longueur du bouchon de bentonite de l'ordre de 30 cm à l'interface avec le bouchon métallique, dont 3 à 5 cm fortement chloritisés, et une épaisseur de 1 à 3 cm fortement chloritisés et illitisés au contact du revêtement (cf. Figure 42). La perturbation due aux interactions béton/argile pourrait s'étendre sur une longueur d'environ 2 m, dont 60 cm seraient fortement reminéralisés. L'ANDRA précise que la phénoménologie des deux perturbations superposées (cas de l'alvéole de combustibles usés) n'est pas évaluée à ce jour mais peut être considérée, en première approche, comme équivalente à celle sans couplage. Le corps de barrière ouvragée (80 cm d'épaisseur) d'alvéole de combustibles usés, qui est en contact avec des composants métalliques sur ses faces extérieure et intérieure (revêtement et chemisage respectivement), serait perturbé sur 30 cm au contact du chemisage, dont 3 à 5 cm fortement chloritisés et 10 cm au contact du revêtement, dont 1 à 3 cm fortement chloritisés et illitisés (cf. Figure 42).

Pour ce qui concerne l'influence de ces perturbations sur les performances du bouchon d'alvéole et du corps de barrière ouvragée, l'ANDRA [3] indique que les zones de fortes modifications minéralogiques peuvent présenter des propriétés de confinement diminuées en comparaison de celle de la bentonite initiale. Néanmoins, compte tenu de l'« *extension limitée* » de ces zones fortement transformées, l'ANDRA considère que ces composants en argile gonflante conservent leurs propriétés hydrauliques, de gonflement, et de rétention sur la majorité de leur longueur et épaisseur, et par conséquent que leurs performances globales de confinement sont inchangées. L'ANDRA ajoute que la perturbation alcaline reste localisée dans le bouchon d'alvéole et dans les argilites et que de ce fait, les colis des déchets et de combustibles usés ne seraient pas affectés par une augmentation locale de pH.

Dans le cas d'un scellement de galerie (avec saignées), la configuration présentée par l'ANDRA comporte des massifs d'appui en béton de part et d'autre du noyau de bentonite (longueur d'une quarantaine de mètres) ainsi qu'un revêtement en béton entre les saignées. L'ANDRA [3] indique qu'au contact des massifs d'appui, l'extension de la perturbation est semblable à celle décrite ci-avant pour le bouchon d'alvéole. Le revêtement, qui constitue une quantité de béton plus faible qu'un massif d'appui, induit une perturbation plus limitée : la zone fortement minéralisée reste localisée à l'interface avec les argiles (bentonite du noyau et des « épaulements » des saignées, argilites dans l'EDZ) et ne concerne ainsi qu'une partie de l'« épaulement » des saignées, sans atteindre les saignées elles-mêmes (cf. Figure 42). Ces dernières subissent une augmentation du pH (pH=10) et des processus d'échange d'ions (Na/Ca), « *qui n'altère pas notablement les propriétés de gonflement* » de la bentonite. L'ANDRA ajoute que le noyau conserve ses propriétés initiales sur la majorité de son épaisseur, « *ce qui ne modifie pas ses propriétés de gonflement* » globales. L'ANDRA conclut que « *le rôle hydraulique du scellement est conservé* ».

Pour un scellement de puits, l'ANDRA prévoit de déposer le revêtement cimentaire au droit du noyau argileux, de sorte que la perturbation alcaline ne se développe qu'au contact des massifs d'appui en béton et n'altère pas les performances hydrauliques globales de l'ouvrage.

En outre, l'extension des perturbations chimiques calculées par l'ANDRA dans les argilites reste globalement circonscrite à celle de l'EDZ initiale.

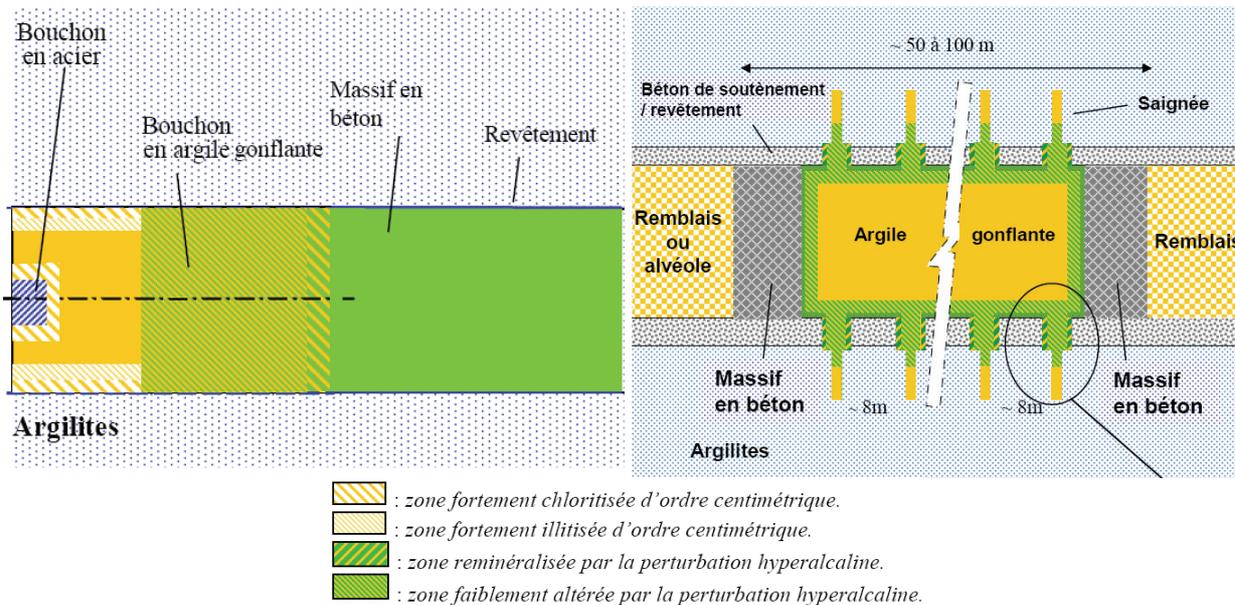


Figure 42 - Schéma de représentation des principales évolutions chimiques d'un bouchon d'alvéole de combustibles usés et d'un scellement de galerie [54].

L'IRSN note que l'ANDRA a bien tenu compte des principales perturbations chimiques susceptibles d'affecter les performances de confinement des barrières argileuses d'un stockage et a réalisé des simulations qui permettent d'apprécier les ordres de grandeur de l'intensité et de l'extension de ces perturbations.

Concernant les interactions fer/argile, l'IRSN constate que les simulations effectuées par l'ANDRA confirment les estimations précédentes évaluées par l'IRSN dans le rapport DSU n°32 présenté lors de la réunion du groupe permanent « déchets » du 8 juin 2004 consacrée à l'examen des phénomènes géochimiques dans un stockage en formation géologique sur le site de Bure. L'IRSN estime que, en dehors des aspects spécifiques à l'altération chimique des interfaces (cf. ci-après), l'extension de cette perturbation devrait effectivement rester suffisamment limitée pour ne pas affecter significativement les performances des barrières argileuses.

Concernant l'extension de la perturbation alcaline, les calculs effectués par l'IRSN (cf. Annexe T5 au présent rapport) pour les différentes configurations de barrières argileuses conduisent aux mêmes ordres de grandeur d'intensité et d'extension de la perturbation que ceux présentés par l'ANDRA. L'IRSN rappelle toutefois, comme indiqué au chapitre 5.4.1 du présent rapport, que ces résultats sont sensibles aux valeurs de coefficient de diffusion retenus. À cet égard, l'IRSN considère qu'une valeur de ce coefficient de  $2 \cdot 10^{-10}$  m/s peut être retenue en l'état actuel des connaissances. Cette valeur est plus pénalisante que celle de  $10^{-11}$  m/s considérée par l'ANDRA, mais reste possible pour l'IRSN, compte tenu des incertitudes relatives au processus d'exclusion anionique dans ces composants et à leur mode de fabrication (mélange de bentonite et de sable, conditions de mise en œuvre à l'échelle industrielle...). Des simulations effectuées par l'IRSN en utilisant cette valeur plus pénalisante (cf. Annexe T5) montrent que l'extension de la perturbation alcaline augmente significativement. Dans le cas de l'alvéole de déchets C, le panache alcalin reste néanmoins tamponné par le bouchon, le massif d'appui en béton de faible dimension (diamètre de 70 cm) constituant une réserve alcaline qui s'amenuise de façon significative au cours du temps et limite de fait les perturbations subies par le bouchon argileux. En revanche, dans le cas de l'alvéole de combustibles usés, le mur d'appui (diamètre de 2,6 à 3,3 m) représente une source alcaline plus importante, qui pourrait conduire à une extension de la perturbation sur la moitié du bouchon (zone reminéralisée de 1,5 m).

Pour ce qui concerne le scellement de galerie (avec saignées), le même type de calculs tend à montrer, d'une part que le revêtement en béton non déposé entre les saignées pourrait induire des modifications minéralogiques sur la largeur des « épaulements » des saignées, d'autre part que la présence d'un radier accentue cette perturbation qui pourrait s'étendre sur une partie des saignées elles-mêmes (hauteur de l'EDZ).

En conséquence, l'IRSN estime que la question d'une dépose du soutènement au droit des saignées sur une plus grande longueur se pose. Il restera néanmoins à vérifier que cette dépose plus complète n'entraînerait pas un endommagement supplémentaire de la roche incompatible avec la réalisation des saignées. À cet égard, l'ANDRA [4] indique que la possibilité d'un soutènement en béton « bas pH » aux environs des saignées, chimiquement moins agressif qu'un béton classique, et qui pourrait donc être maintenu sur une plus grande longueur, est étudiée. L'IRSN considère, comme indiqué dans le rapport DSU n° 32 précité, que l'utilisation de ce type de béton constitue une disposition conceptuelle favorable au regard de la limitation des conséquences d'une perturbation alcaline mais rappelle que les connaissances sur le comportement (mécanique, hydraulique, chimique) de tels bétons en conditions de stockage sont à un stade très préliminaire.

L'IRSN ajoute que les modélisations des interactions béton/argile précitées considèrent des matériaux homogènes avec des interfaces parfaites et rappelle en particulier qu'une propagation hétérogène de la perturbation, à la faveur des interstices entre anneaux ou blocs de bentonite et des interfaces avec les autres composants du stockage, ne peut être exclue en l'état actuel des connaissances (rapport DSU n° 32 précité). L'IRSN estime que ce type de perturbation localisée aux interfaces, sans être plus intense que la perturbation homogène, pourrait le cas échéant avoir une incidence plus importante sur les performances de confinement des ouvrages de scellement. L'IRSN note que l'ANDRA n'a pas spécifiquement modélisé ces phénomènes mais en a néanmoins tenu compte dans son évaluation de sûreté.

En effet, pour tenir compte de l'évolution des performances des barrières argileuses due aux perturbations chimiques, l'ANDRA [4] retient dans l'évaluation de sûreté :

- des paramètres de confinement hydraulique et chimique non modifiés par les perturbations chimiques dans le scénario d'évolution normale ;
- un possible non gonflement de la bentonite sous l'effet de perturbations chimiques couvert par l'hypothèse d'une défaillance de l'ensemble des scellements en scénario d'évolution altérée (scénario « défaut de scellement ») ;
- une possible extension du pH alcalin jusqu'au sein de l'alvéole de déchets C, et une augmentation du relâchement par les matrices vitreuses sous cet effet, comme variante du scénario d'évolution altérée « défaut de scellement ». Pour les combustibles usés, une augmentation du relâchement de radionucléides sous l'effet d'un panache alcalin n'est pas retenue du fait du caractère déjà très pénalisant du modèle de relâchement considéré en situation normale (durée de vie de 50 000 ans).

Par ailleurs, les argilites perturbées chimiquement sont assimilées à la zone fracturée. L'ANDRA suppose « *compte tenu de caractéristiques déjà conservatives retenues pour cette zone* », que la perturbation alcaline ne les aggrave pas. L'ANDRA précise à cet égard qu'une étude de sensibilité spécifique permet de prendre en compte une situation plus défavorable (perméabilité de  $10^{-6}$  m/s, aucune propriété chimique).

L'IRSN considère que l'ensemble de ces hypothèses couvre de manière suffisante les incertitudes liées à l'influence des perturbations chimiques sur les performances des barrières argileuses du stockage.

En conséquence, l'IRSN considère que le dimensionnement des barrières argileuses est globalement compatible avec l'état des connaissances relatives à leur évolution chimique et estime que l'ANDRA a correctement traité les incertitudes résiduelles relatives à ces perturbations dans son évaluation de sûreté. Toutefois, l'IRSN estime que dans le cas du bouchon d'alvéole et du scellement de galerie, ce dimensionnement ne semble présenter que peu de marge quant à la capacité de ces barrières à absorber la perturbation alcaline sans conséquences sur leur performance de confinement. Aussi, l'IRSN considère que la validité de ce dimensionnement reste à confirmer sur la base notamment d'essais in situ permettant une observation du comportement hydrique et mécanique des barrières et de leurs interfaces.

## 7.1.4 LA BARRIÈRE GÉOLOGIQUE

L'analyse des propriétés de confinement de la barrière géologique fait l'objet du chapitre 2.3 du présent rapport. L'IRSN constate les données retenues par l'ANDRA dans les évaluations de sûreté et d'impact d'un stockage, synthétisées dans l'Annexe T-6 du présent rapport sont cohérentes avec l'état des connaissances sur ces propriétés. Les incertitudes sur ces données sont prises en compte au travers d'une étude destinée à évaluer la sensibilité de la capacité de confinement de la formation hôte aux valeurs de paramètres caractérisant les transferts de radionucléides dans cette formation. L'IRSN constate que cette étude de sensibilité comprend des valeurs majorantes de ces paramètres, ce qui est à ce stade suffisant pour apprécier dans quelle mesure la formation hôte permet de s'opposer efficacement à la dissémination de matières radioactives relâchées par les déchets.

L'IRSN rappelle qu'il existe une incertitude sur l'extension de la zone endommagée par le creusement des ouvrages et son évolution future, les premières observations effectuées dans le laboratoire souterrain ayant montré que la zone fracturée autour des galeries est supérieure à celle anticipée par le calcul. L'IRSN estime néanmoins que cette incertitude est couverte par les hypothèses retenues par l'ANDRA pour estimer les possibilités de transfert d'activité dans cette zone. L'ANDRA a en effet retenu pour cette estimation une grande variabilité des propriétés hydrauliques de la zone endommagée et tenu compte de scellements non ancrés dans la roche, ainsi qu'exposé dans le chapitre 7.3 du présent rapport.

L'IRSN note néanmoins que l'ANDRA retient l'hypothèse d'une formation homogène dans l'ensemble de ces évaluations. **Au vu des réserves émises sur ce point, l'IRSN estime qu'il aurait dû être postulé la présence d'une fracture traversant la formation argileuse, à titre d'hypothèse permettant de tester la robustesse du stockage eu égard à cette éventualité.** Ce point est analysé dans la suite du présent rapport (cf. chapitre 7.3).

## 7.2 ANALYSE DES RISQUES

### 7.2.1 RISQUES D'ORIGINE INTERNE

La démonstration de la sous-criticité du stockage présentée par l'ANDRA pour la phase de post-fermeture repose sur des études paramétriques déterminant l'influence des phénomènes d'évolution envisageables des colis et des alvéoles sur la valeur du keff du stockage calculé pour une configuration de référence, correspondant à celle associée à la phase d'exploitation et de réversibilité (cf. chapitre 6.2.1.3 du présent rapport). L'objectif de l'ANDRA est de montrer que le conservatisme du modèle retenu pour cette phase conduit à des marges suffisamment importantes par rapport à un état critique pour exclure raisonnablement une réaction en chaîne. Le critère d'admissibilité considéré est la non-criticité du stockage ( $\text{keff} + 3\sigma < 1$ ). Néanmoins, en présence d'une enveloppe métallique, une marge de 2 000 pcm<sup>28</sup> ( $\text{keff} + 3\sigma \leq 0,98$ ) est retenue par l'ANDRA pour prendre en compte les biais possibles de calculs. Enfin, les conséquences sur la sûreté du stockage pour deux scénarios d'accident de criticité sont étudiées. Ce dernier point fait l'objet de la demande n°A10 de la lettre DGSNR/SD3/0660/2004 du 17 septembre 2004 faisant suite à la réunion du 8 juin 2004 du groupe permanent « déchets » consacrée à l'examen des phénomènes géochimiques dans un stockage en formation géologique sur le site de Bure (rapport DSU n° 32).

**L'IRSN estime que la démarche d'analyse des risques de criticité retenue par l'ANDRA est acceptable.** L'IRSN note toutefois que la sous-criticité du stockage des différents colis repose en grande partie sur l'absorption des neutrons par les matériaux de structure du colis et/ou de la matrice de déchets. L'ANDRA considère qu'il existe un biais de calcul uniquement pour le <sup>56</sup>Fe contenu dans l'acier. Toutefois, d'autres matériaux interviennent de

---

<sup>28</sup> pcm : partie pour cent mille.

manière importante dans les études de criticité (béton, zirconium, silice) sans que la qualification des schémas de calcul de criticité, notamment pour les épaisseurs importantes considérées, ne soit démontrée. De plus, dans le cas des colis de combustibles usés, l'ANDRA prend en compte l'anti-réactivité apportée par les produits de fissions et certains actinides (crédit burn-up généralisé). Par ailleurs, les différentes hypothèses retenues sont issues des réflexions du groupe de travail « crédit burn-up » qui ne sont pas encore validées, la qualification des calculs utilisant le crédit burn-up généralisé n'étant pas à ce jour établie. **La pertinence des configurations étudiées par l'ANDRA par rapport aux critères d'admissibilité mais aussi par rapport au conservatisme des hypothèses retenues dans les études devra donc être confirmée.**

Un certain nombre de remarques complémentaires peuvent être faites.

Pour ce qui concerne les colis B, l'ANDRA a évalué l'impact sur la réactivité du stockage des paramètres prépondérants dans l'évolution physico-chimique et géométrique du stockage. Les paramètres étudiés sont la variation de la teneur en eau du béton, la composition du béton et l'oxydation du zirconium. La configuration de « référence » retenue pour cette étude est celle définie pour la phase d'exploitation qui prend en compte des hypothèses pénalisantes (teneur en eau et épaisseur du béton minimisées, CSD-C au contact). L'IRSN note que l'ANDRA, d'une part considère une épaisseur minimale des couvercles en béton de 10 cm, d'autre part postule que l'expansion volumique des galettes associée à la corrosion du zirconium (augmentation de 60 % en volume) entraîne une diminution du volume libre des galettes, ce qui limite le volume d'eau pouvant y pénétrer et, par conséquent, conduit à une baisse de la réactivité. À l'égard de cette dernière hypothèse, l'IRSN souligne que l'oxydation du zirconium peut également entraîner une expansion latérale des galettes dans l'espace occupé initialement par le ressort de maintien des galettes situé entre ces dernières et la paroi interne du CSD-C. Par ailleurs, l'ANDRA n'a pas considéré l'éventualité d'une ruine totale des couvercles des colis de stockage suite à une dégradation progressive du béton. Selon des calculs réalisés par l'IRSN, l'expansion latérale des galettes ou l'absence de béton entre les colis de stockage conduisent à augmenter la réactivité d'environ 8 000 pcm. En considérant séparément chacune de ces deux hypothèses, la masse maximale admissible dans les CSD-C diminuerait d'une centaine de grammes. Elle reste néanmoins équivalente à la masse maximale admissible de l'entreposage des CSD-C dans l'ECC (430 g) et très supérieure à celle attendue d'après le MID (~ 100 g). Aussi, bien qu'il conviendrait d'analyser plus particulièrement ces deux hypothèses, **l'IRSN estime que la maîtrise des risques de criticité pendant la phase de post fermeture devrait raisonnablement être acquise.**

Pour ce qui concerne les colis de combustibles, l'IRSN retient que la diminution du volume libre des logements par l'expansion des structures internes du colis et des crayons due à la corrosion constitue une marge d'anti-réactivité très importante (20 000 pcm). Cette marge devrait permettre d'assurer à long terme la sous-criticité du stockage. D'autres configurations nécessitent toutefois d'être examinées. À cet égard, l'ANDRA a étudié les conséquences d'une évolution de l'écartement des crayons en considérant une section carrée sur toute la longueur de l'assemblage. L'ANDRA conclut de cette étude que l'absence de risque de criticité pour les colis comportant des logements de section carrée est démontrée. L'IRSN confirme cette conclusion pour ce type de colis mais note qu'elle ne peut être transposée aux colis comportant de logements de section cylindrique. Il est en effet à noter qu'une répartition des crayons sur la section totale d'un logement cylindrique peut conduire à une configuration critique. Or une telle configuration pourrait résulter de la rupture des grilles centrales alors que les grilles d'extrémité, moins irradiées, resteraient intactes. **Aussi, l'analyse de l'ANDRA devrait être complétée sur ce point.**

En outre, l'ANDRA a évalué pour les colis CU1 (UOX) l'évolution du keff en fonction du temps de refroidissement et, en particulier, la remontée de réactivité (1 200 pcm) entre 100 ans et 100 000 ans due à la décroissance de l'<sup>241</sup>Am puis du <sup>240</sup>Pu. Toutefois, l'IRSN souligne que des études montrent que cette remontée de réactivité est beaucoup plus marquée pour des combustibles MOX. Toutefois, le keff maximal du colis CU2, de 0,90, présente des marges par rapport aux critères d'admissibilité fixés. **Nonobstant, il conviendrait dans une phase ultérieure du projet, d'étudier l'impact du vieillissement du plutonium sur la réactivité des colis CU2.**

Pour ce qui concerne les conséquences d'un accident de criticité en alvéole après fermeture du stockage, deux scénarios de rapprochement des assemblages sont considérés. Ces scénarios sont décrits dans la note [136] transmise par lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0186 du 26 octobre 2005, trop tardivement pour que l'IRSN ait pu en faire une analyse détaillée. Cependant, en première analyse, les remarques suivantes peuvent néanmoins d'ores et déjà être formulées.

L'ANDRA indique que le premier scénario considéré est représentatif d'une entrée progressive d'eau dans les logements du colis, ceux-ci s'étant préalablement rapprochés à 5 cm les uns des autres ( $k_{eff}+3\sigma=1,01$ ). Ce scénario induit une faible insertion de réactivité (1 000 pcm) supposée introduite en un an. La durée de la réaction en chaîne pourrait atteindre de  $10^4$  à  $10^5$  ans, représentant au total  $10^{25}$  fissions. Toutefois, la réactivité insérée étant faible, il n'y a pas de période transitoire rapide de puissance. La température du combustible atteint  $65^\circ\text{C}$ , celle de la barrière ouvragée est de l'ordre de  $50^\circ\text{C}$ . Aussi, le critère de température maximale retenu par l'ANDRA ( $90^\circ\text{C}$ ) n'est pas dépassé.

Dans le deuxième scénario, l'ANDRA envisage un effondrement de l'insert entraînant la mise en contact des 4 assemblages, ces derniers ayant néanmoins gardé leur géométrie initiale ( $k_{eff}+3\sigma=1,073$ ). L'insertion de réactivité plus importante (7 300 pcm en 1 an) conduit à une augmentation plus importante de la puissance et de la température qui entraîne la vaporisation de l'eau. À la fin de l'insertion de réactivité, la puissance se stabilise à  $10^{14}$  fissions/s pour une durée de 30 000 à 40 000 ans. La température du combustible correspondante serait de  $230^\circ\text{C}$ , celle en limite de la barrière ouvragée serait de  $165^\circ\text{C}$ . Le critère de température maximale retenu par l'ANDRA ( $100^\circ\text{C}$ ) est donc largement dépassé. Toutefois, l'ANDRA estime que ce scénario est irréaliste car il nécessite une mise en contact des 4 assemblages sans diminution de la section du réseau de crayons ni présence de produits de corrosion. **L'IRSN estime recevable en première approche le fait de considérer irréaliste un tel scénario, qui postule simultanément le maintien de la géométrie initiale des assemblages et la disparition de l'insert.**

Enfin, l'IRSN souligne que, dans ces deux scénarios, l'ANDRA n'a pas évalué les quantités d'hydrogène formées par radiolyse de l'eau durant l'accident. Compte tenu de la durée importante des accidents envisagés et du nombre total de fissions estimé, l'IRSN note que cet accident de criticité pourrait en théorie générer des quantités significatives de gaz. **Il conviendra que l'ANDRA examine ultérieurement si ce phénomène peut contribuer de façon importante à la formation d'une phase gazeuse dans un stockage conjointement et au-delà de celle attendue du fait notamment des processus de corrosion en milieu anoxique.**

Concernant la migration et la reconcentration de la matière fissile, l'ANDRA considère que la diffusion des radioéléments sera isotrope et limitée à l'environnement immédiat du colis. Le risque de criticité ne pourrait alors résulter que d'une reconcentration importante de la matière fissile due à un changement brutal des conditions physico-chimiques au voisinage du colis et dans une configuration géométrique défavorable. L'ANDRA considère cette situation irréaliste. De plus, afin d'exclure le risque de criticité même en cas de reconcentration de la matière fissile, l'ANDRA a considéré l'hypothèse d'une migration des radionucléides perpendiculairement à l'axe du colis. Dans ce plan, la matière fissile est supposée, par tronçon de 1 mètre, se reconcentrer en 4 sphères dans des directions opposées, chaque sphère contenant un quart de la matière fissile ayant migré. Sur la base de ce modèle et des masses de matières fissiles données dans le MID, l'ANDRA conclut qu'un accident de criticité n'est pas possible pour les colis de déchets B et C et est improbable pour les colis de combustibles usés, compte tenu de l'importance des quantités de matières fissiles devant être regroupées pour atteindre les masses minimales critique d'uranium pour les combustibles considérés (UOX et MOX).

Pour ces derniers, l'ANDRA [52] ne retient pas l'éventualité d'une reconcentration sélective du plutonium, du fait des conditions fortement réductrices attendues qui devraient favoriser la co-précipitation de l'uranium et du plutonium. L'ANDRA considère un milieu fissile constitué d'un mélange homogène d'eau et d'oxyde d'uranium d'enrichissement maximal équivalent en isotope 235 qui tient compte du temps de refroidissement. **L'IRSN considère que cette méthode est acceptable.**

En conclusion, l'IRSN considère que cette analyse de l'ANDRA relative à la migration et la reconcentration de la matière fissile est en première approche acceptable.

## 7.2.2 RISQUES D'ORIGINE EXTERNE : SÉISMES

La RFS III.2.f indique que « *les événements d'origine naturelle à considérer seront au moins les suivants: changements climatiques majeurs, activité sismique, subsidence et surrection exceptionnelles* ». L'IRSN estime, comme l'ANDRA, que les changements climatiques ou une surrection ne sont pas susceptibles d'affecter les capacités de confinement de la formation hôte sur une période permettant la décroissance de l'essentiel de la radioactivité contenue dans le stockage. Ces phénomènes qui n'affectent que la surface du site sont pris en compte dans les modèles géoprospectifs, évalués au chapitre 2.2.3.2 du présent rapport. Les risques externes ne concernent donc à ce stade que les effets des séismes en profondeur.

L'ANDRA a mis en évidence le caractère mineur des effets des séismes sur les ouvrages non remblayés (chapitre 6.2.2 du présent rapport) et a montré que les ouvrages sont moins sensibles au séisme après fermeture (ouvrages remblayés). Le risque analysé ci-dessous concerne donc la perturbation du milieu géologique sous l'effet de séismes de niveau SMPP, évalué par l'IRSN au chapitre 2.2.3.1 du présent rapport.

L'ANDRA indique que « *les observations géologiques [menées dans le secteur du site de Meuse/Haute-Marne] ne livrent aucun indice quant à un effet possible [de la sismicité passée] sur les couches [...]. Le milieu géologique local est resté très peu fracturé* » [20].

L'IRSN considère que les effets statiques et dynamiques envisageables en cas de séisme SMPP pourraient être :

- une activation de fractures (en cisaillement, ouverture ou fermeture selon leur orientation), une propagation des fractures préexistantes et la création de nouvelles fractures, ce qui peut avoir un impact sur la perméabilité des zones fracturées,
- la modification des pressions dans les masses d'eau du sous-sol, susceptible de modifier les conditions de circulation hydraulique, et de contribuer à l'activation des fractures (fracturation hydraulique).

L'IRSN note que dans le champ d'observation des effets des séismes, limité à la surface et aux forages de secteur, les seuls indices d'une activité sismique seraient des fractures indiquant des circulations de fluides quaternaires, alors que les remplissages calcitiques des fractures n'ont pas été datés au  $^{14}\text{C}$  (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0198 du 19 septembre 2005).

L'IRSN observe que les études du séisme de Landers (1992, magnitude M 7,3), Hector Mine (1999, M 7,1) et Denali (2002, M 7,9) ont montré que les ondes sismiques et la redistribution des contraintes sont susceptibles de favoriser le déclenchement d'une multitude de petits séismes dans une région située même très loin de l'épicentre (e.g., [167], [170]), et donc que **des fractures de toutes dimensions sont en mesure d'être sollicitées**. Des études très récentes [173] [168] ont montré que la réactivation d'une fracture par un passage d'ondes sismiques dépend de l'état « mécanique » de la fracture (rugosité, remplissage...), ne dépend pas du contenu fréquentiel de l'onde incidente, et est possible si le taux de déformation au passage des ondes dépasse un seuil, de l'ordre de  $10^{-7}$ . **Ainsi, les éventuels effets d'un séisme sur un objet géologique ne peuvent pas être directement déduits de la magnitude**, mais du couple « magnitude-distance à l'épicentre », c'est-à-dire du **taux de déformation** engendré par le séisme. Enfin, des études (e.g., [172], [165]) montrent que la propagation des failles concerne toutes les dimensions de fractures. L'IRSN convient qu'en l'état actuel des connaissances, la fracturation reconnue étant de petite taille, ou d'apparence cachetée (failles détectées sur la sismique 3D), des effets importants des séismes sur la fracturation existante semblent peu probables. En particulier, l'IRSN considère que la genèse de nouvelles fractures, à l'écart des zones principales de fracturation cartographiées, peut être écartée pour le million d'années prochain, compte tenu des valeurs des contraintes tectoniques actuelles et de celles qui seraient

induites par un séisme. Il reste néanmoins que la caractérisation des effets possibles de séismes sur les propriétés de confinement de la formation hôte est à examiner de façon plus approfondie, même si l'IRSN convient que c'est un sujet difficile, qui reste encore mal connu et très partiellement quantifié par la communauté scientifique.

Pour ce qui concerne l'effet des séismes sur les circulations hydrauliques, selon l'ANDRA [20], « *l'ensemble des observations disponibles sur les conséquences hydrologiques et hydrogéologiques des séismes étudiés de par le monde ([97]) indique que les perturbations hydrogéologiques dues à des actions sismiques restent transitoires et réversibles [...]. Même les effets dits pérennes, observés dans le cas de quelques très forts séismes mondiaux (magnitudes de l'ordre de 8), ne durent en fait que quelques années* ». L'ANDRA affirme par ailleurs que l'effet des variations de débits pendant la période transitoire de perturbation hydraulique succédant les séismes est négligeable (lettre ANDRA/DSQE/DIR/05-0205 du 26 septembre 2005). L'IRSN convient qu'il est probable que la plupart des séismes de magnitude équivalente à celles des séismes SMPP retenus par l'ANDRA (M 5,2 à 7,2), en particulier de source lointaine (hors du secteur), induisent des perturbations hydrauliques réversibles. Toutefois, **les perturbations temporaires possibles sont diverses et ne sont pas nécessairement négligeables** [171]. Les simulations numériques rapportées dans [97] indiquent que la perméabilité d'une faille passive traversant un massif peut être affectée notablement jusqu'à des profondeurs élevées sous l'effet d'un séisme de magnitude 5,5 à 10 km (source sismique locale). Les perturbations peuvent également concerner la porosité ou le coefficient d'emmagasinement [169]. Enfin, **les perturbations permanentes observées dans le monde ne sont pas toutes associées à des séismes de magnitudes plus importantes que celles des séismes SMPP retenus par l'ANDRA** (e.g., [166]). À cet égard l'ANDRA indique dans [97], que « *les perturbations durables voire irréversibles correspondent toutes à des séismes de magnitude supérieure à 6,5* ».

En conséquence, l'IRSN estime qu'il sera nécessaire à l'avenir d'évaluer de manière plus complète dans quelle mesure les effets d'un séisme de niveau SMPP, même temporaires, pourraient affecter les écoulements souterrains et en particulier les vitesses de transfert de solutés dans les formations encaissantes. Il conviendrait également d'examiner plus avant les effets possibles, sur la formation hôte, d'une propagation de la fracturation à l'aplomb de structures secondaires, si celles-ci devaient être détectées, sur l'emprise d'un éventuel stockage, dans les formations sous-jacente à la formation hôte. Compte tenu des difficultés probables pour quantifier précisément ces effets, l'IRSN estime qu'une approche possible serait de les postuler, d'évaluer leurs conséquences sur la sûreté et l'impact dosimétrique du stockage et d'apprécier, selon leur degré de vraisemblance, s'il est nécessaire d'envisager des dispositions de conception particulières pour les pallier (notamment le maintien d'une distance de garde entre les ouvrages et la projection verticale des structures détectées).

## 7.3 RÔLE DES BARRIÈRES DU STOCKAGE SUR LA SÛRETÉ GLOBALE

Ce chapitre présente, dans une première partie, les différents scénarios d'évolution du stockage étudiés par l'ANDRA. Ces scénarios mettent en jeu les principaux composants du stockage (colis de stockage, barrières ouvragées, alvéoles, galeries et puits) et sont destinés, d'une part à évaluer les capacités de confinement du stockage (incluant la formation hôte du Callovo-Oxfordien) d'autre part, à estimer des impacts dosimétriques du stockage. Le présent chapitre a pour objectif d'évaluer le bien-fondé des scénarios retenus (au regard des évolutions modélisées, des paramètres utilisés et de la prise en compte des incertitudes), ainsi que l'interprétation des résultats en terme d'influence des composants principaux sur le confinement des radionucléides.

### 7.3.1 ÉVALUATION DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DU STOCKAGE

L'ANDRA évalue les capacités de confinement des principaux composants du stockage au regard de leur aptitude à assurer trois fonctions majeures de sûreté qui sont :

- « s'opposer à la circulation d'eau »,
- « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »,
- « retarder et atténuer la migration des radionucléides ».

Ce processus d'évaluation nécessite de construire des scénarios d'évolution du stockage pour lesquels les composants ont des performances variables basées sur des hypothèses qui peuvent être regroupées en deux catégories : celles relatives à une évolution dite « normale » du stockage et celles caractéristiques de défauts de fonctionnement conduisant à des évolutions dites « altérées ». L'ANDRA a retenu trois scénarios d'évolution altérée (avec des variantes en analyse de sensibilité) destinés à évaluer l'aptitude du stockage à assurer le confinement de la radioactivité pour diverses combinaisons de défaillance des scellements, des conteneurs et surconteneurs et divers types de forages exploratoires abandonnés. Un quatrième scénario qualifié de « fonctionnement très dégradé » a également été étudié afin d'évaluer la robustesse des concepts de stockage lorsque les performances des barrières sont simultanément amoindries. Les valeurs des paramètres retenus par l'ANDRA pour les différents scénarios sont synthétisées dans les tableaux de l'Annexe T6 au présent rapport.

#### Scénario d'évolution normale

L'évolution dite « normale », qualifiée par la suite de « scénario d'évolution normale » ou SEN, n'est pas traitée par l'ANDRA de manière univoque mais est définie par plusieurs évolutions probables constituant le « domaine d'évolution normale » du stockage. Dans ce domaine, l'ANDRA identifie un scénario de référence et plusieurs scénarios alternatifs. Pour le scénario de référence, les niveaux de performances associés aux composants traduisent soit un état des connaissances sur l'évolution du stockage dont le degré de confiance est élevé (dans ce cas, les phénomènes associés sont paramétrés avec des valeurs dites « phénoménologiques » qui s'apparentent à des valeurs « best estimate »), soit présentent encore des incertitudes nécessitant de retenir des valeurs de paramètres dites « conservatives ». En complément de ce scénario de référence, plusieurs scénarios sont également envisagés sous la forme d'analyses de sensibilité dérivées du SEN. Dans ces différents cas, les évolutions modélisées présentent des configurations destinées à vérifier que certaines valeurs de paramètres ou certains phénomènes physico-chimiques ne pouvant être exclus mais jugés moins représentatifs d'une évolution probable du stockage ne conduisent pas à des relâchements d'activité significativement supérieurs à ceux estimés dans le cas de référence.

Par ailleurs, pour définir le « domaine d'évolution normale » précité, l'ANDRA a retenu :

- des phénomènes et valeurs de paramètres soit plus pénalisants que pour le scénario de référence (augmentation d'un ordre de grandeur de la perméabilité du Callovo-Oxfordien, performances hydrauliques et chimiques dégradées dans l'EDZ, le Callovo-Oxfordien sain, la bentonite et le béton, modèles de relâchement des déchets B, C et de combustibles usés),
- de meilleures performances de certains composants sur la base de résultats de recherches nécessitant d'être toutefois confirmés (possible rétention, même faible, de l'iode dans le Callovo-Oxfordien, évaluation moins majorante des effets de la température sur les propriétés de transfert, performances améliorées des surcolisages béton des déchets B pendant 10 000 ans, cinétique de relâchement plus lente des CU sur environ  $10^8$  ans).

Les ordres de grandeurs des impacts dosimétriques (cf. Tableau 14) sont respectivement de 0,02 mSv/an, 0,0008 mSv/an et 0,0005 mSv/an pour les combustibles usés, les déchets vitrifiés et les déchets B. Ces valeurs

maximales sont dues à trois radionucléides : l' $^{129}\text{I}$  (essentiellement issu des colis CU1), le  $^{36}\text{Cl}$  (notamment issu des colis de déchets B) et le  $^{79}\text{Se}$ . Compte tenu d'un temps de transfert diffusif<sup>29</sup> moyen long au travers du Callovo-Oxfordien et des propriétés chimiques favorables de cette formation, les radionucléides à vie courte ou moyenne et ceux ayant des propriétés de sorption restent confinés dans le champ proche du stockage. C'est en particulier le cas des chaînes d'actinides dont l'impact est jugé insignifiant par l'ANDRA. Pour toutes les situations étudiées, la formation hôte reste la voie de transfert dominante devant celle potentielle liée aux ouvrages eux-mêmes.

Colis-types	Maximum de dose [mSv/an]	Date du maximum [ans]	Radionucléides contributeurs
<b>Exutoire « Saulx » (le plus pénalisant)</b>			
B1x - (colis non organiques ne dégageant pas d'hydrogène)	0,00033	310 000	$^{36}\text{Cl}$ ( $^{129}\text{I}$ dans une moindre mesure)
B1h - (colis non organiques pouvant dégager de l'hydrogène)	0,000031	290 000	$^{36}\text{Cl}$
B2 - (boues bitumées)	0,000021	370 000	$^{129}\text{I}$ ; $^{36}\text{Cl}$
Autres déchets B	0,00009	310 000	$^{36}\text{Cl}$ ( $^{129}\text{I}$ dans une moindre mesure)
Total des déchets B (scénario S1b)	environ 0,00047	vers 300 000	$^{36}\text{Cl}$ ( $^{129}\text{I}$ dans une moindre mesure)
Verres C0	0,0000032	340 000	$^{129}\text{I}$
Verres C1 et C2	0,00047	490 000	$^{129}\text{I}$ ; $^{36}\text{Cl}$
Verres C3 et C4	0,00036	500 000	$^{129}\text{I}$ ; $^{36}\text{Cl}$
Total des déchets C (scénario S1b pour C0/C1/C2 et S1b pour C3/C4)	environ 0,00083	490 000	$^{129}\text{I}$ ; $^{36}\text{Cl}$
Combustibles usés CU1	0,019	330 000	$^{129}\text{I}$
Combustibles usés CU2	0,0017	340 000	$^{129}\text{I}$
Combustibles usés CU3	0,000067	330 000	$^{129}\text{I}$
Total des combustibles usés (scénario S2)	environ 0,02	vers 330 000	$^{129}\text{I}$

Tableau 14 - Débits de dose maximum calculés par l'ANDRA à l'exutoire Saulx pour le scénario d'évolution normale [4].

### Scénario de défaut de scellement

Les situations de défaut de scellement prises en compte par l'ANDRA ont pour objectif d'évaluer l'influence sur la sûreté globale du stockage :

- d'un court-circuit de la formation hôte dû à un défaut d'interface scellement/argilites ou à des propriétés de la zone endommagée plus pénalisantes que celles prises en compte dans le « domaine d'évolution normale »,
- d'une dégradation des propriétés chimiques et hydrauliques des scellements et bouchons d'alvéoles.

Quatre scénarios ont été traités par l'ANDRA : défaillance des scellements de puits uniquement (afin d'évaluer la complémentarité entre scellements de puits et scellements de galeries), défaillance des scellements réalisés avec

<sup>29</sup> Ce temps de transfert par diffusion est estimé à 1 140 000 ans environ pour les anions et cations non sorbés (dans le Dossier 2001 Argile, le temps de transfert par diffusion avait été évalué par l'ANDRA à environ 200 000 ans). Sur la base de cette estimation de temps de transfert diffusif noté  $T_d$ , le temps d'apparition au toit du Callovo-Oxfordien du débit d'activité maximum pour une source émettant sur une durée courte devant  $T_d$  est de  $T_d/6$ , soit environ 200 000 ans, ce qui correspond approximativement aux temps obtenus dans les simulations de l'ANDRA pour les combustibles usés par exemple.

des coupures hydrauliques (clés d'ancrages), défaillances de tous les scellements et un dernier scénario d'abandon du stockage (pas de scellement dans les ouvrages d'accès jour-fond).

Ces quatre scénarios sont complétés par une analyse de sensibilité portant sur :

- l'effet d'une dégradation des propriétés hydrauliques et chimiques (perméabilité, diffusion et porosité) de l'EDZ ainsi que des propriétés hydrauliques (perméabilité) des barrières ouvragées et noyaux de scellement ;
- l'effet d'une cinétique de dégradation de tous les colis vitrifiés basée sur une vitesse de dissolution conservative et un taux de fracturation élevé (40 %) conduisant à une dissolution complète du verre en une centaine d'années (l'ANDRA précise que cette dégradation rapide couvre le cas d'une altération du verre due à des perturbations chimiques et notamment un panache alcalin) ;
- l'effet d'une dégradation des propriétés chimiques (propriétés de sorption et limites de solubilité plus faibles qu'en évolution normale) des barrières ouvragées et noyaux de scellement consécutive par exemple à la propagation hétérogène d'une perturbation chimique au sein de la bentonite ;
- l'effet d'un gradient ascendant plus important que celui retenu en référence (0,4 et 1 m/m contre 0,2 m/m) afin de maximiser la part convective éventuelle du transport au sein des ouvrages.

Pour toutes les situations de défaillance étudiées, les flux globaux d'activité migrant vers les encaissements sont du même ordre de grandeur que dans le cas du scénario d'évolution normale : les conséquences sont donc similaires à celles du scénario d'évolution normale. En revanche, les flux d'activité transitant au travers des ouvrages sont significativement augmentés (entre 2 et 3 ordres de grandeurs par rapport au scénario d'évolution normale) mettant en évidence l'importance des propriétés hydrauliques des scellements (ainsi que de l'EDZ au droit des scellements) pour limiter les transferts au sein du stockage. Toutefois, quel que soit le scénario considéré, le transfert des radionucléides par les ouvrages du stockage reste mineur devant le transfert par la formation hôte du fait des propriétés hydrauliques et chimiques favorables du Callovo-Oxfordien et de l'architecture borgne des alvéoles contribuant à limiter les circulations d'eau au sein des ouvrages.

#### **Scénario de défaut de colis**

L'ANDRA a défini un scénario de défaut de colis afin d'évaluer les conséquences d'une défaillance prématurée de conteneurage d'un nombre plus important de colis que celui retenu en SEN (5 colis de déchets vitrifiés et de combustibles usés) : les défaillances de 135 surconteneurs de colis vitrifiés et de 42 conteneurs de combustibles usés sont considérées dans ce scénario. Cet ensemble de colis correspondrait selon l'ANDRA à un mois de fabrication pendant lequel le système de contrôle de la qualité aurait été pris en défaut.

Lorsque l'étanchéité des (sur)conteneurs est prématurément perdue, l'eau se trouve au contact de matrices de verre et de combustibles usés dont la température est supérieure aux valeurs limites de respectivement 50°C et 80°C. Il s'ensuit que les cinétiques de dégradation du verre et de dissolution des pastilles d'uranium sont accélérées. Aussi, le relâchement et le transfert de radionucléides est simulé en retenant, pour les déchets vitrifiés, un modèle  $V_0S$  conduisant à un relâchement de l'activité contenue dans les verres en quelques centaines d'années contre quelques centaines de milliers d'années en situation normale, et pour les combustibles usés, une dégradation de la matrice d'uranium en 4 000 ans contre 40 000 ans pour la situation normale. Les fractions labiles ne sont pas modifiées.

De même, l'influence dans le temps du champ thermique sur les performances des matériaux argileux en champ proche est pris en compte par une augmentation de la diffusion (facteur multiplicatif variant entre 1 et 5) et une diminution de la rétention (facteur correctif de 0,1 sur le coefficient de partage). L'effet sur la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien est moins sensible et est négligé.

Les analyses de sensibilité menées sur la base de ce scénario concernent :

- l'influence du transitoire hydraulique lié à la phase de montée en pression des gaz durant les premiers milliers d'années,
- la diminution d'un ordre de grandeur de la perméabilité des ancrages de scellements ( $10^{-10}$  m/s contre  $10^9$  m/s) due à la saturation partielle des composants en bentonite,
- le cas où tous les colis sont défaillants 200 ans après la sortie des réacteurs, afin de couvrir une situation due à « *une mauvaise appréciation de la durée de vie des conteneurs sur l'ensemble du stockage* ».

Les résultats de ce scénario mettent en évidence que la perte prématurée d'étanchéité des conteneurs et surconteneurs n'induit pas d'augmentation du débit annuel de dose par rapport au scénario d'évolution normale. Au regard du temps de transfert diffusif long dans la formation hôte, l'accélération de la dégradation des colis défaillants due aux effets potentiels de la température sur les cinétiques de lixiviation du verre et des combustibles n'a pas d'influence. De plus, les effets de la température sur les propriétés de transport en champ proche sont limités dans le temps. Aussi, même en cas de défaillance de tous les (sur)conteneurs, le rôle de la formation hôte reste prépondérant pour maintenir l'impact dosimétrique au niveau de celui résultant de l'évolution normale du stockage.

### Scénarios de forages exploratoires

Deux types de situations ont été considérés par l'ANDRA :

- une situation à conséquences immédiates due à la remontée d'une carotte contaminée forée au travers de colis de stockage donnant lieu à une exposition externe du foreur,
- une situation à conséquences différées résultant de l'abandon d'un ou de deux forages, dans ce dernier cas une circulation en « U » se crée au sein du stockage entre les 2 forages.

Les forages sont postulés 500 ans après la fin de la période de surveillance, leur diamètre est d'ordre décimétrique et ils sont représentés sous la forme d'un tube dont la perméabilité équivalente est de  $10^{-6}$  m/s. Situés dans une zone de gradient hydraulique ascendant et traversant la formation hôte du Callovo-Oxfordien jusqu'au Dogger, ils favorisent la circulation ascendante de l'eau du Dogger vers l'Oxfordien au travers des ouvrages.

Pour ce qui concerne la situation à conséquences immédiates, l'ANDRA précise que le stockage n'a pas vocation à protéger un éventuel intrus qui court-circuiterait l'ensemble des barrières de confinement. Pour les combustibles usés, le colis retenu est le colis type CU1, d'activité massique la plus élevée au regard des radionucléides responsables du débit de dose ( $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ...). Pour les colis de type C, le colis retenu est le colis type C2, dont l'inventaire radiologique est plus pénalisant ou équivalent aux autres colis type. Pour les déchets de type B, le colis retenu est le colis type B5 pour son fort débit de dose dû au  $^{94}\text{Nb}$ .

Les situations à conséquences différées concernent l'interception par un forage des bouchons d'alvéoles de déchets C, de combustibles usés et de déchets B ainsi que l'interception de galeries d'accès à proximité des alvéoles.

Des analyses de sensibilité ont été menées afin d'évaluer l'influence sur le transport des radionucléides des performances de l'EDZ, l'influence d'un relâchement rapide d'activité des colis de déchets C (110 ans contre 8 000 ans) ainsi que le gain éventuel de l'emploi d'un corps de barrière ouvragée dans les alvéoles de déchets vitrifiés.

Les radionucléides retenus pour l'analyse sont ceux de période supérieure à 30 ans compte tenu de la date d'occurrence du forage. La voie d'atteinte de la biosphère est modélisée par un pompage d'approvisionnement en eau potable (AEP) situé dans un cas dans le Barrois à proximité du forage exploratoire et dans un autre cas à proximité de l'exutoire Saulx comme pour les autres scénarios. Dans le premier cas, le débit d'activité transitant par le forage au toit du Callovo-Oxfordien est dilué par le débit de pompage (10 l/min) du forage AEP ; dans le

second cas, le débit d'activité sortant du Callovo-Oxfordien au droit du forage est injecté dans les niveaux poreux inférieurs de l'Oxfordien.

L'inhalation par le foreur de gaz radioactif  $^{14}\text{C}$  sous forme méthane a été estimée par l'ANDRA à 0,03 mSv. Tant que l'exposition reste limitée à moins de deux heures, les impacts sont de l'ordre de la dizaine de millisieverts et sont dominés par l' $^{108\text{m}}\text{Ag}$  et le radium issus des déchets B.

Pour ce qui concerne l'impact différé associé aux forages abandonnés, les résultats sont du même ordre de grandeur que pour le scénario d'évolution normale. L'influence hydraulique des forages est limitée par les scellements qui empêchent les perturbations hydrauliques de se propager au sein des ouvrages. Les radionucléides responsables de l'impact dosimétrique sont les mêmes que pour le scénario d'évolution normale compte tenu du fait que les éléments sorbés ou à vie courte restent confinés ou décroissent au plus près des colis.

### Scénario de fonctionnement très dégradé

Selon l'ANDRA [4], l'objectif de ce scénario est « *de vérifier le degré de complémentarité des fonctions [de sûreté]* » et de « *tester la robustesse d'ensemble du stockage* » dans une situation très dégradée de défaillance multiple. Dans cet objectif, les performances allouées aux divers composants sont les suivantes :

- Callovo-Oxfordien sain : perméabilité de  $10^{-12}$  m/s, rétention « conservative »,
- EDZ : perméabilité de la zone fracturée de  $10^{-6}$  m/s, perméabilité de la zone endommagée de  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s, rétention « conservative »,
- scellements et ouvrages en bentonite : perméabilité du noyau de bentonite de  $10^{-9}$  m/s, rétention « conservative »,
- remblais : perméabilité de  $10^{-6}$  m/s,
- encaissants : modèle actuel pour la voie de transfert par les ouvrages, modèle à un million d'années pour la voie par le Callovo-Oxfordien afin de maximiser le gradient de charge,
- modèles de relâchements « conservatifs » pour l'ensemble des colis,
- tous colis défaillants en analyse de sensibilité sur le principe du scénario d'évolution altérée « défaut de colis ».

Les conséquences dosimétriques de ce scénario sont de l'ordre de 0,12 mSv/an. De ces résultats, l'ANDRA conclut que la formation hôte, même ayant des propriétés de confinement dégradées, conserve un rôle essentiel pour contenir les flux d'activité qui sortent du stockage vers les encaissants. Certains colis (B2 et combustibles usés en particulier) contribuent également à la maîtrise des flux et de l'impact. Enfin, l'architecture borgne des alvéoles permet de limiter l'importance des flux d'eau convectifs dans les ouvrages.

L'IRSN relève que l'ANDRA a construit un ensemble très important de scénarios d'évolutions du stockage destinés à simuler la migration des radionucléides au travers des ouvrages et des différentes formations géologiques. L'IRSN estime que ces simulations confirment que l'approche inverse dite « d'allocation de performance » est abandonnée, et constituent un progrès important par rapport au Dossier 2001 Argile sur plusieurs points.

- Le scénario d'évolution normale est basé sur des phénomènes qui tiennent compte d'incertitudes d'ordre technologique (taux de défaillance des colis et des bouchons d'alvéoles) et phénoménologique. À cet égard, à l'issue de l'examen par le groupe permanent « déchets » du Dossier 2001 Argile et de l'approche de sûreté qui le sous-tendait (dossier évalué par l'IRSN dans le rapport DES n° 566 présenté le 24 juin 2003 lors de la réunion du groupe permanent « déchets » consacrée à l'examen du Dossier 2001 Argile), la DGSNR avait demandé à l'ANDRA, par lettre DGSNR/SD3/0034/2003 du 19 janvier 2003, de présenter dans le Dossier 2005 Argile un scénario d'évolution normale qui intègre les incertitudes relatives à la réalisation des scellements et postule des taux initiaux de défaillance des différents composants du stockage (colis,

corps de barrière ouvragée, bouchons...). L'IRSN observe que cette demande a été globalement suivie. Concernant les défaillances des colis, l'IRSN note que celles-ci sont supposées intervenir peu après la mise en place des colis (200 ans après la sortie réacteur) et que 3 surconteneurs de déchets C et 2 conteneurs de combustibles usés ont été retenus dans le scénario d'évolution normale par l'ANDRA. L'IRSN constate que cette fraction de colis défaillants est extrêmement faible au regard du nombre total de colis stockables<sup>30</sup> et rappelle que les taux de défaillance des (sur)conteneurs métalliques devront être précisés ultérieurement (cf. chapitre 7.1.2.2 du présent rapport). L'IRSN note toutefois que l'ANDRA envisage, en scénario d'évolution altérée, que la perte prématurée d'étanchéité des (sur)conteneurages puisse concerner un nombre plus important de colis, voire la totalité (cf. chapitre 7.1.2.2 du présent rapport), ce qui permet de tester l'influence de ce paramètre sur la sûreté globale du stockage.

- Les choix des paramètres sont clairement explicités et représentent de manière globalement satisfaisante les évolutions possibles des composants du stockage ainsi qu'il résulte de l'évaluation effectuée dans le présent rapport. L'IRSN estime toutefois que l'approche, privilégiant des valeurs dites « phénoménologiques » lorsque le degré de confiance dans les résultats des études est considéré élevé, et « raisonnablement pénalisantes » lorsque certaines incertitudes demeurent, peut prêter à confusion. L'IRSN signale en effet que la terminologie employée par l'ANDRA laisse supposer que le scénario d'évolution normale du stockage est défini à partir d'un mélange de valeurs « best estimate » et pénalisantes. Or l'IRSN rappelle que le scénario d'évolution normale doit être basé sur un ensemble de valeurs raisonnablement pénalisantes sélectionnées en fonction du degré de confiance qui peut être accordé aux phénomènes responsables de l'évolution des barrières. L'IRSN estime que certaines valeurs retenues dans le scénario d'évolution normale (gradient hydraulique, modèle de relâchement des bitumes et des CSD-C, taux de défaillance des (sur)conteneurs, performances hydrauliques des scellements) relèvent plutôt d'hypothèses « best estimate ». Néanmoins, les études de sensibilité effectuées par l'ANDRA montrent que ces paramètres ont a priori peu d'incidence sur les capacités globales de confinement du stockage en situation normale. **Aussi, l'IRSN considère qu'à ce stade, les choix opérés par l'ANDRA conduisent globalement à une estimation raisonnable de l'évolution normale du stockage.**
- Les effets des défaillances envisagées en scénarios d'évolution altérée du système de stockage s'appuient sur un ensemble cohérent d'hypothèses. À titre d'exemple, l'IRSN note que l'influence de la défaillance de certains composants sur d'autres composants (par exemple l'influence de la perte prématurée d'étanchéité des surconteneurs de déchets C sur les mécanismes de dégradation du verre et de transfert en ambiance thermique, l'influence d'une interface défaillante bouchons d'alvéoles de déchets C/zone endommagée perméable à un panache alcalin migrant vers les colis...) a été traitée.
- L'étude de ces scénarios a également été enrichie d'analyses de sensibilité qui visent à évaluer l'importance des performances de chacune des barrières de confinement et du concept de stockage sur la sûreté du stockage. L'influence des composants principaux du stockage (à savoir la formation du Callovo-Oxfordien, la zone endommagée, les barrières de voisinage et scellements ainsi que les colis de stockage) sur les propriétés globales de confinement de l'installation a été évaluée.

Toutefois, l'IRSN constate qu'aucun scénario considérant explicitement la présence d'une fracture à proximité des zones de stockage n'est présenté dans le Dossier 2005 Argile. Par cohérence avec l'analyse des indices structuraux discutés dans le présent rapport (cf. chapitre 2 du présent rapport), l'IRSN estime qu'un scénario visant à évaluer la robustesse du stockage au regard d'une structure conductrice potentielle aurait dû être étudié par l'ANDRA afin

---

<sup>30</sup> L'IRSN rappelle que la règle de construction des scénarios retenue par l'ANDRA vise notamment à maximiser l'inventaire radioactif par colis type afin de s'affranchir des incertitudes portant sur la stratégie industrielle à venir. Selon cette approche, le nombre total de colis simulés est de 62 790 pour les déchets vitrifiés et de 17 500 pour les combustibles usés hors combustibles issus de la Défense.

de tenir compte de l'incertitude sur cette possibilité. Ce scénario pourrait être à ce stade de type « *what if* »<sup>31</sup> compte tenu du fait que ce type de structure n'a pas été identifié dans le Callovo-Oxfordien à ce jour. À cet égard, l'ANDRA précise dans le tome d'évaluation de sûreté du stockage géologique que l'hypothèse de la présence d'une fracture à proximité d'alvéoles est couverte par un scénario postulant l'interception d'infrastructures du stockage par des forages abandonnés. L'IRSN considère qu'un tel scénario n'est a priori pas comparable à un scénario prenant explicitement en compte l'existence d'une fracture comme cela a déjà été indiqué dans le rapport DES n°566 précité, du fait de zones d'influence (volume de roche dans lequel un panache radioactif peut être capté) très différentes entre un forage cylindrique et une structure pluri hectométrique. À cet égard, l'IRSN a évalué, sur la base d'un modèle simulant un stockage de combustibles usés dans la formation du Callovo-Oxfordien (réalisé avec le programme MELODIE<sup>32</sup>), l'influence d'une telle structure interceptant une galerie de liaison. Selon les résultats obtenus (cf. Annexe T7 au présent rapport), les conséquences de ce type de court-circuit sur le retard et l'atténuation des flux d'activité au travers du Callovo-Oxfordien sont mineures dès lors qu'une distance de garde suffisante est maintenue entre la fracture et les ouvrages (de l'ordre de 50 m), 0,1 % de l'activité totale relâchée étant concernée par ce court circuit. Cette estimation simplifiée tend à montrer que des dispositions simples, par ailleurs envisagées par l'ANDRA en cas de détection d'une fracture transmissive dans la formation du Callovo-Oxfordien, permettraient probablement de maintenir une capacité de confinement élevée de l'installation de stockage. Aussi, bien qu'une étude semblable aurait permis d'enrichir le Dossier 2005 Argile, l'IRSN considère que l'absence de prise en compte, à ce stade, d'une fracturation hypothétique de la formation hôte ne remet pas en cause les conclusions générales de l'ANDRA sur la faisabilité d'un stockage dans cette formation.

### 7.3.2 ENSEIGNEMENTS DE L'ÉVALUATION DE PERFORMANCE

L'interprétation des résultats de migration de radionucléides repose sur des indicateurs notamment les débits d'activité au toit du Callovo-Oxfordien et au droit des puits d'accès, ces entités constituant les deux voies de transfert de l'activité vers les encaissants. L'IRSN estime que cette approche permet, par comparaison avec les scénarios de référence (en situation normale ou altérée), d'évaluer la sensibilité du flux transitant au travers du Callovo-Oxfordien et des ouvrages aux principaux paramètres et hypothèses du modèle de transfert.

L'ANDRA conclut notamment de ces études que, de part sa faible perméabilité, la formation hôte du Callovo-Oxfordien contribue à limiter les apports d'eau et la circulation de soluté en cas de défaillance des colis et des scellements. Ses propriétés chimiques et de diffusion favorisent des relâchements lents et l'immobilisation des actinides et retardent de manière significative de nombreux radionucléides. Les ouvrages de scellements à base de bentonite sont certes efficaces pour rétablir un régime globalement diffusif dans le stockage mais l'architecture borgne des alvéoles et le rôle de « barrière absorbante » du Callovo-Oxfordien contribuent à limiter l'impact d'un défaut de ceux-ci. Parmi les conclusions du tome « *Évaluation de Sûreté du Stockage Géologique* » [4], l'ANDRA précise que la barrière ouvragée, dont la mise en place est envisagée dans les alvéoles de combustibles usés afin de couvrir les incertitudes sur les effets thermiques pendant quelques milliers d'années, « *n'apporte pas de bénéfice au regard des transferts de radionucléides, dans aucun des scénarios envisagés* ».

Ces conclusions sont cohérentes avec les enseignements que l'IRSN avait dégagés de ses propres travaux sur le sujet et dont une partie était exposée dans le rapport DSU n°21 présenté le 2 mars 2004 lors de la réunion du groupe permanent « déchets » consacrée à l'examen du comportement mécanique d'une installation de stockage

---

<sup>31</sup> Ce type de scénario appelé « *what if* » par les instances internationales est destiné à évaluer la capacité d'un stockage à maintenir un niveau de performance élevé pour des événements dont l'occurrence ne peut être formellement établie compte tenu d'un état des connaissances donné.

<sup>32</sup> MELODIE est le code de simulation intégrée du transfert de radionucléides en formation géologique développé et utilisé par l'IRSN en support aux expertises réalisées sur les stockages de déchets radioactifs.

sur le site de Bure. Dans ce rapport, l'IRSN signalait notamment que « *dans l'hypothèse d'un écoulement convectif dans la zone en rupture, la formation hôte continuerait de jouer un rôle de « pompe » pour le panache de radionucléides sous réserve que ses propriétés chimiques soient préservées dans l'environnement immédiat de l'alvéole [...et] qu'un corps de barrière ouvragée, même formant une « boîte diffusive idéale » autour des colis, ne jouerait qu'un rôle mineur dans la limitation du transfert de radionucléides ».*

L'IRSN convient que l'ensemble des études de sensibilité, que ce soit pour des évolutions normale ou altérées du stockage, mettent en évidence le rôle majeur joué par la formation du Callovo-Oxfordien dans le confinement de l'activité : ce rôle est dû en premier lieu à la très faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et aux propriétés chimiques et de transfert favorables à l'atténuation et au retard de la plupart des radionucléides, et tout particulièrement des actinides. Aussi, au regard du rôle de la formation hôte du Callovo-Oxfordien et dès lors qu'aucune perte partielle de ce rôle n'est postulée, les autres composants tels que les colis de stockage et les scellements n'ont qu'une importance secondaire sur le confinement. Néanmoins, l'IRSN observe que les scellements de puits et de galeries jouent un rôle dans le contrôle du régime hydraulique prévalant dans le stockage. En particulier, lorsque l'EDZ au droit des scellements et les noyaux de ces scellements possèdent des propriétés de transfert défavorables, on observe l'établissement d'un régime de transfert pour lequel l'influence de la convection est plus marquée dans les galeries et les puits, ce qui a une influence sur la répartition des transferts entre les alvéoles jusqu'au puits et la formation hôte. Mais, quel que soit le scénario étudié, la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien reste dominante, du fait notamment des surfaces d'échange importantes entre les ouvrages et les argilites qui favorisent la diffusion des radionucléides vers les argilites ainsi que de l'architecture borgne des modules d'alvéoles qui contribue à maintenir un régime diffusif au voisinage des alvéoles.

Toutefois, l'IRSN considère que, malgré la qualité du travail effectué et de la présentation claire qui en est faite, il reste assez difficile in fine de hiérarchiser l'importance des différents composants au regard de la sûreté globale du stockage. Cela est lié au fait que dans la quasi-totalité des scénarios étudiés, la formation du Callovo-Oxfordien est considérée exempte de défaut et possède des propriétés de confinement très importantes. Cette hypothèse a pour effet de masquer en grande partie l'influence des autres composants sur la sûreté globale du stockage. Seuls les scénarios supposant l'interception des infrastructures du stockage par des forages permet d'introduire une certaine sollicitation des barrières, mais celle-ci reste faible et très locale. Aussi, l'IRSN considère que la démonstration de l'ANDRA aurait été plus convaincante si ces mêmes analyses de sensibilité avaient été conduites sur la base d'un scénario postulant la présence d'une structure conductrice à proximité des alvéoles, ce scénario se justifiant au titre d'une approche prudente permettant de considérer les incertitudes résiduelles sur ce point ainsi qu'expliqué précédemment dans le présent rapport. La prise en compte d'une telle hypothèse qui aurait eu également pour effet d'accentuer les possibilités de transfert convectif au sein des ouvrages aurait permis de mieux mettre en évidence la valeur ajoutée des divers composants et du caractère favorable de leurs performances. En préparation des travaux d'expertise des études de l'ANDRA, l'IRSN a mené ses propres investigations sur ce sujet. Ainsi, l'IRSN a évalué le rôle des différents composants du stockage dans une formation argileuse du type de celle de Bure<sup>33</sup> dans l'hypothèse d'un court-circuit du système de stockage contribuant à créer un régime de transfert hydraulique convectif dans les galeries de liaison. Ces calculs confirment les tendances identifiées par l'ANDRA concernant le rôle des différentes barrières sur le contrôle de l'activité relâchée, qui parviennent globalement à rétablir un régime diffusif dominant de migration d'activité dans l'installation de stockage et la formation hôte (cf. Annexe T8 au présent rapport). Ainsi que déjà indiqué dans le chapitre précédent, l'absence de prise en compte explicite par l'ANDRA des hypothèses précitées ne remet pas en cause à ce stade les conclusions générales sur le caractère robuste et performant des concepts envisagés dès lors

---

<sup>33</sup> Bentonite barriers in integrated performance assessment (BENIPA), project report EUR 21023 EN. BENIPA est un exercice européen du 6<sup>ème</sup> PCRD Euratom dédié à l'évaluation des performances des barrières ouvragées en bentonite auquel l'IRSN a participé entre 2000 et 2003.

que des dispositions adaptées telles que celles prévues par l'ANDRA sont mises en œuvre. Il reste que dans l'optique future d'un éventuel développement du projet de stockage, une attention particulière devra être portée au traitement des défauts structuraux dans les évaluations de sûreté, même si les investigations géologiques futures amènent à conclure que l'existence ou la propagation de structures dans la formation hôte est improbable. En effet, cette hypothèse est susceptible d'apporter des éléments de dimensionnement des composants du stockage et de son architecture.

L'IRSN considère en conclusion que l'ANDRA a réalisé un travail de qualité en s'attachant à couvrir un ensemble de situations d'intérêt pour évaluer le comportement à long terme du stockage et traiter les diverses incertitudes par une analyse combinatoire aussi complète que possible. Toutefois, l'analyse basée sur une multitude de cas de calculs traités ne met pas clairement en évidence quels seraient les composants clés et leur niveau de performance requis au regard de la sûreté globale du stockage. À cet égard, il sera important à l'avenir de stabiliser les hypothèses qui contribueront à dimensionner les ouvrages de stockage. L'IRSN rappelle que selon la vraisemblance des phénomènes ou événements responsables des évolutions possibles du stockage, des hypothèses « raisonnablement pénalisantes » (situation normale) à « best estimate » (situations peu probables) seront retenues pour en quantifier les effets et pour dimensionner les composants. Il importe qu'à l'avenir ces jeux d'hypothèses soient très clairement explicités.

## 7.4 CALCULS D'IMPACT DOSIMÉTRIQUE

Les scénarios décrits au chapitre 7.3.1 du présent rapport ont fait l'objet d'une estimation de l'impact dosimétrique. Le calcul d'un tel impact nécessite au préalable de définir les hypothèses de transfert de l'activité sortant de la formation hôte du Callovo-Oxfordien dans les encaissants jusqu'aux exutoires, puis des exutoires vers l'homme. Pour ce qui concerne le transfert d'activité dans les encaissants jusqu'aux exutoires, l'ANDRA a défini un modèle simplifié des circulations hydrauliques dans l'Oxfordien calcaire et le Dogger. Le transfert d'activité depuis les exutoires vers l'homme est déduit des études réalisées par l'ANDRA pour définir la biosphère permettant de quantifier l'impact dosimétrique. Les hypothèses retenues pour simuler les propriétés de confinement du stockage ont été évaluées plus haut. L'objectif des chapitres qui suivent est d'évaluer les modèles et hypothèses retenues pour simuler le transfert des radionucléides dans les encaissants hydrauliques et la biosphère.

Le modèle hydrogéologique simplifié utilisé par l'ANDRA pour estimer l'impact radiologique d'un stockage a été élaboré dans le but de calculer des impacts radiologiques pénalisants en termes de voies et de temps de transfert, pour un panache de radionucléides issu du stockage. Ce modèle consiste en une simplification du modèle phénoménologique « région-secteur », présenté dans le chapitre 2.2.4.2 du présent rapport.

Le modèle simplifié repose sur une discrétisation verticale des aquifères et des semi-perméables comprenant 3 couches pour le Dogger (afin de représenter la zone de plus forte perméabilité correspondant aux niveaux productifs), 3 couches pour le Callovo-Oxfordien (pour représenter le stockage), 5 couches pour l'Oxfordien (représentation des deux groupes de niveaux poreux Hp1-4 et Hp5-7), une couche pour le Kimméridgien, et 2 couches pour les calcaires du Barrois. Les paramètres hydrodynamiques introduits sont uniformes pour chacune de ces couches, hormis pour une zone de perméabilité plus élevée affectant les horizons sus-jacents de la couche hôte et représentant la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons. Les propriétés géochimiques des encaissants pouvant avoir un effet de retard sur le transport (*i.e.* sorption, précipitation...) sont négligées, et un coefficient de diffusion majorant a été retenu ( $D_e = 2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , homogène sur toutes la formation encaissante et dans le Dogger).

Pour ce qui concerne la surface topographique appliquée au modèle, l'érosion qui devrait affecter les formations sus-jacentes à la couche hôte a été simulée à l'aide d'une modélisation géoprospective. Cette modélisation montre notamment l'apparition d'un nouvel exutoire (Ornain). À ces modifications de la topographie s'ajoute une modification du gradient vertical entre les encaissants. Ainsi, l'ANDRA considère un gradient ascendant de

0,2 m/m ainsi que de 1 m/m en analyse de sensibilité pour la situation actuelle (modèle dit « à l'actuel ») et de 0,4 m/m pour la situation envisagée dans un million d'années (modèle dit « à 1 Ma »), les deux situations hydrogéologiques étant simulées dans l'objectif d'évaluer la sensibilité du transfert de radionucléides au modèle hydrogéologique. Pour les calculs du transport d'activité vers le Dogger, un gradient descendant de 0,2 m/m est retenu. Les conditions aux limites hydrauliques imposées sont issues de la modélisation hydrogéologique « région-secteur » pour le modèle « à l'actuel » et de la modélisation géoprospective examinée au chapitre 2.2.4.3 du présent rapport pour le modèle à 1 Ma.

Des forages d'alimentation en eau potable (AEP) ont été retenus par l'ANDRA pour modéliser l'arrivée de la radioactivité dans la biosphère. Les sites potentiels de forages les plus proches du laboratoire ont été privilégiés, et la simulation du captage est réalisée à l'endroit où le panache atteint une zone présentant un débit d'eau suffisant pour permettre un tel pompage. L'ANDRA retient pour les estimations d'impact les exutoires « Saulx » et « Marne » (forages interceptant les deux portions du panache à leur intersection avec la zone de fracturation diffuse, Figure 43), un exutoire dit « trajectoires régionales » (forage interceptant le panache lorsqu'il atteint la limite Nord-Ouest du modèle) ainsi que l'exutoire « Barrois » (forage peu profond au droit du site dans l'aquifère superficiel des calcaires du Barrois afin de prendre en compte la part de radionucléides migrant par diffusion depuis le site de stockage). À la suite de l'évolution du contexte hydrogéologique sur 1 million d'années, un exutoire identique à ce qui précède est considéré pour la Saulx ainsi qu'un forage au niveau de l'Ornain captant le panache d'activité juste avant sa dilution dans la rivière (Figure 43). Par ailleurs, afin de tenir compte de l'apparition d'une ligne de partage des eaux (panache se divisant entre l'Ornain et la Marne), l'influence de l'emplacement du stockage a été étudiée par une analyse de sensibilité. Enfin, pour ce qui concerne l'aquifère du Dogger, l'exutoire retenu dans les situations « à l'actuel » et à « 1 Ma » est un forage atteignant cette formation au niveau de la Saulx. Les temps de transfert associés à ces différents exutoires, obtenus à l'aide du modèle hydrogéologique simplifié de l'ANDRA, sont donnés dans le Tableau 15 ci-après.

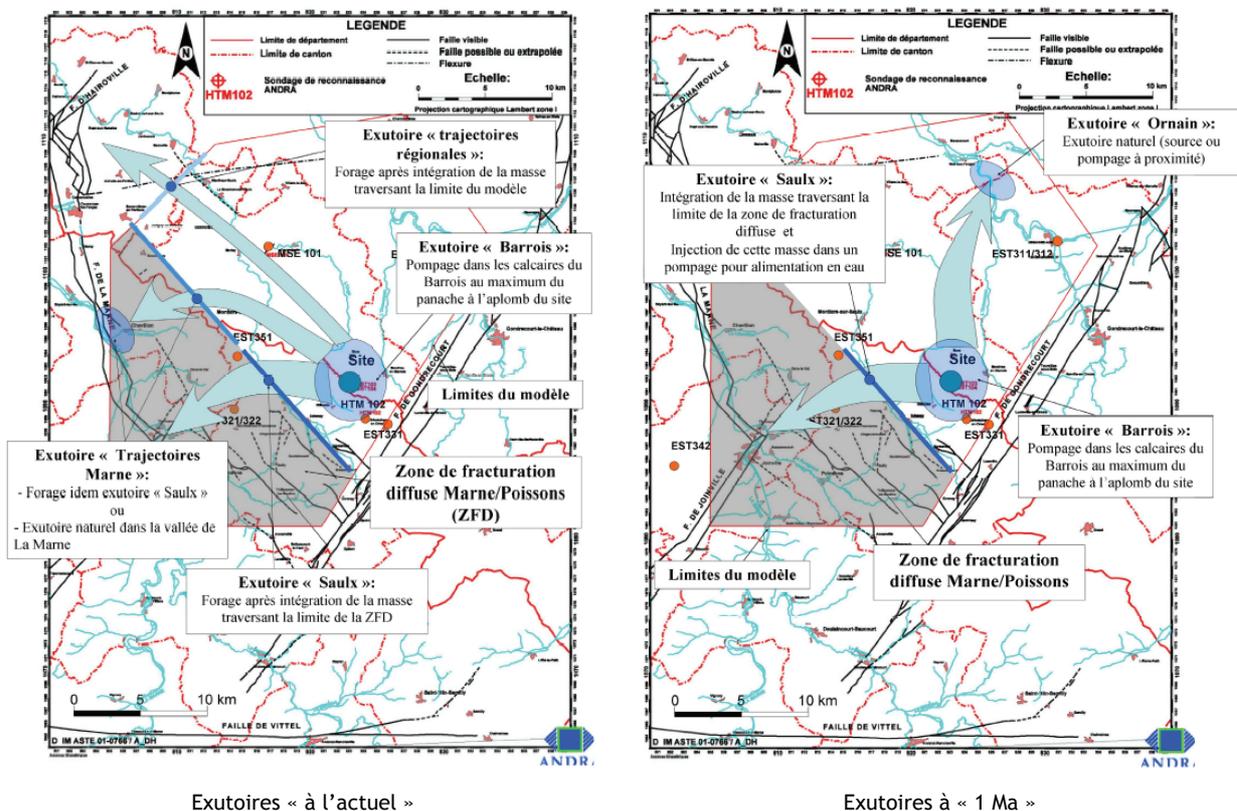


Figure 43 - Exutoires « à l'actuel » et « à 1 Ma » retenus pour les évaluations d'impact [75].

OXFORDIEN				DOGGER	
Modèle à l'actuel		Modèle à 1 Ma		Modèle à l'actuel / 1 Ma	
Exutoire	Temps de transfert	Exutoire	Temps de transfert	Exutoire	Temps de transfert
Forage Saulx (-1/3 du panache)	80 - 100 ka	Forage Saulx (-2/3 du panache)	20 - 50 ka	Forage Saulx	20 Ma
Forage Marne (-1/3 du panache)	200 ka	Forage Ornain (-1/3 du panache)	100 - 150 ka	/	/

Tableau 15 - Exutoires et temps de transfert estimés au moyen du modèle hydrogéologique utilisé pour les évaluations d'impact [74] [75].

Le débit de pompage retenu pour les captages profonds dans la zone de fracturation diffuse est de 100 l/min. L'impact dosimétrique calculé dépend de la concentration en activité des eaux prélevées par ces captages, égale au rapport entre le flux de radionucléides contenus dans le panache et le débit de pompage. Pour les autres forages, la concentration est la concentration maximale du panache.

La biosphère représente le dernier maillon de la chaîne de transfert des radionucléides depuis les colis de déchets jusqu'à l'homme. La méthodologie utilisée par l'ANDRA pour évaluer l'impact radiologique à long terme du site de Meuse/Haute-Marne repose sur le concept de « biosphère de référence ». Une biosphère de référence ne prétend pas représenter la biosphère telle qu'elle existera dans le futur, mais constitue un jeu d'hypothèses qui permet d'apprécier l'impact potentiel du site. Elle repose sur des données relatives aux conditions environnementales (le climat en particulier, mais également la pédologie, l'hydrographie...), au groupe critique associé et à ses activités (consommation alimentaire, ration des animaux...) ainsi qu'au comportement spécifique de chaque radionucléide dans l'environnement.

La biosphère de référence retenue par l'ANDRA pour évaluer l'impact dosimétrique du stockage repose sur l'hypothèse d'un climat tempéré et d'un groupe de référence vivant en partie de ses propres productions et consommant de l'eau contaminée provenant d'un puits foré dans les formations encaissantes. Cette eau est utilisée pour la boisson, l'irrigation du jardin potager ainsi que des grandes cultures, et l'abreuvement des animaux. Ces différentes utilisations sont à la base de l'exposition calculée pour les membres du groupe de référence. Ce groupe de référence a été défini par l'ANDRA en combinant les habitudes de consommation alimentaires de 6 groupes candidats vivant pour l'essentiel des productions dont ils se sont fait une spécialité : chasseurs/cueilleurs, éleveurs de bœufs et de vaches laitières, producteurs de céréales, éleveurs de volaille, éleveurs d'ovins, éleveurs de porcs. Ce groupe ayant des habitudes de consommation « moyennes » a été retenu par l'ANDRA car il regroupe le plus grand nombre de voies d'exposition pertinentes.

Le comportement des radionucléides dans les compartiments successifs de la biosphère (eau, sol, végétaux, produits animaux) est décrit par des modèles établis à partir des lois d'équilibres simples entre les concentrations en radionucléides de deux compartiments consécutifs. Ces lois diffèrent dans le cas du  $^{36}\text{Cl}$  pour lequel l'ANDRA a développé un modèle basé sur les rapports isotopiques de  $^{36}\text{Cl}$  et de chlore stable sur tous les maillons de la chaîne alimentaire, hors ingestion par l'homme. Les sources de chlore stable considérées entraînent la dilution, dans chaque compartiment de la biosphère, du  $^{36}\text{Cl}$  provenant de l'exutoire. Selon l'ANDRA, cette approche permet de représenter de façon plus réaliste le comportement du  $^{36}\text{Cl}$  dans l'environnement.

Sur la base des différents éléments précédents, l'ANDRA a calculé des facteurs de conversion biosphère utilisés pour estimer l'impact dosimétrique du stockage. L'étude de la biosphère est complétée par des analyses de sensibilité. Celles-ci visent à évaluer l'influence du choix du groupe de référence, des valeurs des paramètres radioécologiques ainsi que des hypothèses d'évolutions climatiques (biosphères boréale, toundra ainsi que biosphère relative à un climat tempéré plus chaud et plus sec) sur les facteurs de conversion de l' $^{129}\text{I}$ , du  $^{36}\text{Cl}$  et du  $^{79}\text{Se}$ .

L'IRSN rappelle que les évaluations de l'impact dosimétrique du stockage visent à vérifier que les expositions individuelles sont acceptables au regard notamment des objectifs de la RFS III.2.f qui, pour une exposition prolongée liée à des événements certains et très probables, limite les équivalents de dose individuels à 0,25 mSv/an.

L'IRSN constate que les niveaux maximaux de débit de dose résultants de ces évaluations sont d'un ordre de grandeur inférieurs à la limite préconisée par la RFS III.2.f pour le scénario d'évolution normale (0,022 mSv/an pour les combustibles usés). Pour les scénarios d'évolutions altérées, les niveaux de doses sont plus élevés d'un ordre de grandeur environ par rapport à l'évolution normale simulée par l'ANDRA. Les radionucléides qui contribuent à la dose ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  et  $^{79}\text{Se}$ ) sont les mêmes que pour le scénario d'évolution normale.

L'IRSN constate que ces tendances sont cohérentes avec celles obtenues dans le cadre du projet européen SPA<sup>34</sup>. Au cours de cet exercice, l'IRSN avait simulé un hypothétique site de stockage de combustibles usés dans une couche argileuse du bassin de Paris de 160 m d'épaisseur. Pour des hypothèses de calcul retenues à l'époque proches de celles du Dossier 2005 Argile, les principaux radionucléides contribuant à l'impact dosimétrique étaient également les produits d'activation et de fission à vie longue, peu ou pas sorbés avec en premier lieu l'iode, puis le chlore et ensuite le sélénium ; les radionucléides des chaînes d'actinides restaient confinés dans la formation hôte. Cette hiérarchie s'explique notamment par le fait que ces radionucléides ne sont pas retardés et ne décroissent pas durant leur parcours (cas de l'iode et du chlore). L'impact du  $^{79}\text{Se}$  est gouverné par sa solubilité faible et sa décroissance radioactive durant son transfert. L'ANDRA a indiqué que l'influence de la période du  $^{79}\text{Se}$ , réévaluée à plus d'1 Ma au lieu de 65 000 ans, sera présentée en décembre dans le Dossier 2005 Argile. Selon ses propres évaluations, l'IRSN estime que cette modification n'entraîne pas de changement notable de l'impact du  $^{79}\text{Se}$  si sa solubilité reste inchangée.

L'IRSN considère que l'ANDRA a retenu des hypothèses et effectué un ensemble de simulations qui permettent d'estimer des ordres de grandeur de l'impact dosimétrique susceptible d'être généré par l'installation de stockage. En particulier, l'IRSN estime que :

- les modélisations du relâchement et du transfert des radionucléides au sein du stockage et de la formation hôte du Callovo-Oxfordien sont dans l'ensemble pertinentes ainsi qu'indiqué dans les chapitres précédents ;
- la démarche retenue par l'ANDRA d'un captage du panache d'activité relâchée dès que celui-ci parvient dans les zones plus productrices est satisfaisante (exutoire « Saulx »). Dans l'Oxfordien à l'aplomb de cet exutoire, les hypothèses prises en compte pour modéliser les panaches de radioactivité dans les encaissements mineurent les temps de transfert estimés au moyen de modélisations hydrogéologiques dites « phénoménologiques » évaluées au chapitre 2 du présent rapport. L'ANDRA retient par ailleurs des hypothèses qui majorent, sur la base des connaissances actuelles, le transfert par diffusion vers l'aquifère du Barrois au droit du stockage. Enfin, les exutoires retenus sont plus proches du stockage que ceux indiqués par les modélisations hydrogéologiques, ce qui majore l'impact de radionucléides susceptibles de décroître fortement dans les encaissements (ce qui était le cas du  $^{79}\text{Se}$  pour une période radioactive estimée à 65 000 ans) ;
- les bases scientifiques et la démarche générale de l'ANDRA pour définir une biosphère de référence attestent d'un niveau de connaissance représentatif du meilleur niveau actuellement disponible au plan

---

<sup>34</sup> Le projet européen SPA (Spent fuel disposal Performance Assessment, EUR 19132 EN) a été coordonné par l'IRSN (alors l'IPSN) et a impliqué des partenaires allemands (GRS), belges (SCK.CEN), espagnols (ENRESA), finlandais (VTT) et néerlandais (NRG). Consacré au cas particulier d'un stockage de combustibles usés dans trois types de formations géologiques (argile, granite et sel), le projet SPA a fait porter un effort particulier sur la prise en compte du comportement du colis (terme-source) et de son environnement proche (champ proche) dans le but d'évaluer l'incidence de ces constituants du système sur l'impact global du stockage. Dans le domaine de la biosphère, la confrontation des différentes approches a permis de mieux apprécier l'influence des hypothèses relatives aux voies de transfert et d'exposition.

international. Les travaux réalisés, visant notamment à évaluer un ensemble très important d'hypothèses concernant la variabilité des paramètres représentatifs des biosphères, sont de grande qualité.

Un certain nombre de remarques peuvent cependant être faites quant au caractère enveloppe des estimations réalisées.

En premier lieu, l'IRSN convient que le fait de pomper directement dans le panache au maximum de sa concentration permet de s'affranchir d'hypothèses supplémentaires sur la dilution par la rivière. Cependant, l'IRSN observe que le mode de calcul employé pour estimer la concentration dans le forage profond de l'exutoire Saulx peut induire des difficultés pour apprécier le caractère pénalisant ou non des estimations réalisées puisque la concentration pompée dépend de la valeur du débit de pompage : le choix d'un pompage de 100 l/min est une hypothèse qui peut être retenue à ce stade mais il est difficile d'apprécier si l'activité de l'eau pompée (qui résulte d'une dilution par ce débit d'eau du débit d'activité fourni par le panache) est proche de celle qui serait pompée dans le panache au droit des zones de concentration maximale de celui-ci (cette dernière approche est d'ailleurs retenue par l'ANDRA pour estimer la concentration des eaux pompées au droit des autres exutoires). L'IRSN constate que l'ANDRA a retenu ce mode de calcul pour pallier des difficultés de modélisation numérique dues au choix du paramétrage du modèle hydrogéologique simplifié. Il conviendra à l'avenir de confirmer le caractère enveloppe de cette modélisation en apportant des éléments justifiant mieux les hypothèses de dilution du panache. Par ailleurs, il sera nécessaire de compléter les estimations effectuées sur la base d'un modèle hydrogéologique plus précis permettant de statuer sur la possibilité ou non de transferts localisés (cf. chapitre 2 du présent rapport) ainsi que sur leur influence sur les temps de migration des radionucléides et l'éventuelle dilution du panache.

En second lieu, l'IRSN constate que les facteurs de conversion (notés FC) calculés par l'ANDRA pour le groupe de référence retenu (basé sur un mélange des caractéristiques de divers groupes « candidats ») sont inférieurs à ceux estimés pour chacun des groupes candidats et ce quel que soit le radionucléide étudié. L'ANDRA choisit cependant de conserver ce groupe comme groupe de référence car « *il apparaît comme un compromis permettant d'intégrer un ensemble étendu de voies de transfert tout en reflétant un comportement moyen* ». L'IRSN rappelle que la RFS III.2.f recommande de retenir « *des groupes critiques hypothétiques, représentatifs des individus susceptibles de recevoir les doses les plus élevées parmi lesquels des individus vivent au moins partiellement en autarcie* ». L'IRSN note que les différents groupes candidats étudiés correspondent au même niveau de vraisemblance et ne sont pas significativement différents du point de vue des hypothèses d'autarcie. L'IRSN considère donc qu'il serait plus justifié de retenir le groupe induisant la dose potentiellement la plus forte plutôt que le groupe présentant un comportement moyen. Par ailleurs, les facteurs de conversion retenus par l'ANDRA pour évaluer les impacts en situations normale et altérées concernent les adultes du groupe de référence, l'influence de l'âge des individus sur les FC ayant été étudiée par ailleurs dans l'analyse de sensibilité. Selon les estimations réalisées par l'IRSN, la prise en compte de l'âge des individus a une faible influence sur l'iode mais l'IRSN constate comme l'ANDRA que cette influence est plus marquée pour le chlore et le sélénium (facteur 4 à 8 selon l'âge et le radionucléide considéré). Compte tenu du fait que l'impact dosimétrique estimé est dominé par l'<sup>129</sup>I d'environ 2 et 4 ordres de grandeur par rapport au <sup>36</sup>Cl et au <sup>79</sup>Se, l'IRSN considère que la conclusion de l'ANDRA selon laquelle « *retenir un adulte est un choix globalement majorant* » est justifiée. L'IRSN note néanmoins que selon ses propres estimations, le cumul des incertitudes précitées (choix du groupe critique, âge des individus) peut induire une augmentation d'un facteur 6 pour l'<sup>129</sup>I et de plus d'un ordre de grandeur pour le <sup>79</sup>Se.

Pour le <sup>36</sup>Cl, l'IRSN constate que son facteur de conversion biosphère est estimé par l'ANDRA à partir d'une modélisation des phénomènes de dilution isotopique du chlore dans la biosphère. À cet égard, l'IRSN observe qu'il existe dans la littérature des méthodes d'estimation différentes du facteur de conversion biosphère du <sup>36</sup>Cl qui conduisent à des fluctuations importantes de la valeur de ce paramètre. À titre d'exemple, des variations d'environ un ordre de grandeur ont été constatées parmi les valeurs retenues par les différents partenaires du projet européen SPA. Par ailleurs, près de deux ordres de grandeur de différence sont recensés entre les valeurs basses calculées au moyen du modèle retenu par l'ANDRA dans le Dossier 2005 Argile et celles obtenues au moyen

d'un modèle pénalisant, dit « physiologique », employé également par l'ANDRA pour des évaluations génériques lorsque les données de site permettant de définir les caractéristiques des biosphères ne sont pas connues. Compte tenu du fait que le chlore radioactif est un des principaux contributeur à l'impact dosimétrique que pourrait générer un stockage géologique de déchets de haute activité et de combustible usés, l'IRSN considère qu'il est justifié de chercher à mieux connaître les mécanismes et paramètres responsables de manière prépondérante de l'impact dosimétrique que peut délivrer ce radionucléide mais constate que le modèle retenu par l'ANDRA dans le Dossier 2005, explicité dans les documents [143] et [144] conduit a priori à une estimation basse de l'impact. L'IRSN souligne toutefois que cette estimation peut être plausible. En effet, des calculs du facteur de conversion biosphère du  $^{36}\text{Cl}$ , effectués par l'IRSN au moyen d'un modèle différent de celui de l'ANDRA (modèle compartimental), ne montrent pas d'écart significatif par rapport aux valeurs indiquées dans le Dossier 2005 (facteur 2 environ). Néanmoins, compte tenu des incertitudes sur les évolutions climatiques futures qui affecteront l'environnement du site de stockage (et en conséquence le domaine d'application des modèles), et les fluctuations des valeurs constatées dans la littérature, **l'IRSN considère qu'il est important de consolider à l'avenir les modèles permettant d'estimer les facteurs de conversion biosphère du  $^{36}\text{Cl}$  pour diverses conditions d'environnement.**

Par ailleurs, la biosphère de type « puits » est choisie par l'ANDRA de préférence à une biosphère de type « rivière » pour laquelle les voies d'expositions résultent de la contamination des compartiments environnementaux depuis l'eau d'une rivière contaminée par le panache associé au stockage. Les biosphères de type rivière ne sont étudiées que dans le cadre des études de sensibilité. L'IRSN considère comme l'ANDRA que le choix d'un scénario de type « puits » est généralement pénalisant par rapport à un scénario de type rivière du fait de la moindre dilution des radionucléides. Toutefois, l'IRSN note également que le choix d'un scénario de type « puits » conduit à écarter certaines voies de transfert comme la contamination des prairies par inondation, la contamination des poissons ainsi que la contamination d'autres produits naturels (gibier, plantes). L'IRSN note par ailleurs que l'existence simultanée sur une même zone géographique d'une contamination des eaux souterraines et des eaux de surface est réaliste. L'IRSN estime de ce fait qu'il aurait été plus pertinent et enveloppe de retenir une biosphère de référence combinant des exutoires de type « puits » et scénarios « rivière » incluant donc l'ensemble des voies d'exposition possibles.

Enfin, l'IRSN note que le climat de type subtropical est bien identifié par l'ANDRA comme l'un des régimes climatiques vraisemblable à l'échelle de la durée de vie du stockage mais que la biosphère correspondante n'a pas été étudiée dans le cadre du Dossier 2005 Argile. L'IRSN considère pourtant que ce type de biosphère aurait du faire l'objet d'un traitement au moins comparable à celui des biosphères boréale ou toundra (description des caractéristiques des sols, des végétaux, des animaux et de la communauté humaine et facteurs de conversion associés) car la biosphère subtropicale pourrait être pénalisante par rapport à une biosphère tempérée du fait de l'augmentation importante des températures et de la diminution des précipitations pendant la période végétative.

En conclusion, l'IRSN considère que l'ANDRA a effectué une évaluation raisonnable de l'impact dosimétrique d'un stockage et constate que cet impact est faible (de 0,02 mSv/an en situation normale à 0,12 mSv/an en situation très dégradée). L'IRSN note toutefois que cet impact, dû pour la plus grande part au stockage des combustibles usés, ne présente qu'une faible marge quant au respect de la limite de 0,25 mSv préconisé par la RFS III.2.f en situation normale. À cet égard, la présente évaluation met en évidence que pour estimer l'impact du stockage, d'autres jeux d'hypothèses également fondés sur la base des connaissances disponibles, pourraient être retenus et conduire en première approximation à consommer cette marge. L'IRSN considère à cet égard que les hypothèses décrivant le système hydrogéologique et la biosphère constituent des sources d'incertitude importantes, parmi d'autres éléments susceptibles d'affecter les évaluations d'impact (notamment les cinétiques de relâchement d'activité par les combustibles et une possible sorption de l'iode dans les argiles). Aussi, l'IRSN estime que l'amélioration des connaissances relatives à ces deux domaines constitue un enjeu d'importance dans le futur en vue de vérifier si les ordres de grandeur estimés dans le Dossier 2005 peuvent être considérés enveloppe des impacts possibles. Il est à noter que concernant la

biosphère, l'impact dosimétrique estimé est très dépendant des choix d'hypothèses retenues pour décrire le groupe critique et les voies d'atteinte de ce groupe (puits, rivière, inondations...). L'IRSN souligne que ces choix ne relèvent pas uniquement d'une stricte expertise technique et estime qu'il serait utile de les définir en s'appuyant autant que possible sur un consensus des différents acteurs concernés.

## 7.5 CONCLUSION

L'IRSN estime que l'ANDRA a réalisé une estimation des performances possibles des différentes barrières (colis, barrières ouvragées, barrière géologique) d'un stockage cohérente avec l'état des connaissances et les résultats de ses propres recherches. L'IRSN considère néanmoins que si cette estimation fournit des ordres de grandeur possibles de performances à long terme des ouvrages de scellements du stockage et des (sur)conteneurs, celles-ci nécessiteront d'être confirmées par des essais et des démonstrateurs in situ.

L'IRSN estime que l'ANDRA a effectué une estimation raisonnable de l'impact dosimétrique du stockage et constate que cet impact est principalement dû au relâchement de radionucléides initialement présents dans les combustibles usés. À cet égard, l'IRSN note que l'impact calculé présente peu de marge par rapport à la limite préconisée par la RFS III.2.f en situation normale et estime qu'il conviendra de le préciser en améliorant en particulier les connaissances relatives au système hydrogéologique et à la modélisation de la biosphère. Par ailleurs, l'IRSN note que certaines hypothèses plus pénalisantes auraient pu être retenues pour décrire les relâchements des colis de boues bitumées et des CSD-C en situation d'évolution normale. De même, compte tenu des incertitudes sur la caractérisation de la barrière géologique et des effets possibles des séismes, l'IRSN considère qu'une fracture hypothétique aurait dû être prise en compte dans l'évaluation de sûreté. Toutefois, des analyses de sensibilité effectuées par l'ANDRA et des évaluations propres à l'IRSN indiquent que la prise en compte des hypothèses précitées n'est pas de nature à remettre en question les conclusions générales de l'évaluation de sûreté de l'ANDRA. À cet égard, l'IRSN constate que cette dernière contribue à mettre en évidence l'influence de la barrière géologique, des scellements et de l'architecture générale du stockage (longueurs de galerie, alvéoles borgnes...) sur le confinement des radionucléides et souligne en particulier la robustesse du stockage au regard des défaillances des principaux composants.

En conclusion, au regard des évaluations de performances et d'impact réalisées, l'IRSN estime qu'un stockage apparaît, au stade actuel, faisable. Toutefois, l'analyse de l'ANDRA basée sur une multitude de cas de calculs traités ne met pas clairement en évidence quels seraient les composants clés et leur niveau de performance requis au regard de la sûreté globale du stockage. À cet égard, il sera important à l'avenir d'explicitier les jeux d'hypothèses qui contribueront à dimensionner les ouvrages de stockage.

## **8 CONCLUSION GÉNÉRALE**

L'IRSN souligne en premier lieu que l'ANDRA présente, dans le Dossier 2005 Argile, un ensemble important de données, d'études et d'interprétations permettant d'apprécier la possibilité qu'une installation de stockage de déchets de haute activité et à vie longue dans la couche argileuse étudiée au moyen du laboratoire souterrain de Bure puisse assurer, à court et à long terme, la protection de l'homme et de l'environnement contre la nocivité de ces déchets. La démarche retenue par l'ANDRA pour montrer cette possibilité consiste notamment en l'élaboration d'un concept de stockage permettant de confiner la radioactivité au plus près des déchets. L'ANDRA traite par ailleurs de l'ensemble des points critiques pour la sûreté d'un stockage mis en lumière lors des différents examens conduits par le groupe permanent « déchets » aux différentes étapes de développement de l'étude de faisabilité. Les phénomènes responsables de l'évolution possible des propriétés de confinement des différents composants du stockage sont identifiés ainsi que les incertitudes associées. Le poids de ces incertitudes sur la capacité de l'installation de stockage à s'opposer à la dissémination de matière radioactive contenue dans les déchets est également évalué. L'IRSN estime que la démarche retenue par l'ANDRA est cohérente avec les objectifs fixés par la RFS III.2.f et que le Dossier 2005 Argile présente dans l'ensemble des travaux de grande qualité.

Pour ce qui concerne les points critiques de la sûreté d'un stockage, l'IRSN retient en particulier de son évaluation du Dossier 2005 Argile que :

- la couche argileuse du Callovo-Oxfordien possède vraisemblablement un fort potentiel d'amortissement de la fracturation qui laisse préjuger l'existence, dans cette couche, de blocs sains de faible perméabilité et de taille cohérente avec les modules de stockage envisagés par l'ANDRA ;
- des études complémentaires sont nécessaires pour améliorer la compréhension des écoulements souterrains dans les formations calcaires qui encadrent la formation argileuse. Les données acquises ne montrent cependant pas d'indication, dans le secteur étudié, d'échange de fluides entre ces aquifères ni d'écoulement rapide en leur sein, à l'exception des zones de failles cartographiées. Celles-ci sont néanmoins exclues de la zone de transposition dans laquelle l'ANDRA considère que les formations géologiques possèdent des propriétés a priori favorables à l'implantation d'un stockage ;
- les principales perturbations (thermiques, hydriques, mécaniques, chimiques et liées au gaz) n'apparaissent pas devoir produire, selon les connaissances actuelles, des effets rédhitoires sur la capacité de confinement d'ensemble de l'installation de stockage ;
- les ouvrages de scellement ont fait l'objet d'une attention particulière dans les derniers développements du projet. Leur conception a été adaptée pour intercepter la zone fracturée par les travaux de creusement. Des ordres de grandeur possibles de leurs propriétés de confinement ont été estimés. Ceux-ci nécessiteront néanmoins d'être confirmés à l'avenir ;
- une première analyse de sûreté de l'exploitation du stockage a été conduite. L'IRSN estime, à ce stade, que les dispositions envisagées par l'ANDRA ne présentent pas d'obstacle au transfert des colis dans les infrastructures du stockage dans des conditions sûres, ni de difficultés majeures de gestion des risques liés à l'incendie, à la criticité et à l'occurrence d'un séisme.

Pour ce qui concerne l'identification et la prise en compte des incertitudes dans les évaluations de sûreté, l'IRSN estime que celles-ci sont dans l'ensemble bien recensées dans le Dossier 2005 Argile et constate que l'ANDRA a adopté une démarche permettant de les couvrir de manière large, soit par le biais de dispositions de conception particulières, soit par l'adoption d'hypothèses majorant leurs effets et par l'étude des conséquences sur la sûreté globale de l'installation d'une perte partielle ou totale des fonctions des différents composants du stockage. Ainsi, l'IRSN considère notamment que les concepts de stockage envisagés devraient permettre d'éviter des élévations de température préjudiciables aux capacités de confinement des composants du stockage et estime que l'adoption

d'un (sur)conteneur est pertinente pour prévenir des relâchements d'activité dans des conditions de température pour lesquelles les phénomènes de transport sont mal maîtrisés. L'IRSN note par ailleurs que les incertitudes sur l'évolution des performances de confinement des composants ouvragés du stockage (colis, (sur)conteneur, scellements) sont prises en compte en postulant des défaillances de divers niveaux de sévérité de ces composants. L'IRSN estime qu'en plus de ces situations, l'ANDRA aurait dû évaluer les effets possibles d'une fracture hypothétique traversant la barrière géologique. L'IRSN estime en effet que si la formation du Callovo-Oxfordien présente des propriétés globalement favorables au confinement de la radioactivité, l'état actuel des connaissances ne permet pas de conclure que l'endommagement tectonique (fractures) de la formation argileuse est, sur l'ensemble des zones du secteur susceptible d'accueillir un éventuel stockage, aussi faible que celui observé dans le laboratoire, ni d'écarter des effets possibles de séismes sur la formation hôte, à l'aplomb de structures éventuellement détectées sous cette formation. Des études menées par l'IRSN ont toutefois montré que les conséquences de ce type de court-circuit sont a priori mineures dès lors qu'une distance de garde suffisante est maintenue entre la fracture et les ouvrages de stockage. Aussi, l'IRSN considère que les résultats des évaluations présentées par l'ANDRA dans le Dossier 2005 Argile, concluant à la robustesse du stockage et à sa capacité de maintenir des impacts dosimétriques faibles malgré des défaillances possibles de ses divers composants, sont fondés.

**Aussi, au vu des éléments examinés, l'IRSN estime qu'un stockage de déchets radioactifs dans la couche argileuse étudiée au moyen du laboratoire souterrain de Bure apparaît « faisable », dans la mesure où il n'a pas été identifié, à ce stade, d'obstacle rédhibitoire à l'établissement dans le futur de la « démonstration de sûreté » d'une telle installation.**

En revanche, il reste de nombreux points à approfondir, si une décision de principe sur le stockage géologique était prise par le Parlement en 2006, pour établir cette démonstration. Parmi ces points, l'IRSN considère qu'il faudrait en particulier procéder à la sélection d'un site dans la zone de transposition :

- en définissant une stratégie de reconnaissance permettant d'identifier la fracturation possible dans la formation hôte et les couches qui l'encadrent. À cet égard, l'IRSN estime qu'il faudra vraisemblablement recourir à l'emploi d'une technique géophysique de haute résolution, telle que la sismique 3D, couplée à la reconnaissance de la formation argileuse au moyen de forages obliques réalisés à l'aplomb des indices sismiques les plus marqués dans les formations sous-jacentes ;
- en améliorant la connaissance des écoulements souterrains et en précisant les hypothèses relatives aux biosphères existantes ou susceptibles d'exister sur le site sélectionné. L'IRSN note en effet que l'impact dosimétrique associé au stockage des combustibles usés, même s'il reste faible, présente peu de marge par rapport à la limite préconisée par la RFS III.2.f en situation normale. Les estimations d'impact, qui sont sensibles aux caractéristiques des aquifères et des biosphères, devront donc être précisées à l'avenir. Il conviendra en particulier d'être en mesure de statuer sur la possibilité ou non que des transferts localisés, à l'échelle du secteur, puissent remettre en cause le caractère globalement homogène des écoulements dans les formations encaissantes, tel que déduit des données piézométriques aujourd'hui rassemblées. Pour ce qui concerne les biosphères, l'IRSN souligne que les choix d'hypothèses qui les décrivent ne relèvent pas uniquement d'une stricte expertise technique et estime qu'il serait utile de les définir en s'appuyant autant que possible sur un consensus des différents acteurs concernés.

Par ailleurs, des travaux seront nécessaires pour confirmer le bien-fondé des hypothèses de dimensionnement des divers composants du stockage, dans l'objectif de mettre en œuvre des barrières de confinement aussi efficaces que raisonnablement possible. À cet égard, l'IRSN estime qu'il conviendra plus particulièrement :

- de confirmer les performances qu'un ouvrage de scellement est susceptible d'atteindre, en tenant compte des effets des perturbations chimiques qu'il pourra subir dans le temps ainsi que de ceux d'une montée en pression des gaz au contact de l'ouvrage. Le dimensionnement de l'ouvrage devra également être fondé sur la compréhension du comportement mécanique de la roche qui doit encore être améliorée.

En effet, si l'extension de la zone fracturée par le creusement des ouvrages, observée en laboratoire souterrain, reste compatible avec les options de scellement envisagées par l'ANDRA, elle est néanmoins supérieure à celle initialement attendue. Il sera donc nécessaire d'évaluer avec un niveau de confiance suffisant, la possible évolution de cette extension ;

- vérifier la pertinence du pré-dimensionnement des composants métalliques du stockage (chemisage des alvéoles et (sur)conteneurs) au regard des phénomènes de corrosion. En effet, il existe des incertitudes significatives relatives aux vitesses de corrosion de ces composants, du fait notamment d'un manque de connaissances des conditions d'environnement transitoires et de leur durée ;
- confirmer le dimensionnement des soutènements des ouvrages de grande dimension et plus généralement améliorer les connaissances sur les propriétés physiques et chimiques des bétons dans leur état initial et évolué, en tenant compte de l'influence sur ces propriétés des conditions de mise en œuvre industrielle des composants cimentaires ;
- justifier plus avant la pertinence des concepts retenus dans le Dossier 2005 Argile eu égard notamment au risque d'explosion lié à la production d'hydrogène par radiolyse dans les alvéoles de déchets B, à la capacité de remédier à une situation résultant de la chute d'un colis dans ces alvéoles et à la possibilité de reprise des colis de déchets C et de combustibles usés. À cet égard, l'IRSN n'exclut pas que les dispositions prévues par l'ANDRA, qui visent par essence à minimiser la dégradation des colis et des ouvrages à long terme, puissent offrir la possibilité de retrait aisé des colis de déchets sur des durées longues, mais ne peut se prononcer en l'état actuel des connaissances sur le fait que cette possibilité soit d'ores et déjà acquise sur deux ou trois siècles.

L'IRSN souligne que ces compléments devront notamment s'appuyer sur des essais in situ, dans des conditions aussi proches que possibles de celles prévues dans une installation de stockage. Des démonstrateurs d'ouvrages de stockage seront selon l'IRSN nécessaires, en vue de démontrer à l'échelle industrielle la sûreté d'une telle installation.



# ANNEXES TECHNIQUES



## Annexe T1 - Données relatives au modèle d'inventaire des colis de déchets

Liste des « colis types » du modèle d'inventaire et principales estimations de ces colis

MATIÈRE OU DÉCHET	« COLIS TYPE »	DESCRIPTION
Combustibles REP EDF	CU1	<i>Combustibles irradiés de type UOX (UOX2, UOX3) et de type URE</i>
	CU2	<i>Combustibles irradiés de type MOX</i>
Combustibles CEA	CU3	<i>Combustibles irradiés dans les réacteurs EL4 et CELESTIN et combustibles issus de la propulsion nucléaire</i>
Déchets vitrifiés	C0	Produits d'activation (PA) et de fission (PF) vitrifiés, provenant des installations PIVER et AVM ; <i>PA et PF vitrifiés futurs (UMo) de l'atelier R7, conditionnés dans des conteneurs standards de déchets vitrifiés (CSD-V)</i>
	C1	PA et PF vitrifiés dont la puissance thermique est équivalente à celle des déchets vitrifiés produits selon la spécification de production actuellement en vigueur
	C2	<i>PA et PF vitrifiés dont la puissance thermique est supérieure à celle des déchets produits selon la spécification de production actuellement en vigueur</i>
	C3	<i>PA et PF vitrifiés issus du conditionnement d'un mélange de solutions de dissolution de combustibles de type UOX et MOX</i>
	C4	<i>PA et PF vitrifiés contenant, en masse, environ 1 % de plutonium</i>
Déchets activés	B1	<i>Grappes de commande et poison des réacteurs de type REP et de type RNR conditionnés en colis standards de déchets compactés (CSD-C)</i>
Déchets bitumés	B2	<i>Boues bitumées provenant de l'atelier STE3 de l'établissement COGEMA de La Hague et de la STEL de Marcoule ; Boues bitumées provenant de l'atelier STE2 de l'établissement COGEMA de La Hague</i>
Déchets technologiques et divers cimentés ou compactés	B3	Déchets technologiques conditionnés dans des conteneurs en béton, dans des conteneurs en béton fibres cylindriques (CBF-C'2), dans des conteneurs en acier et dans des conteneurs en amiante et ciment (CAC) ; <i> fines, résines et déchets pulvérulents contenus dans les décanteurs et les silos situés à La Hague cimentés et conditionnés dans des CBF-C'2 ; boues et concentrats cimentés conditionnés dans des conteneurs en béton ; « déchets pulvérulents » (résines, fines, zéolithes, diatomées, graphite et boues) entreposés à Marcoule cimentés et placés dans des fûts dits « EIP » ; déchets technologiques issus de MELOX conditionnés dans des CSD-C</i>

Tableau T1-1 - Liste des « colis types » du modèle d'inventaire (en italique les colis dont la production n'est pas encore autorisée) ([6]).

MATIÈRE OU DÉCHET	« COLIS TYPE »	DESCRIPTION
Déchets de structure cimentés	B4	Coques et embouts cimentés dans des fûts métalliques
Déchets de structure avec ou sans déchets technologiques, compactés	B5	Coques et embouts et déchets technologiques issus des usines UP2-800 et UP3A conditionnés dans des CSD-C ; <i>coques, embouts et déchets technologiques contenant des matières organiques, provenant des usines UP2-800 et UP3A conditionnées dans des CSD-C ; coques et embouts provenant de l'atelier HAO conditionnés dans des CSD-C ; déchets magnésiens contenus dans les silos 115 et 130 situés à La Hague conditionnés dans des CSD-C</i>
Déchets de structure et technologiques mis en fût	B6	Déchets technologiques issus de l'installation AVM, entreposés dans des conteneurs en acier ; <i>déchets technologiques métalliques, déchets technologiques contenant des matières organiques, déchets de structure magnésiens, déchets de structure métalliques, conditionnés dans des fûts EIP</i>
Sources	B7	Blocs sources conditionnés dans des conteneurs en béton et reconditionnés dans des conteneurs métalliques ; <i>crayons sources primaires et secondaires provenant des réacteurs de type REP, supposés conditionnés dans des CSD-C ; sources scellées, cimentées dans des fûts EIP</i>
Déchets au radium et à l'américium	B8	<i>Objets au radium à usage médical cimentés dans un fût EIP ; têtes de paratonnerre au radium ou à l'américium compactées et cimentés dans des conteneurs en acier ; fûts contenant du sulfate de plomb radifère reconditionnés dans des fûts EIP</i>

Tableau T1-1 (suite) - Liste des « colis types » du modèle d'inventaire (en italique les colis dont la production n'est pas encore autorisée) ([6]).

« Colis type »	Scénario S1A <sup>1</sup>			Scénario S1B <sup>2</sup>			Scénario S1C <sup>3</sup>			Scénario S2 <sup>4</sup>		
	Nombre	Volume* (m <sup>3</sup> )	Activité (Bq)	Nombre	Volume* (m <sup>3</sup> )	Activité (Bq)	Nombre	Volume* (m <sup>3</sup> )	Activité (Bq)	Nombre	Volume* (m <sup>3</sup> )	Activité (Bq)
CU1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13 500	94 500	8,8E+19
CU2	0	0	0	5 400	10 800	9,7E+18	5 400	10 800	9,7E+18	4 000	8 000	7,2E+18
<b>Total « CU »</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5 400</b>	<b>10 800</b>	<b>9,7E+18</b>	<b>5 400</b>	<b>10 800</b>	<b>9,7E+18</b>	<b>17 500</b>	<b>102 500</b>	<b>9,5E+19</b>
C0	4 120	700	3,5E+18	4 120	700	3,5E+18	4 120	700	3,5E+18	4 120	700	3,5E+18
C1	4 640	810	1,2E+19	4 640	810	1,2E+19	38 350	6 710	9,6E+19	4 640	810	1,2E+19
C2	990	170	2,6E+18	27 460	4 810	7,1E+19	0	0	0,0E+00	5 920	1 040	1,5E+19
C3	13 320	2 330	2,8E+19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C4	13 250	2 320	3,3E+19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total « C »</b>	<b>36 320</b>	<b>6 330</b>	<b>7,9E+19</b>	<b>36 220</b>	<b>6 320</b>	<b>8,7E+19</b>	<b>42 470</b>	<b>7 410</b>	<b>9,9E+19</b>	<b>14 680</b>	<b>2 550</b>	<b>3,1E+19</b>
B1	2 560	470	3,1E+17	2 560	470	3,1E+17	2 560	470	3,1E+17	2 560	470	3,1E+17
B2	104 990	36 060	2,5E+17	104 990	36 060	2,5E+17	104 990	36 060	2,5E+17	104 990	36 060	2,5E+17
B3	32 940	27 260	7,9E+17	32 940	27 260	7,9E+17	32 940	27 260	7,9E+17	30 390	24 540	7,3E+17
B4	1 520	2 730	8,2E+16	1 520	2 730	8,2E+16	1 520	2 730	8,2E+16	1 520	2 730	8,2E+16
B5	42 600	7 790	5,7E+18	39 900	7 300	5,3E+18	39 900	7 300	5,3E+18	13 600	2 490	1,6E+18
B6	10 810	4 580	8,9E+16	10 810	4 580	8,9E+16	10 810	4 580	8,9E+16	10 810	4 580	8,9E+16
<b>Total « B »</b>	<b>195 420</b>	<b>78 890</b>	<b>7,2E+18</b>	<b>192 720</b>	<b>78 400</b>	<b>6,8E+18</b>	<b>192 720</b>	<b>78 400</b>	<b>6,8E+18</b>	<b>163 870</b>	<b>70 870</b>	<b>3,1E+18</b>
<b>Total des « colis types »</b>	<b>231 740</b>	<b>85 220</b>	<b>8,6E+19</b>	<b>234 340</b>	<b>95 520</b>	<b>1,0E+20</b>	<b>240 590</b>	<b>96 610</b>	<b>1,2E+20</b>	<b>196 050</b>	<b>175 920</b>	<b>1,3E+20</b>

\* Volume des colis primaires pour les déchets de type B et C et volume des colis de stockage pour les combustibles irradiés

**Tableau T1-2 - Nombre et activité à la mise en stockage synthétisés et volume estimé par l'IRSN à partir des données du modèle d'inventaire (d'après [6] et lettre ANDRA/DSQE/DIR/03-210 du 25 novembre 2003).**

<sup>1</sup> Traitement de tous les types de combustibles (UOX, MOX et URE)

<sup>2</sup> Traitement de tous les types de combustibles, sauf le MOX, et production de colis de déchets vitrifiés dont la puissance thermique est supérieure à celle des colis produits actuellement

<sup>3</sup> Traitement de tous les types de combustibles, sauf le MOX, et production de colis de déchets vitrifiés dont la puissance thermique est équivalente à celle des colis produits actuellement

<sup>4</sup> Traitement des combustibles de type UOX1 (colis de déchets vitrifiés dont la puissance thermique est équivalente à celle des colis produits actuellement), de la moitié des combustibles de type UOX2 (colis de déchets vitrifiés dont la puissance thermique est supérieure à celle des colis produits actuellement) et stockage direct, sans traitement, des autres combustibles



## Annexe T2 - Analyse statistique réalisée par l'IRSN de la fracturation mineure à inframétrique à l'échelle du secteur

Une analyse statistique a été effectuée par l'IRSN à partir de plus de 2 000 mesures de fractures généralement inframétriques, parfois plurimétriques, relevées sur le terrain en 2000-2002 [152]. Dans chacun des sites explorés (Figure T2-1) ont été mesurés les joints, failles, diaclases, fentes de tension, pics stylolitiques et plis. Cette analyse permet de proposer une interprétation des caractéristiques des structures de dimension plus importante susceptibles d'exister dans le secteur.

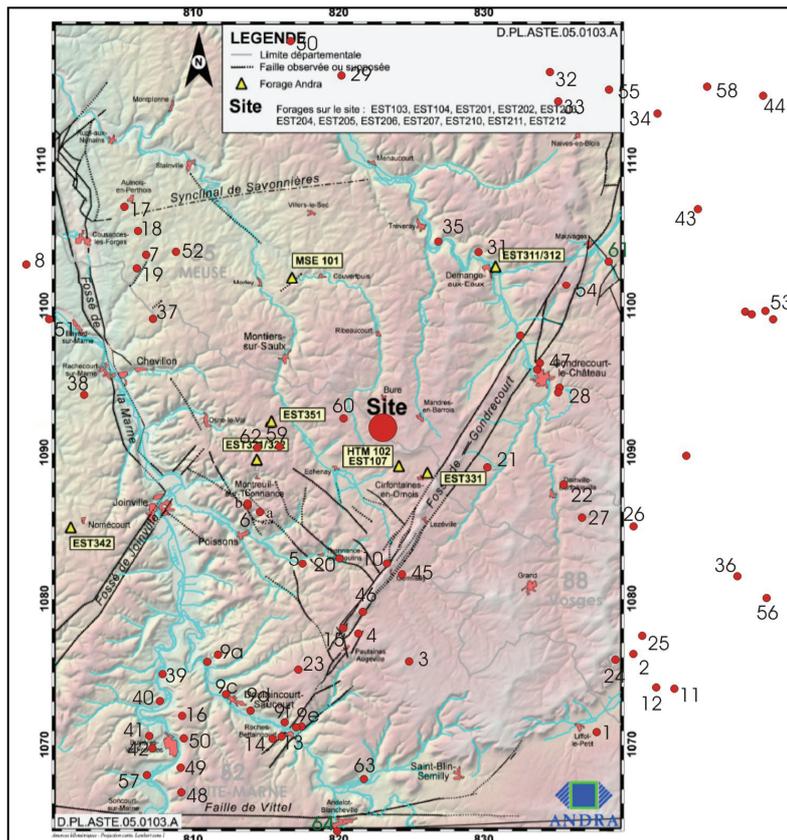


Figure T2-1 - Sites d'analyse tectonique explorés, reportés sur le schéma structural du secteur [5].

### 1- L'ensemble des fractures

La totalité des fractures correspond à plus de 2000 mesures de joints et de failles. Elles sont préférentiellement orientées N035-055°, N0120-140° et N010° (Figure T2-2). Elles plongent en majorité vers le quart SE [152], ce qui suggère un basculement régional tardif vers le NW (vers le centre du Bassin parisien).

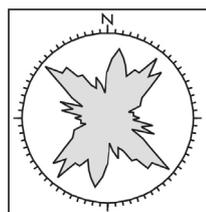
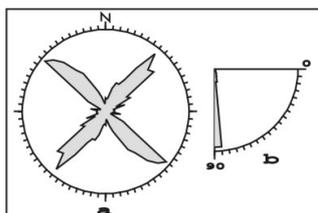


Figure T2-2 - Rosaces de fréquence des azimuts de l'ensemble des fractures du secteur élargi (Figure T2-1).

### 2- Les joints

Environ 800 joints ont été mesurés, incluant diaclases, fentes ouvertes ou cristallisées. Les joints sont subverticaux (Figure T2-3 b). Les deux orientations représentées (Figure T2-3 a), N130-140° et N040-050°, sont typiquement

"hercyniennes" (phase d'orogénèse datant du Paléozoïque). C'est également l'orientation des failles principales du secteur. Ceci suggère l'existence d'une **empreinte tectonique hercynienne dans le socle**, ayant influé sur l'orientation des structures de toutes dimensions dans le secteur. Les diaclases sont orientées N130-140° (2/3) et N040° (1/3). Les fentes de tension et diaclases remplies de calcite sont orientées surtout N040° puis 140°. Les **fractures ouvertes** observées sur le terrain sont également représentées par ces deux directions.

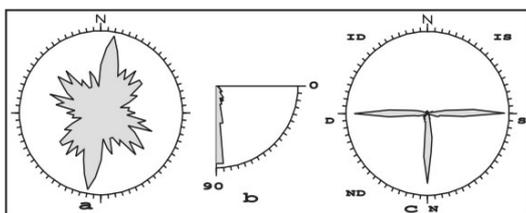


**Figure T2-3** - Azimuts (a) et inclinaison (b) des joints du secteur élargi (Figure T2-1).

### 3- Les failles

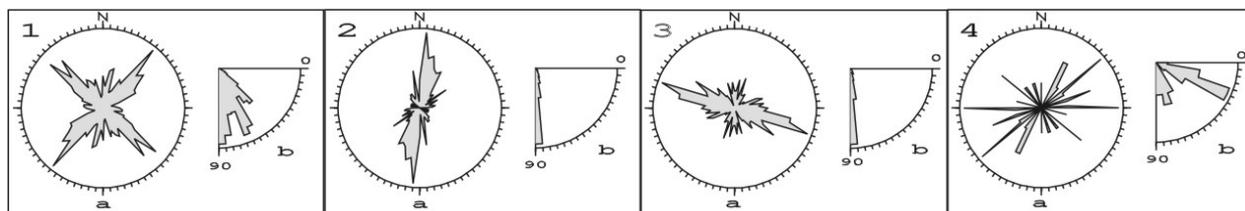
Sur une totalité d'environ 1 500 failles mesurées dans un secteur élargi (Figure T2-1), les orientations de failles les plus représentées sont N010°, N120-140°, N100-110° et N040-050° (Figure T2-4 a). La **répartition de ces orientations est très hétérogène** d'une partie à une autre du secteur (voir partie 4 de cette annexe) : les failles orientées N010° sont fréquentes dans le Nord-Est du secteur (Perthois), les failles N040-050° sont surtout présentes autour des failles principales de même orientation, Gondrecourt, Roches-Bettaincourt et Joinville, de même que les failles N120-140° sont présentes autour des failles principales de la Marne et de la zone de Poissons), et les failles N100-110° sont plus nombreuses dans le centre-Est du secteur.

La plupart des failles sont **subverticales** (Figure T2-4 b). Un tiers des stries montre un pitch (i.e., inclinaison des stries dans le plan de faille) vertical de failles normales, deux tiers des pitches sont horizontaux et indiquent des failles sénestres et dextres (Figure T2-4 c). Les pitches obliques sont rares car les réactivations de fractures se sont produites, à plusieurs reprises dans l'histoire tectonique [152], par permutation des axes de contraintes (tel le passage d'une compression décrochante à une extension).



**Figure T2-4** - Azimuts (a), inclinaison (b) et pitches (c) de l'ensemble des failles du secteur élargi.

Les **failles décrochantes**, représentant **64 % des failles mesurées dans le secteur**, sont sub-verticales. Les failles **dextres** (Figure T2-5 2 ; 28 % des failles) sont surtout orientées **N100-130°**. Les failles **sénestres** (Figure T2-5 3 ; 36 %) sont surtout orientées **N000-025°**. Les rares failles inverses (4 % des failles ; Figure T2-5 4), orientées NE-SW, présentent pour la plupart une inclinaison typique de failles inverses (20-30°) ; celles qui présentent un pendage plus fort sont des failles normales réactivées en inverses.



**Figure T2-5** - Azimuts (a) et inclinaison (b) des failles normales (1), sénestres (2), dextres (3), inverses (4).

Les failles présentant un jeu normal (Figure T2-5 1) représentent au maximum **32 % des failles mesurées** : dans de nombreux sites, un grand nombre de fractures non verticales et non striées ont été assimilées à des failles normales, car d'autres fractures de mêmes orientation et pendage présentaient des stries normales ; le nombre de failles comptabilisées comme « normales » est donc possiblement surestimé. Les azimuts N035-060° et N130-145°

sont les plus représentés. Les failles orientées N040-050° sont en majorité « héritées » : elles correspondent à des réactivations de fractures subverticales (joints et failles décrochantes ; Figure T2-6 1). Les failles orientées N130-140° sont en majorité « néoformées » : elles présentent des pendages de 50-70° typiques des mécanismes en faille normale (Figure T2-6 2).

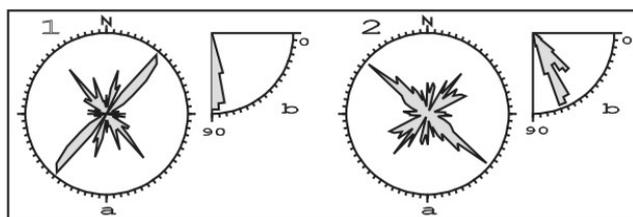


Figure T2-6 - Azimuts (a) et inclinaison (b) des failles normales, (1) réactivées ou (2) néoformées.

La reconstitution des paléocontraintes réalisée à partir de ces jeux de failles [152] suggère que les failles normales N040-050°, héritées, sont dues à l'extension oligocène NW, qui explique environ 17 % de la totalité des failles mesurées. Les failles néoformées N130-140° seraient majoritairement liées à l'extension mésozoïque NE à E-W (rassemblant 10 % des failles mesurées). La compression pyrénéenne NNW (31 %) est compatible avec les failles dextres N120-140° et sénestres N000-020°. La compression pyrénéenne NNE (14 %) serait responsable de failles dextres N170-010° et sénestres N030-050°. La compression alpine WNW (8 %) a vraisemblablement activé des failles dextres N090-120° et sénestres N130-160°.

#### 4- Un exemple d'étude d'une partie du secteur : la zone diffuse Marne-Poissons

Environ 300 fractures ont été mesurées dans la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons (sites 5, 6a & b, 10, 20, 59, 62). Les failles sont préférentiellement orientées N120-145° (Figure T2-7 a), et subverticales (Figure T2-7 b). Les joints et les fentes cristallisées (Figure T2-7 c, d) sont quasi-exclusivement orientés N140°.

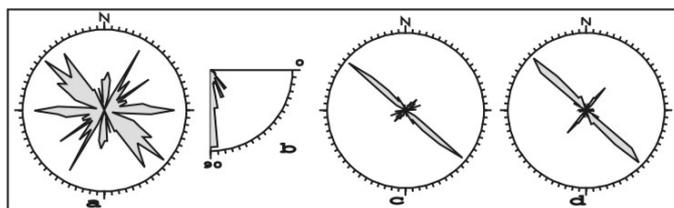


Figure T2-7 - Rosaces de fréquence des fractures dans la zone diffuse Marne-Poissons.

a- azimuts (a) et inclinaison (b) des failles, c- azimuts des diaclases, d- azimuts des fractures cristallisées.

Les observations de jeux successifs des failles inframétriques sur le terrain permettent de proposer, à titre d'hypothèse, l'histoire suivante pour les failles de la zone de Poissons. L'extension mésozoïque NE à E-W a généré des failles normales N120-145°, et a réactivé des accidents préexistants, car certaines failles associées à cette extension sont subverticales (Figure T2-8). La compression pyrénéenne précoce orientée NNW a probablement réactivé ces failles avec un jeu dextre, et généré de nouvelles failles N120-145° (néoformés). L'épisode de compression alpine WNW a pu réactiver une partie de ces failles. Enfin, certaines des fractures verticales ont pu être ouvertes (telles des fentes de tension) par la compression alpine NW.

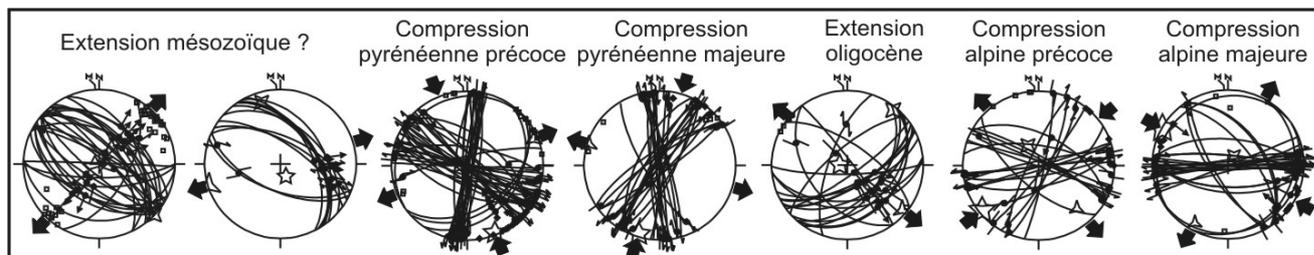


Figure T2-8 - Champs de contraintes méso-cénozoïques reconstitués à partir des failles inframétriques à mineures mesurées dans la zone diffuse Marne-Poissons.

(Diagrammes de Schmidt, hémisphère inférieur. M, pôle magnétique. N, pôle géographique. Carré, pôles des fentes de tension. Losanges, pics stylolitiques. Courbes, plans de failles. Les points avec flèches doubles (sénestres ou dextres) ou flèches simples (centrifuges-normales ; centripètes-inverses) indiquent les stries. Étoiles grises, axes du tenseur des contraintes (5 branches :  $\sigma_1$ , 4 branches :  $\sigma_2$ , 3 branches :  $\sigma_3$ ).



## Annexe T3 - Méthode sismique 3D haute résolution appliquée au site de Tournemire (Aveyron)

Afin d'évaluer le degré de détection des failles à faible décalage vertical ou des zones fracturées, l'IRSN a réalisé une campagne de sismique 3D haute résolution dans la Station Expérimentale de Tournemire (Figure T3-1).

À l'échelle du secteur, la couche argileuse du site de Tournemire est affectée par :

- la faille du Cernon, orientée E-W, de 80 km de long, située au Nord du site,
- la faille de Tournemire, orientée NE-SW, de 11 km de long, située au Sud du site,

À l'échelle du site (dans l'emprise de la sismique 3D), la couche argileuse est affectée par :

- une zone de failles décrochantes « F », dites principales, de dimension probablement kilométrique, recoupée par les forages EX1 et EX2 situés dans le prolongement des galeries Ouest et Secondaire.
- une zone de failles décrochantes « fs », dites secondaires, de dimension hectométrique, recoupées par les galeries Principale et Ouest. Ces failles subverticales, avec un rejet vertical de 2 m (rejet horizontal de plus de 7 m), présentent un miroir et une brèche de faille argileuse large de 0,3 à 1 m de forme lenticulaire typique des failles décrochantes. La zone fracturée associée, large de 10-15 m, située à l'Ouest de la faille, présente des fractures avec remplissage de calcite.
- une fracturation mineure métrique à décimétrique « m », organisée en faisceaux, remplie de calcite, scellée ou drainante avec des cavités sous forme de géodes [153].

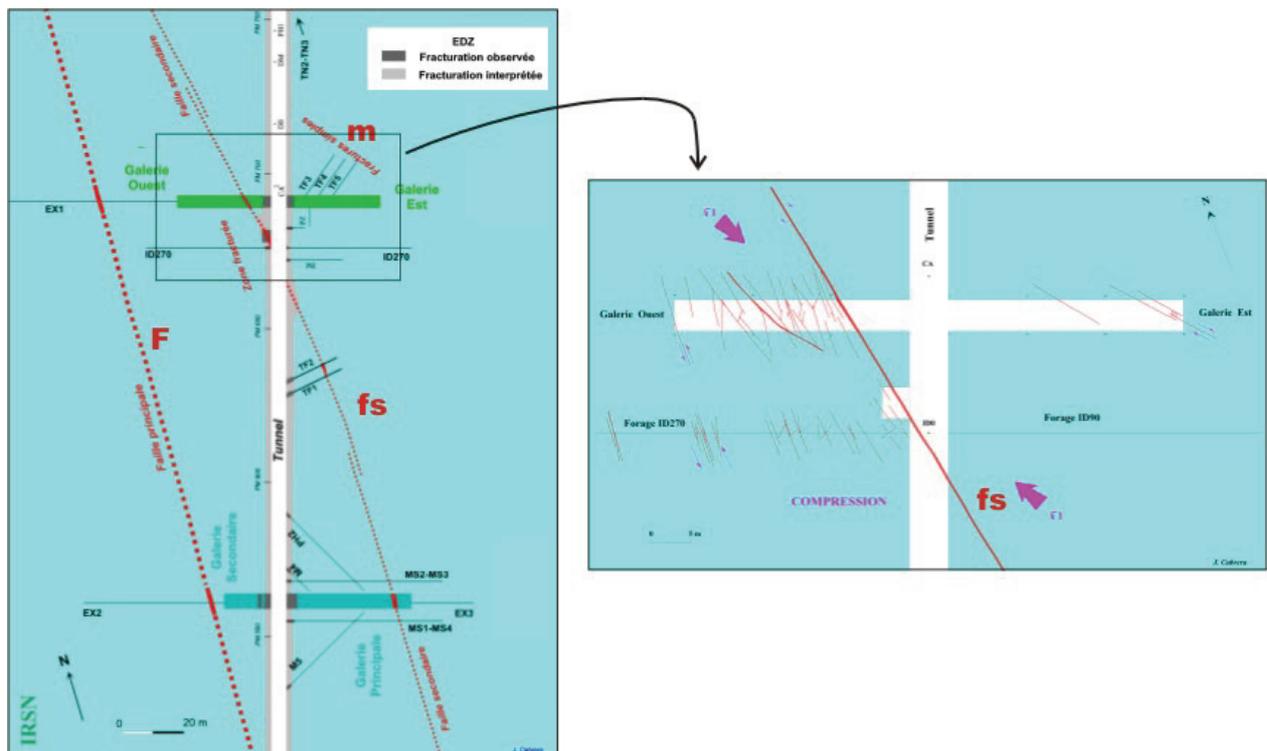


Figure T3-1 - Schéma structural simplifié des failles principale « F », secondaire « fs » et mineures « m » dans la partie centrale de la Station Expérimentale de Tournemire, et détail du cadre (secteur des galeries 96).

Le programme d'évaluation (2000-2002) a été réalisé par l'IRSN, avec la participation de la compagnie générale de géophysique (CGG), le bureau des recherches géologiques et minières (BRGM) et l'école des mines de Paris (EMP) ; il a comporté plusieurs phases décrites ci-dessous.

L'état de l'art sur la méthode a montré la nécessité d'adapter le dispositif à la détection de ce type de faille, en mettant en place une haute densité de points d'émissions et d'enregistrements, et en utilisant des fréquences

optimales. La simulation sismique 3D réalisée à partir du modèle géologique 3D de vitesses, construit à partir des données du site, a montré la possibilité de détecter ce type de failles dans des conditions géologiques idéales.

La campagne d'acquisition a été réalisée après définition du dispositif d'acquisition et du choix de paramètres au moyen de tests préliminaires sur le terrain. Le dispositif (fixe : une seule installation) appliqué sur une surface 0,5 km<sup>2</sup> comprend 13 lignes E-W de récepteurs (6 géophones, composant une « trace », tous les 10 m) et 20 lignes N-S sources équidistantes de 50 m. Une ligne complémentaire de 6 géophones dans les galeries (- 250 m) a mesuré les trajets directs. La source (camions vibrateurs) présente une gamme de fréquences de 14 à 140 Hz, limite supérieure de fréquence issue des tests de référence de la réponse du milieu.

Une première phase de traitement a concerné le filtrage de bruits linéaires, le traitement de l'amplitude des signaux, les corrections statiques primaires, les corrections dynamiques, l'ajustement du « Mute », les corrections statiques résiduelles et les migrations (DMO et temps), et un traitement additionnel par filtre 3 dimensions (filtre 3D FK). Les cartes et sections sismiques montrent la faille majeure N-S « F » dans la couche calcaire sous-jacente (Figures T3-2 et T3-3), mais pas dans la couche argileuse. La faille secondaire « fs » de la galerie Ouest n'est pas détectée. Le bruit sismique de surface altère les données de la couche calcaire sus-jacente.

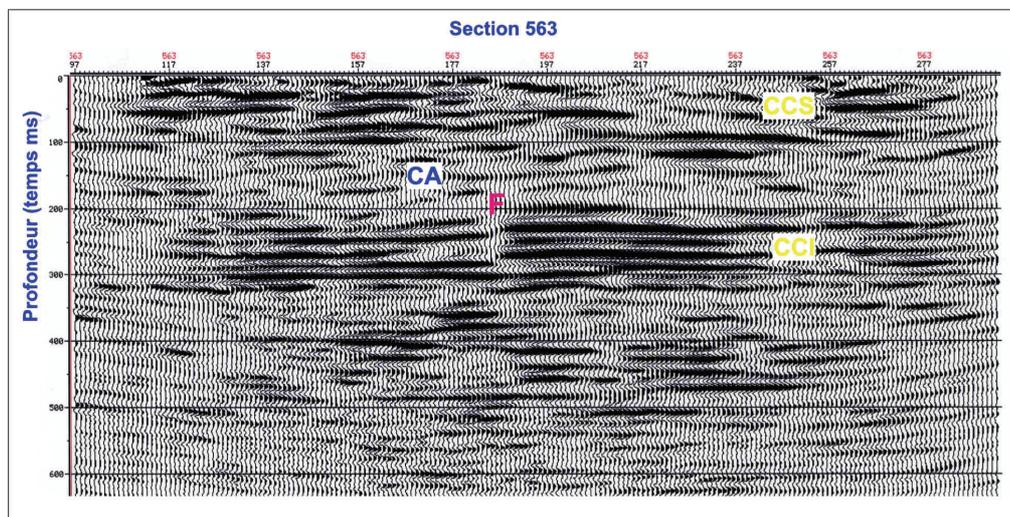


Figure T3-2 - Section sismique migrée 563, transversale au tunnel de Tournemire, montrant la faille majeure « F » dans la couche calcaire sous-jacente CCI. CCS : couche calcaire sus-jacente, CA : couche argileuse.

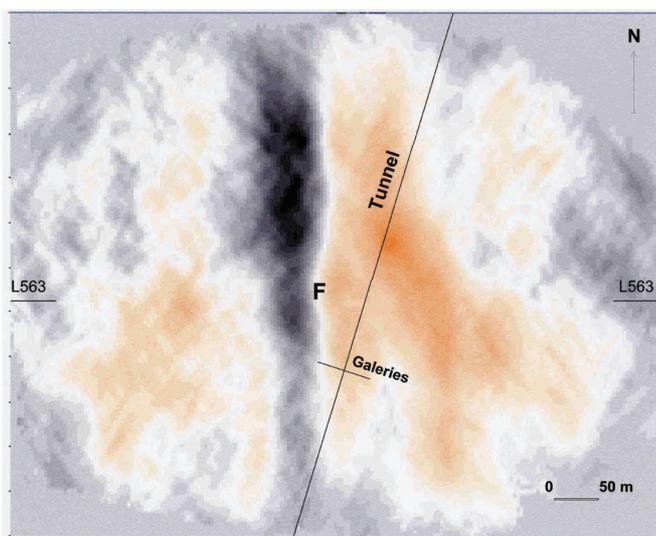


Figure T3-3 - Carte isochrone de la CCI : détection de la faille majeure « F ». Tracés du tunnel, des galeries 96 et de la section sismique 563 (cf. Figure T3-2).

Une phase de traitements spéciaux concerne l'interprétation sismique utilisant la méthode du « cube de cohérence » ou « semblance » et l'analyse de faciès sismiques, ainsi que l'étude de l'anisotropie azimutale autour des fractures. L'interprétation sismique (Figures T3-4 et T3-5) montre une amélioration de la détection des structures dans la couche calcaire sous-jacente (meilleure résolution) : la faille majeure N-S « F » et d'autres failles secondaires NW sont détectées. Par contre, ces failles ne sont pas identifiées au sein de la couche argileuse, excepté partiellement la faille « F » à l'interface entre les calcaires sous-jacents et la couche argileuse.

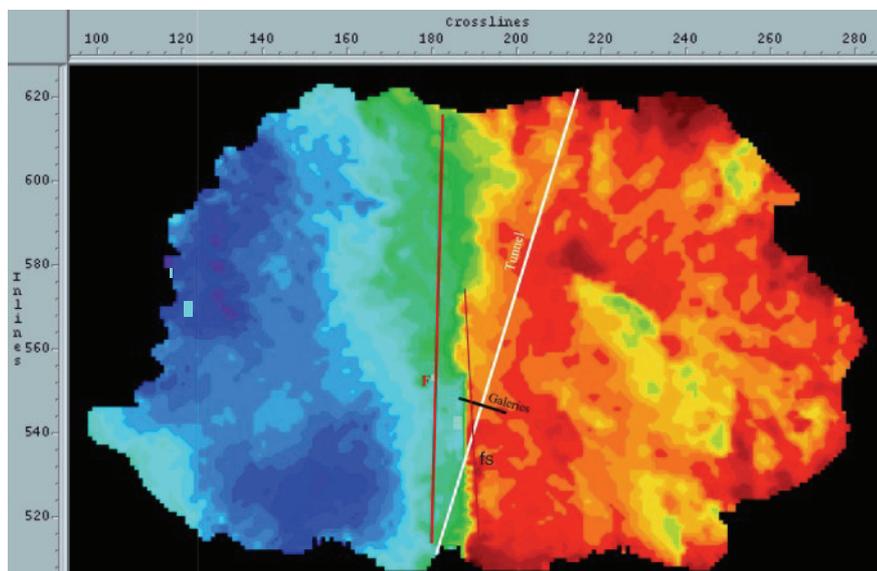


Figure T3-4 - Carte isochrone de la couche calcaire sous-jacente après traitements spéciaux. « F » : faille majeure, « fs » : faille secondaire des galeries Ouest et Principale.

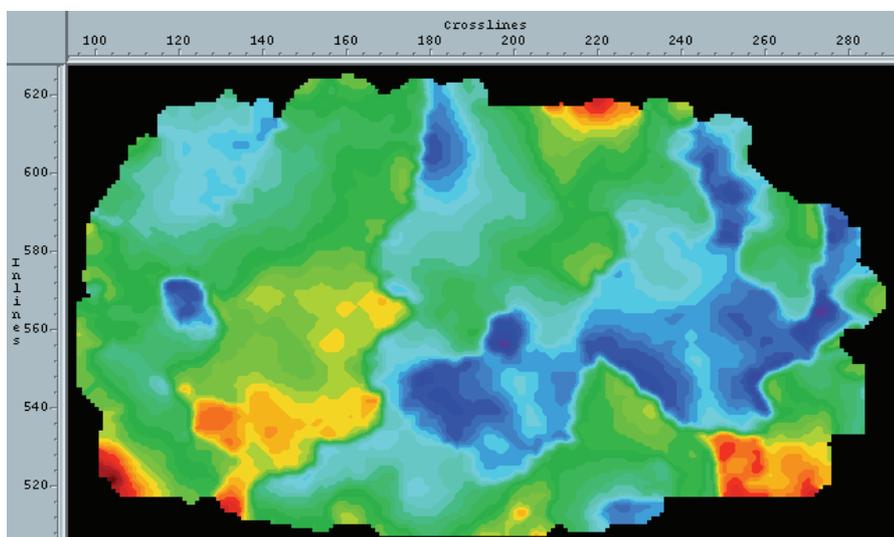


Figure T3-5 - Carte isochrone proche du toit de la couche argileuse qui montre l'absence de détection des failles.

Ainsi, dans l'état actuel des techniques d'acquisition et de traitement de sismique 3D, les failles décrochantes ou à décalage vertical inférieur ou égal à 2 m ne sont pas détectées dans les formations argileuses. Par conséquent, l'absence de détection des discontinuités au sein d'une couche argileuse par la sismique 3D n'exclut pas la présence de ce type de faille à faible décalage vertical.



## Annexe T4 - Hydrogéologie

### A - Paramètres hydrodynamiques des formations (d'après [5], [12], [14])

	Charges au niveau du site (m NGF)		Perméabilités secteur (m/s) (hormis Callovo-Oxfordien : site)		Transmissivités secteur (m <sup>2</sup> /s)		Coefficients d'emmagasinement spécifiques (m <sup>-1</sup> )	
Calcaires du Barrois	350	360	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-6</sup>	-	-	-	-
Kimméridgien (portions marneuses)	310	350	10 <sup>-12</sup>		-	-	-	-
Kimméridgien (portions calcaires)			2 10 <sup>-11</sup>	8 10 <sup>-11</sup>	3,4 10 <sup>-10</sup>	1,4 10 <sup>-9</sup>	-	-
Oxfordien	304	306	5 10 <sup>-10</sup>	2,9 10 <sup>-8</sup>	1,3 10 <sup>-7</sup>	7 10 <sup>-6</sup>	2 10 <sup>-7</sup>	5 10 <sup>-5</sup>
Callovo-Oxfordien	310	346	5 10 <sup>-14</sup>	5 10 <sup>-13</sup>	-	-	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-4</sup>
Dogger (Bathonien)	290	292	3 10 <sup>-9</sup>	4 10 <sup>-9</sup>	4,1 10 <sup>-9</sup>	8 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>

### B - Rôle hydraulique des failles

Le rôle hydraulique des failles régionales peut être interprété à partir des données géochimiques, isotopiques et piézométriques des aquifères, de la connaissance du champ de contraintes actuel, et des caractéristiques physiques connues des failles.

Pour ce qui concerne la **petite fracturation**, comme il a été noté dans le chapitre 2.2.2.3 du présent rapport, des incertitudes subsistent quant à la nature des connexions entre les horizons poreux, qui pourrait être structurale. La constance de la charge mesurée dans les différents niveaux à l'échelle du secteur constitue un indicateur de ces connexions. Par ailleurs, la simulation des rabattements induits par le fonçage des puits réalisée par l'IRSN nécessite pour la restitution de l'ensemble des données mesurées de postuler la présence de fractures hydrauliquement transmissives reliant plusieurs niveaux entre eux. La productivité importante mesurée au niveau du forage EST321 à l'Oxfordien (débit de 68 l/min sous environ 70 cm de rabattement, soit trois ordres de grandeur supérieur à la moyenne de la formation, et transmissivité globale égale à 3 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s), attribuable à des diaclases subverticales [16], tend à confirmer cette interprétation.

A propos des **failles de Gondrecourt**, l'IRSN considère que malgré l'orientation NNW du champ de contraintes actuel, il est peu probable que cette structure NE soit totalement fermée, les contraintes ne permettant probablement pas de fermer les zones broyées les plus larges. Ceci est, selon l'IRSN, appuyé par les résultats obtenus dans le forage EST331 (situé à 250 m de la faille bordière ouest de Gondrecourt, qui présente de faibles valeurs de conductivité et de salinité et une charge élevée à l'Oxfordien suggérant une venue d'eau de Gondrecourt) ainsi que dans le forage pétrolier Lèzeville 1 (situé dans le caisson de failles de Gondrecourt, et qui a subi des pertes totales dans les calcaires de l'Oxfordien au passage de niveaux peu cimentés, poreux, perméables et localement fissurés et fracturés, et dans les calcaires du Dogger au passage d'une zone fissurée). L'IRSN considère donc qu'un rôle hydraulique des failles de Gondrecourt ne peut pas être exclu.

Pour ce qui concerne la **zone de fracturation diffuse Marne-Poissons**, l'IRSN note plusieurs indicateurs de circulations verticales et horizontales dans les niveaux sus-jacents. Tout d'abord, à toutes les échelles, les fractures ouvertes, karstifiées ou tapissées de calcite ou d'argiles ont une orientation préférentielle NW [90]. Les résultats d'une expérience de traçage réalisée par l'ANDRA en 1999 (fluorescéine injectée dans le bois de Trampot, situé dans le prolongement de la zone diffuse Marne-Poissons à l'est des structures Gondrecourt, ressortie à la source du Rongeant, située dans cette zone diffuse) pourraient être interprétés par une circulation

horizontale rapide dans la zone diffuse Marne-Poissons. Dans cette même zone, les analyses géochimiques (chapitre 2.2.4.1.3 du présent rapport) semblent indiquer la présence probable de connexions verticales, d'une part entre les calcaires du Barrois et de l'Oxfordien, et d'autre part entre l'Oxfordien et le Dogger. En effet, la signature d'eau de surface relevée dans l'Oxfordien des forages EST321 et EST351 suggère, selon l'IRSN, des échanges possibles via des fractures entre l'Oxfordien et la surface. De même, la composition isotopique des eaux du Dogger du forage EST322, se situant dans le domaine des eaux de l'Oxfordien (à l'échelle du secteur), indique une interaction entre les deux aquifères. Les gradients étant ascendants au niveau des forages EST321 et EST322, l'explication possible selon l'IRSN est (1) une circulation provenant des aires d'affleurement situées au SE ou d'une infiltration verticale depuis la surface, par les failles de la zone diffuse Marne-Poissons ou de Gondrecourt, dans la zone de gradient descendant, puis (2) une circulation horizontale rapide dans les bancs calcaires par la zone diffuse Marne-Poissons.

L'IRSN estime que les **failles de la Marne**, d'orientation NW, se trouvent également probablement dans une zone de circulation préférentielle de fluides, comme semblent montrer les pertes totales entre les calcaires du Barrois et le Callovo-Oxfordien des forages pétroliers Chevillon 1, Bienville 1 et Sommellone 4. De plus, la décroissance des charges hydrauliques de l'Oxfordien à l'approche des failles de la Marne indique un drainage probable de ces failles.

Ces interprétations concernant le rôle hydraulique des failles sont confortées par les modélisations réalisées par l'IRSN, qui montrent, comme cela est décrit dans la présente annexe (cf. partie D de la présente Annexe), qu'il est possible de reproduire les champs de charge mesurés en faisant intervenir une hétérogénéité des écoulements contrôlée par les fractures et les failles (Gondrecourt, Marne, Joinville, Poissons...).

Ainsi, pour ce qui concerne la caractérisation du rôle hydraulique des failles, l'IRSN estime que des premières hypothèses peuvent être émises, notamment sur le rôle drainant :

- de la zone de fracturation diffuse Marne-Poissons, verticalement entre la surface et l'Oxfordien et localement entre l'Oxfordien et le Dogger, et horizontalement dans l'Oxfordien et dans le Dogger ;
- des failles de Gondrecourt, au moins entre la surface et l'Oxfordien ;
- des failles de la Marne entre la surface et l'Oxfordien.

C - Simulations piézométriques effectuées par l'ANDRA

CALAGES ET ANALYSE DE SENSIBILITÉ AU RÔLE HYDRAULIQUES DES FAILLES EFFECTUEE PAR L'ANDRA																
Analyse de sensibilité par rapport au calage 2003 *																
Calages																
	Calage 2004 *		Calage 2003 **		Test 1		Test 2		Test 3		Test 4		Test 5		Test 6	
	Oxfordien	Dogger	Oxfordien	Dogger	Oxfordien	Dogger	Oxfordien	Dogger	Oxfordien	Dogger	Oxfordien	Dogger	Oxfordien	Dogger	Oxfordien	Dogger
MSE101	4,3	-10,8	1,3	-16,1	-3,3	-16,3	6,1	-9,1	-3,6	-16,2	6,4	-9,1	-3,6	-16,3	6,4	-8,9
EST103	-5,9		0,1		-7,0		-4,4		-7,4		-4,5		-7,4		-4,5	
HTM102	-2,2	-4,2	3,3	-1,8	-3,7	-2,0	-2,4	3,5	-3,9	-1,9	-2,5	3,5	-3,9	-2,0	-2,5	3,6
EST311/312	7,3	-10,9	2,2	1,9	2,2	1,9	2,2	4,0	2,2	1,9	2,2	4,0	2,2	1,3	2,2	4,1
EST321/322	-5,5	7,2	2,6	3,1	-25,2	2,9	-15,4	11,4	-26,2	2,9	-16,0	11,4	-26,2	2,9	-16,0	11,6
EST331	7,9		6,2		1,0		2,0		0,9		1,9		0,9		1,9	
EST342	35,3	7,2	7,8	0,9	7,9	0,8	25,0	7,7	8,4	0,9	24,0	7,7	8,4	1,2	24,0	7,6
EST351	-8,3		10,2		-7,1		1,0		-8,0		0,9		-8,0		0,9	
Ecart moyen	9,6	8,1	4,2	4,8	7,2	4,8	7,3	7,1	7,6	4,8	7,3	7,1	7,6	4,7	7,3	7,2
Poissons : réseau de failles N140																
Gondrecourt	étanche (Q nul)		étanche (Q nul)		transparente		étanche									
Joinville	étanches (Q nul)		étanches (Q nul)		étanches											
Marne	active (T*100)		active (T*100)		active		transparente		active		transparente		active		transparente	
Zone de fracturation sub-sismique	initiale /		initiale /		initiale		initiale		réduite		réduite		réduite		réduite	
* [104]	Oxfordien													Dogger		
**[103]	Oxfordien													Dogger		
	Modifications des paramètres															

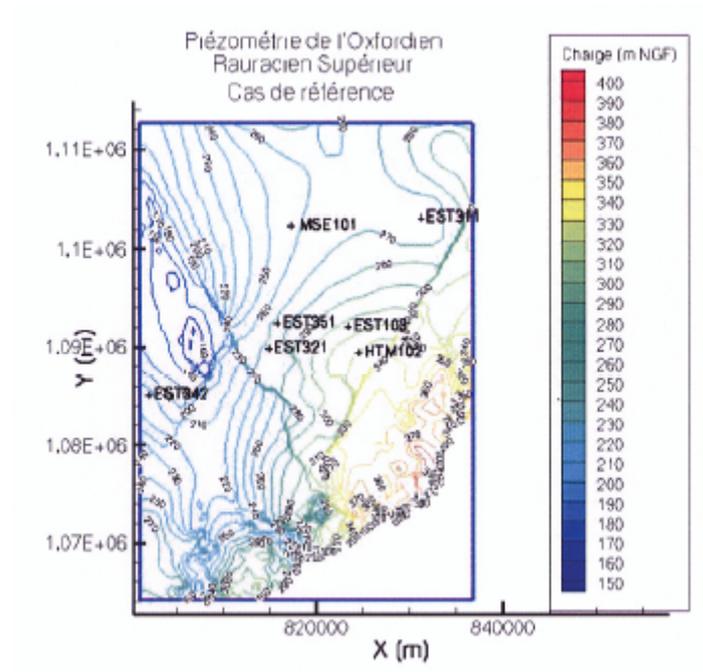


Figure T4-1 - Piézométrie simulée de l'Oxfordien avec la faille de Poissons en barrière hydraulique [104].

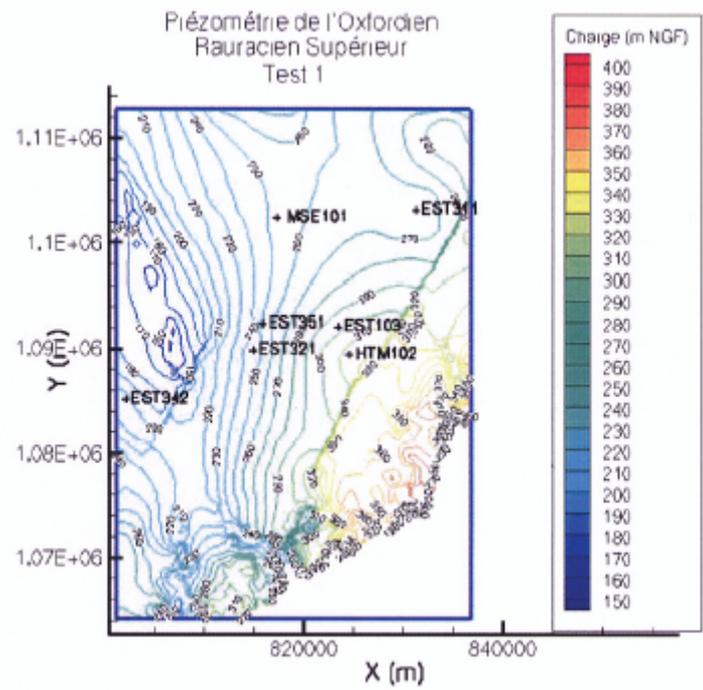


Figure T4-2 - Piézométrie simulée de l'Oxfordien avec la faille de Poissons « transparente » [104].

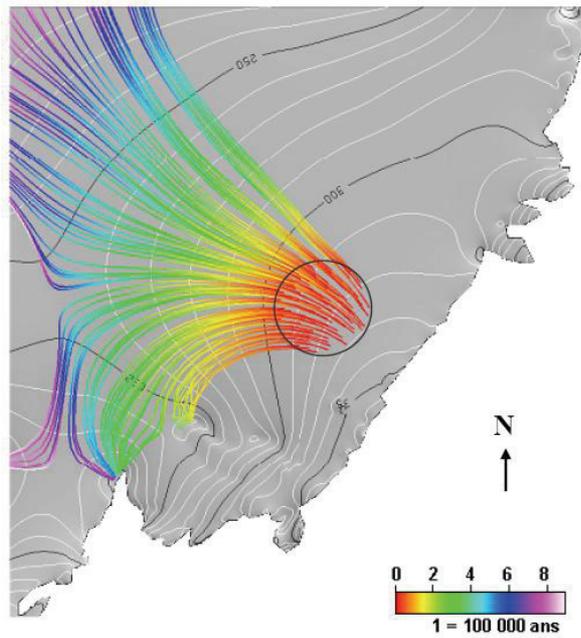


Figure T4-3 - Trajectoires et isopièzes dans l'Oxfordien calcaire (situation actuelle) [109].

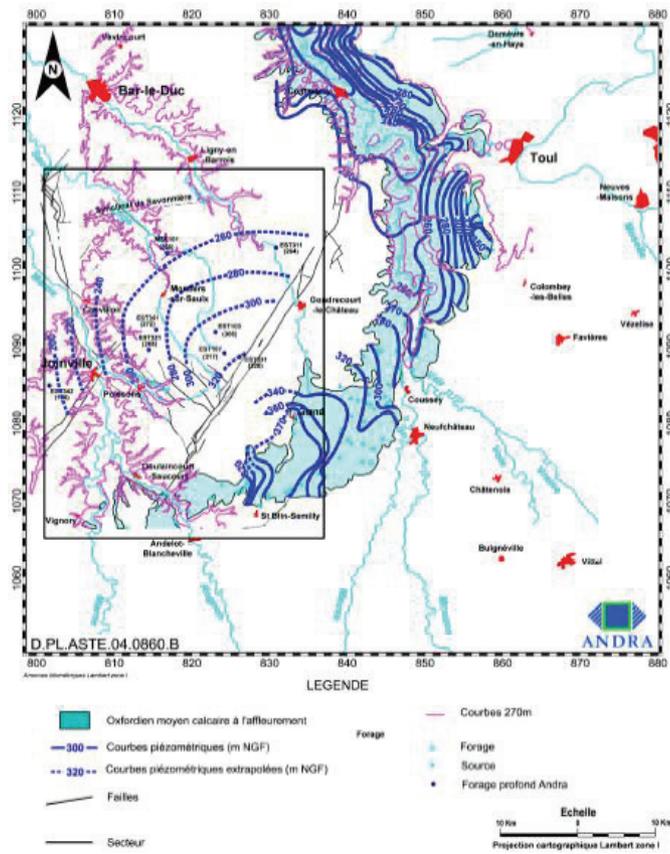


Figure T4-4 - Esquisse piézométrique de l'Oxfordien [5].

#### D - Modélisations hydrogéologiques réalisées par l'IRSN

Le modèle hydrogéologique pseudo-3D de l'IRSN a été réalisé à l'aide du code NEWSAM (Ecole des Mines de Paris), permettant la simulation des écoulements et du transport convectif en régime permanent ou transitoire, à deux échelles différentes. Un modèle « régional » a servi au calage simultané en charge et salinité de l'ensemble du bassin parisien, ainsi qu'au calage plus précis des charges mesurées dans les forages ANDRA réalisés dans le secteur. Un modèle « local », plus finement discrétisé verticalement et horizontalement a servi :

- à préciser la localisation potentielle des exutoires situés à l'échelle du secteur, et à déterminer leurs temps de transfert convectifs associés,
- à modéliser les contextes géoprospectifs,
- à simuler les rabattements liés au fonçage des puits.

Le modèle régional comporte 23 couches, alternance d'horizons aquifères et semi-perméables allant de la Craie au Trias (Buntsandstein), avec des mailles comprises entre 10 km et 625 m. Le modèle local tire directement ses conditions aux limites du modèle régional. Les paramètres pétrophysiques imposés en tout point du modèle sont de même issus du calage réalisé à l'aide du modèle régional. Ce modèle à plus petite échelle consiste donc en un zoom du modèle régional (cf. Figure T4-5), avec une rediscrétisation horizontale (mailles comprises entre 2,5 km et 5 m, afin de représenter le diamètre des puits), et une rediscrétisation verticale de l'Oxfordien en 17 couches (afin de représenter les horizons poreux - Hp7 à Hp1a - reconnus à l'échelle du laboratoire), et du Callovo-Oxfordien en 14 couches (afin de représenter les galeries et les différents horizons individualisés par l'ANDRA au niveau du laboratoire). Le modèle local comporte au total 42 couches allant du Portlandien au Rhétien.

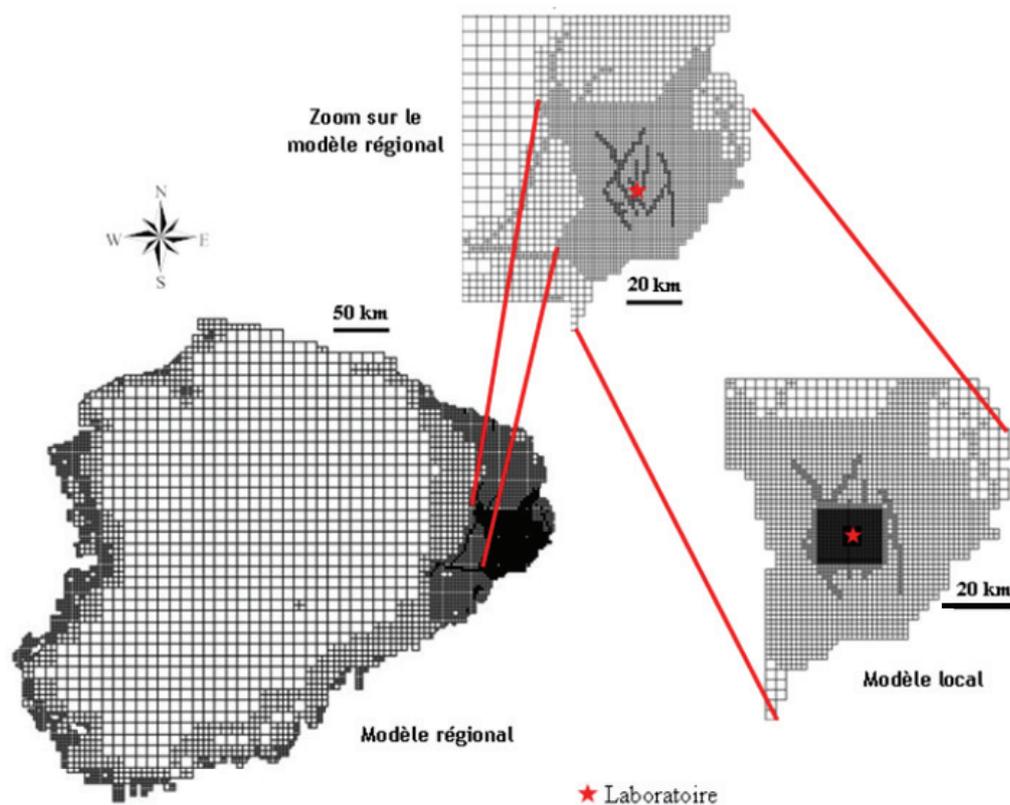


Figure T4-5 - Exemple de maillages - Formation du Callovo-Oxfordien.

### Résultats du calage en charge et en salinité

Une alimentation d'origine météorique est imposée sur l'ensemble des affleurements des formations aquifères, et une condition de drain (potentiel imposé avec capacité d'absorption ou de délivrance d'un débit illimité, sans modification de la charge hydraulique) est appliquée sur les affleurements et les rivières. La limite nord-ouest, représentant la Manche, est en condition de potentiel imposé.

Certaines grandes failles régionales sont représentées (i.e. Bray-Vittel, Metz...) ainsi que celles localisées au niveau du secteur de Meuse/Haute-Marne : failles de la Marne, Joinville, Gondrecourt, et faisceau de failles de Poissons. À ces dernières ont été affectées, dans l'Oxfordien et le Dogger, des transmissivités horizontales comprises entre  $10^{-6}$  et  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Des transmissivités verticales dans ces failles ont aussi été prises en compte au travers des formations semi-perméables.

Une première modélisation avait été réalisée par l'IRSN en 2002. L'IRSN a depuis été amené à modifier certaines hypothèses de modélisation :

- une modélisation simple montre que l'aquifère du Trias profond, principale source de sel retenue alors, verrait le sel disparaître entre 500 ka et 1 Ma sans alimentation externe : la seule source pérenne existante est constituée par le sel massif du Keuper, lessivé par les aquifères profonds. La modélisation du transport de sel couplé à l'écoulement présentée ici retient comme seule source de sel une concentration à saturation au niveau de cette formation ;
- il est nécessaire de tenir compte des effets densitaires dans la résolution du transport couplé à l'écoulement, afin de prendre en compte la présence de halite pure en quantité importante dans les formations du Trias, qui génère des saumures proches de la saturation en sel et provoque des variations de densité du fluide pouvant atteindre 25 %. Les effets de la température sur la variation de la masse volumique ont aussi été pris en compte ;
- des études réalisées par le BRGM montrent de plus que la faille de Bray-Vittel traverse le dôme de Songy : l'IRSN a retenu une structure conductrice pour cette faille dans les formations du Keuper gréseux et du Muschelkalk.

Par ailleurs l'IRSN a réalisé un recensement et une analyse des mesures effectuées dans les forages pétroliers à l'échelle du bassin de Paris. La base de données BPDATA obtenue a permis de reconstituer la répartition des salinités à cette échelle.

La modélisation présentée ici a permis de retrouver un calage en charge et en salinité satisfaisant à l'échelle régionale. Les charges simulées sont relativement bien calées par rapport aux mesures ; cependant, les très faibles salinités mesurées dans le Dogger sur le secteur n'ont pu être reproduites. Les Figures T4-6 et T4-7 ci-dessous indiquent, à titre d'exemple, les résultats obtenus pour l'aquifère du Bathonien à l'échelle régionale, en terme de répartition des charges et de la salinité.

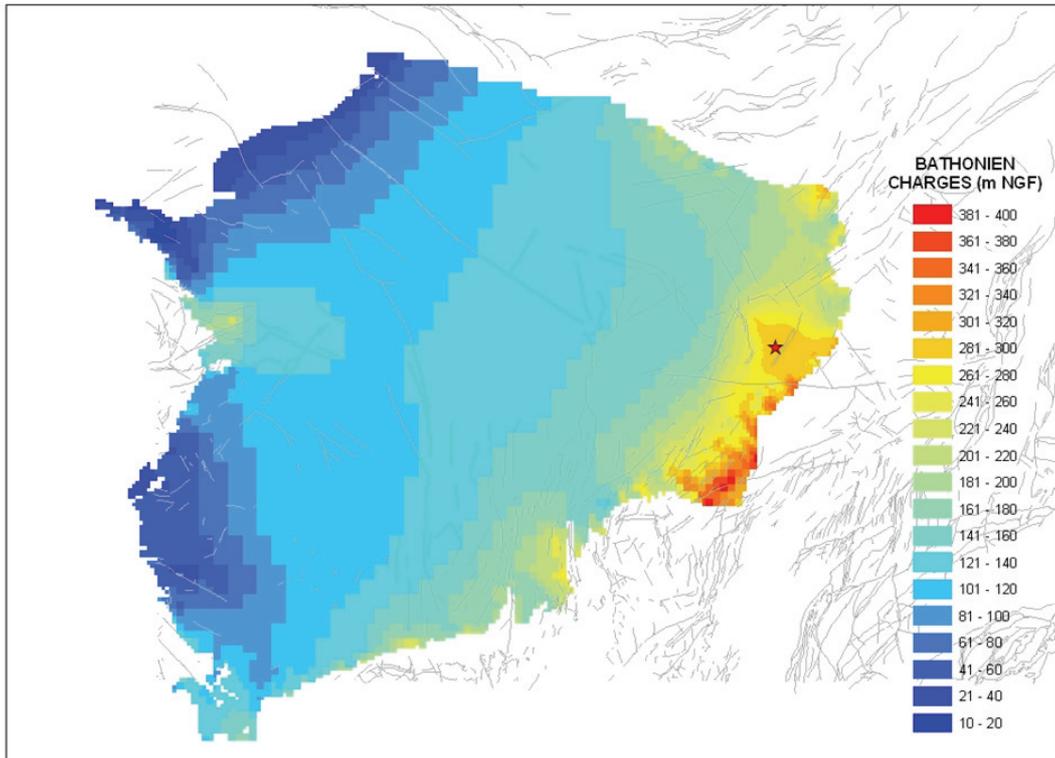


Figure T4-6 - Calage en charge obtenu pour le Bathonien, à l'échelle régionale.

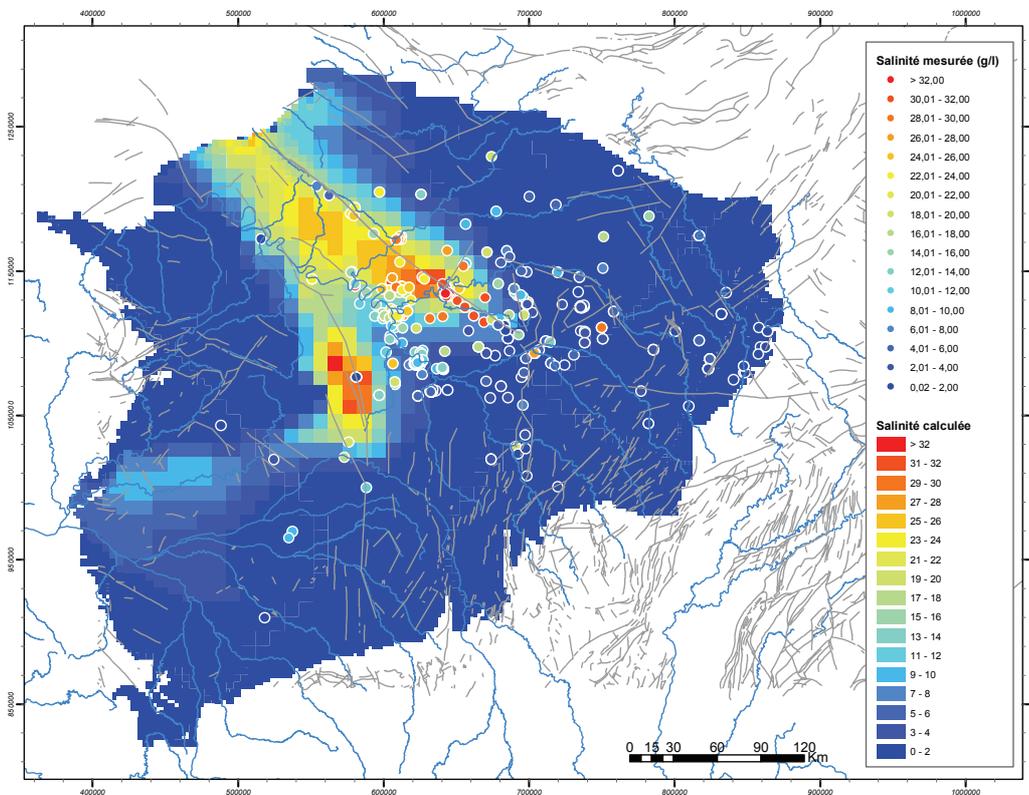
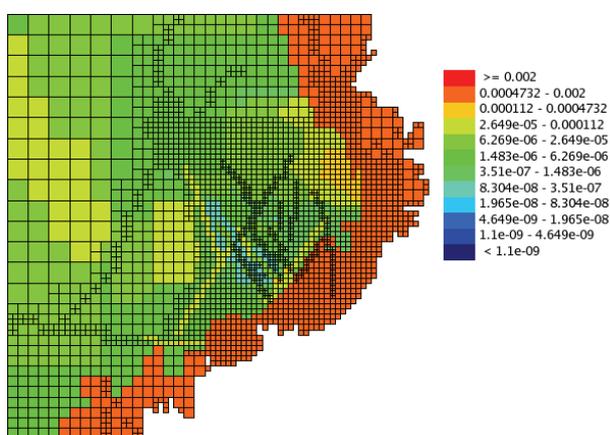


Figure T4-7 - Exemple de salinités obtenues dans le Bathonien, à l'échelle régionale.

Le calage des charges de l'Oxfordien et du Bathonien à l'échelle du secteur a été réalisé avec le modèle régional. Pour le calage du Dogger, deux cas de figure ont été testés pour obtenir les charges observées dans la zone nord du secteur, le premier avec la présence de structures locales transmissives, notamment une faille NW située dans l'axe de la rivière de la Saulx, et le second avec l'hypothèse de failles locales quasiment inexistantes, mais avec une extension de la zone transmissive proche des affleurements du Bajocien et la présence d'une zone de faible perméabilité du Dogger dans la partie Est du secteur. La modification de la zone d'affleurement du Bajocien est, pour l'IRSN, consistante avec les observations de terrain qui montrent que cette formation est plus karstifiée à l'affleurement que celle du Bathonien (l'extension de cette zone n'a pour l'instant pas fait l'objet d'ajustements particuliers).

Les paramètres hydrodynamiques utilisés pour le calage sont fournis dans les Figures T4-8 à T4-10 ci-dessous. Il s'agit d'un zoom sur le modèle régional.

Transmissivités (m<sup>2</sup>/s) - Formation de l'Oxfordien



Transmissivités verticales de failles (m<sup>2</sup>/s)  
Formation du Callovo-Oxfordien

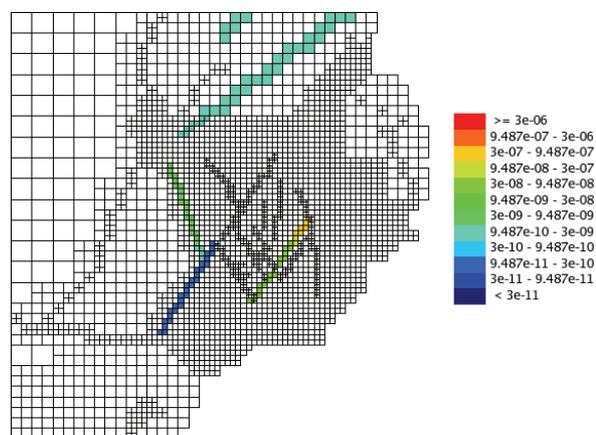
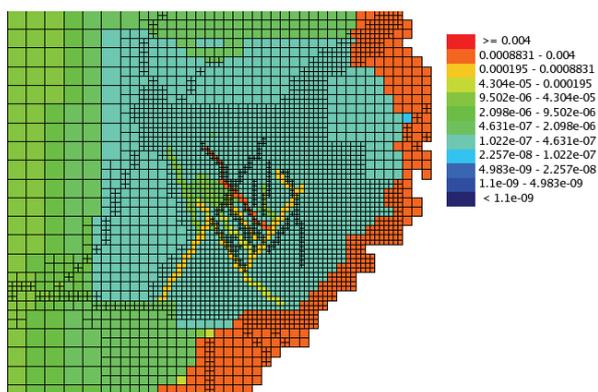


Figure T4-8 - Paramètres de l'Oxfordien et du Callovo-Oxfordien - Cas 1 et 2.

Transmissivités (m<sup>2</sup>/s)  
Formation du Bathonien - cas 1



Transmissivités (m<sup>2</sup>/s)  
Formation du Bajocien - cas 1

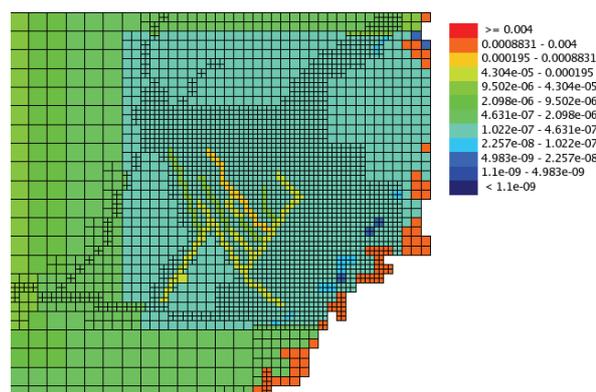
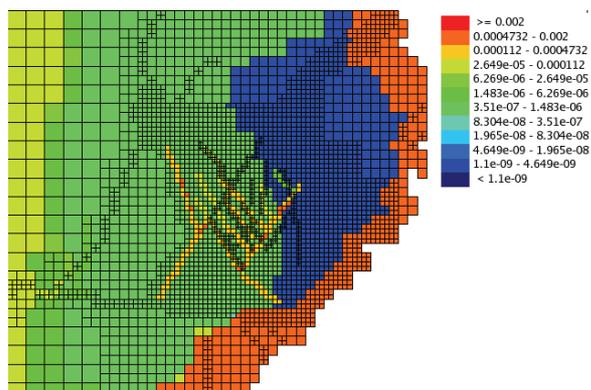


Figure T4-9 - Paramètres du Dogger - Cas 1.

Transmissivités (m<sup>2</sup>/s)  
Formation du Bathonien - cas 2



Transmissivités (m<sup>2</sup>/s)  
Formation du Bajocien - cas 2

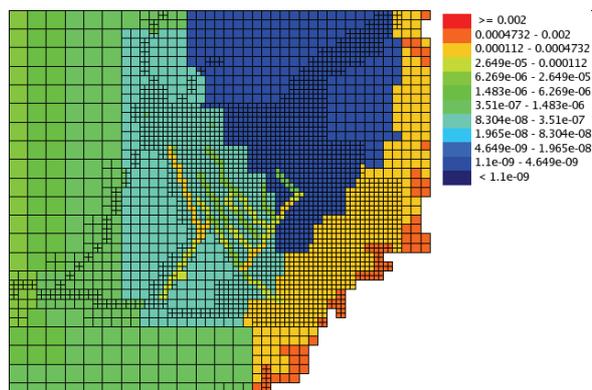


Figure T4-10 - Paramètres du Dogger - Cas 2.

La comparaison des charges simulées et mesurées est présentée ci-dessous dans les Tableaux T4-1 et T4-2. Les cartes piézométriques simulées sont similaires pour l'Oxfordien (Figure T4-11) et diffèrent légèrement pour le Bathonien (surtout dans les zones proches des affleurements - cf. Figure T4-12 et Figure T4-13). Pour comparaison, les valeurs indiquées par les points rouges correspondent aux valeurs mesurées dans les forages ANDRA.

CAS 1	Charge Oxfordien (m NGF)			Charge Dogger (m NGF)		
	Mesurée	Calculée	Écart	Mesurée	Calculée	Écart
MSE101	256	256	0	286	286	0
EST103	304	309	5			
HTM102	317	313	-4	289	289	0
EST311/312	264	263	-1	292	292	0
EST321/322	268	267	-1	272	272	0
EST331	320	321	1			
EST342	196	196	0	251	250	-1
EST351	273	275	2			
Écart moyen			1,75 m			0,2 m

Tableau T4-1 - Calage en charge obtenu avec les hypothèses du cas 1 dans le Dogger.

CAS 2	Charge Oxfordien (m NGF)			Charge Dogger (m NGF)		
	Mesurée	Calculée	Écart	Mesurée	Calculée	Écart
MSE101	256	256	0	286	286	0
EST103	304	309	5			
HTM102	317	315	-2	289	294	5
EST311/312	264	263	-1	292	292	0
EST321/322	268	267	-1	272	274	2
EST331	320	321	1			
EST342	196	196	0	251	246	-5
EST351	273	275	2			
Écart moyen			1,5 m			2,4 m

Tableau T4-2 - Calage en charge obtenu avec les hypothèses du cas 2 dans le Dogger.

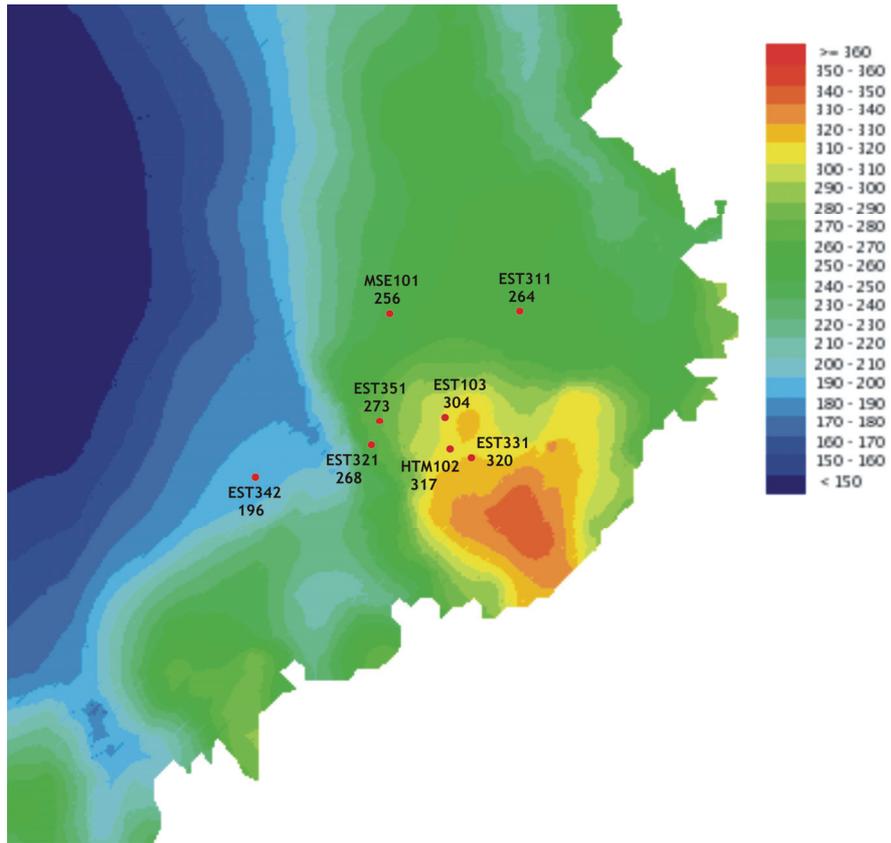


Figure T4-11 - Charges calculées - Oxfordien.

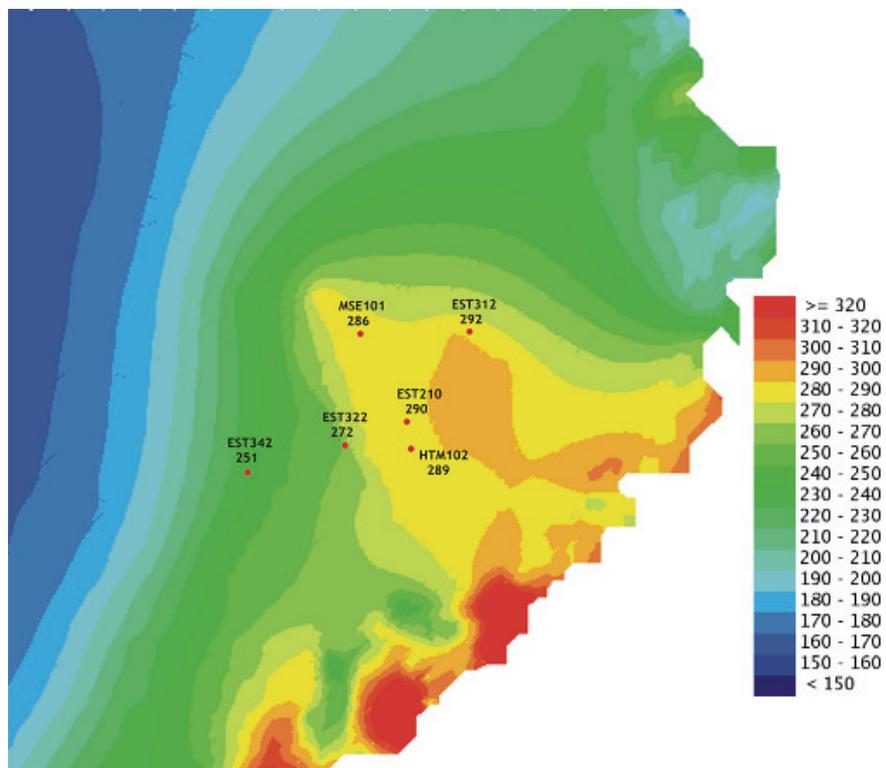


Figure T4-12 - Charges calculées - Dogger - Cas 1.

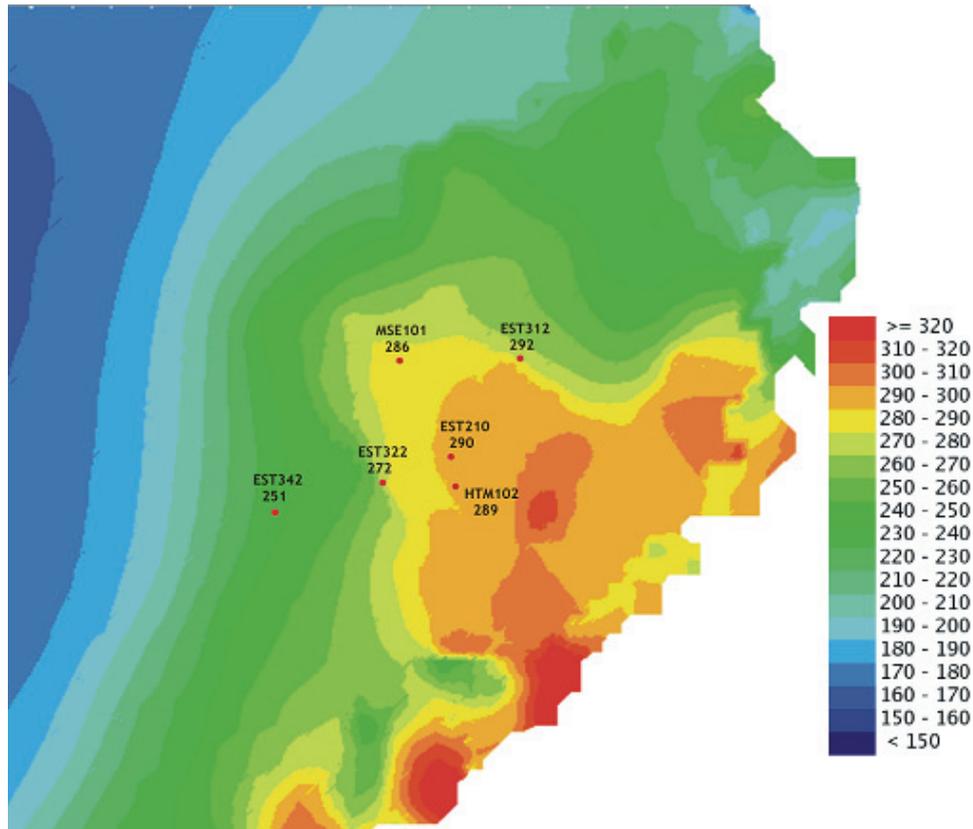


Figure T4-13 - Charges calculées - Dogger - Cas 2.

#### Simulation du transfert de solutés - Situations actuelle et géoprospective

Les simulations du transfert de soluté ont été réalisées à l'aide du modèle local, en imposant des concentrations sur diverses zones, au toit et au mur du Callovo-Oxfordien. Le Modèle Numérique de Terrain défini sur cette zone (Figure T4-14) a permis de préciser les conditions aux limites hydrauliques aux affleurements, notamment sur les cours des rivières. Sur la Figure T4-14 sont également représentés le maillage du Portlandien, l'emplacement d'une bande d'injection du traceur correspondant aux résultats présentés dans les figures ci-après, ainsi que la position du laboratoire. Ainsi, pour les formations sus-jacentes au Callovo-Oxfordien, une concentration d'environ  $2 \cdot 10^4$  (unité arbitraire) a été imposée sur une bande de 5 km, à 2 km au nord du laboratoire.

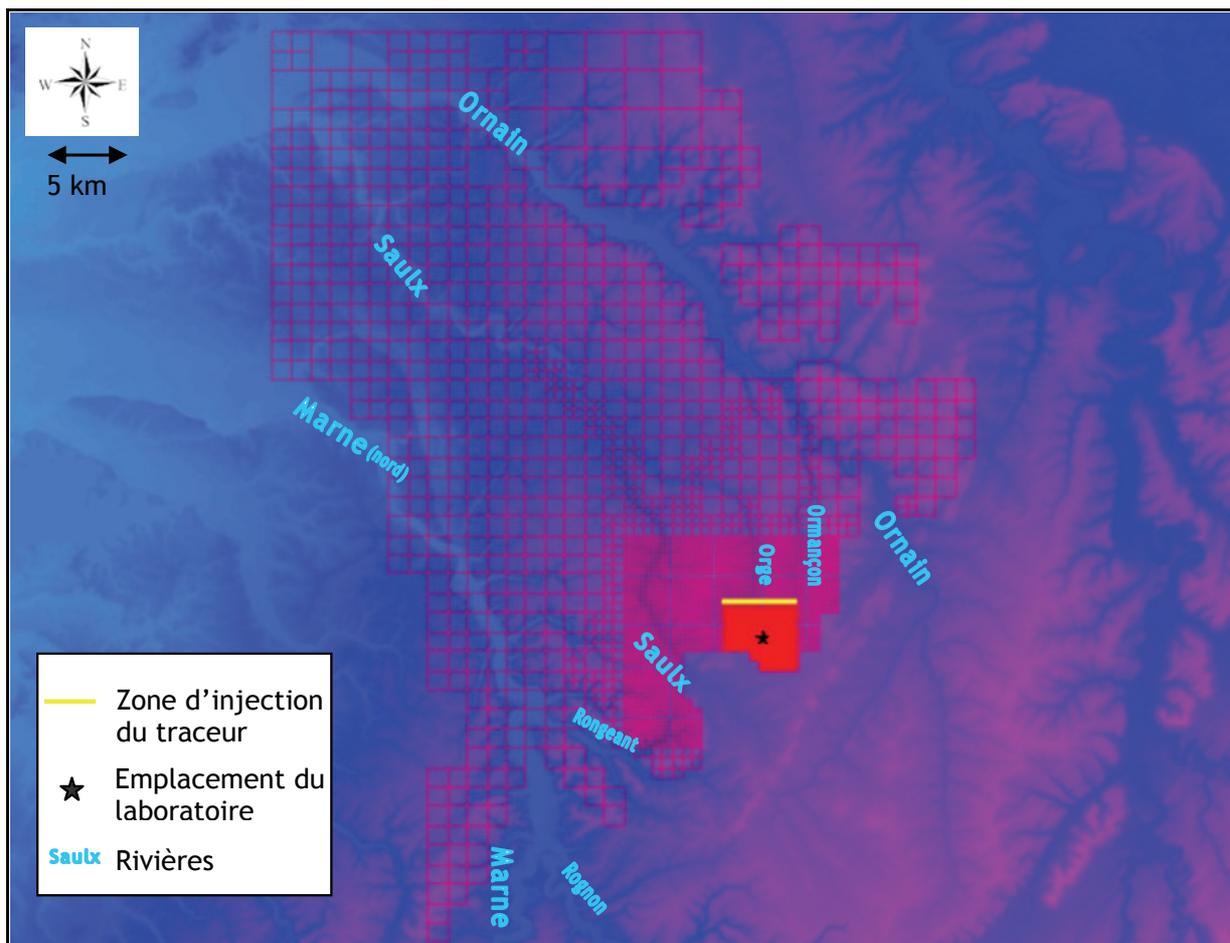


Figure T4-14 - MNT utilisé pour la reconstitution de la surface topographique actuelle du Portlandien.

Il est important de noter que les exutoires naturels du Portlandien atteints par le soluté, et le temps de transfert associé, dépendent de l'emplacement choisi pour l'injection. Dans le cas particulier d'une injection constante appliquée dans l'Oxfordien sur une maille unique à l'aplomb du laboratoire, l'exutoire se situe dans plusieurs mailles dans la partie nord de la Marne, associé à un temps moyen de transfert de 600 ka et un temps de transfert minimal de 450 ka. Pour une injection du même type dans le Dogger, l'exutoire atteint se situe au nord de la confluence de la Marne et du Rongeant, associé à un temps de transfert moyen de 2 Ma.

Pour ce qui concerne la simulation des contextes géoprospectifs, celle-ci a été réalisée sur 1 Ma, par phases de 100 000 ans, comprenant chacune une surrection homogène de 10 m, une érosion générale des plateaux comprise entre 1 et 5 m, et une incision des rivières comprise entre 1 et 15 m. Ces deux dernières données sont issues des valeurs fournies par l'ANDRA en Figure 2 du document [109]. Afin de comparer les résultats obtenus entre le modèle hydrogéologique représentatif du contexte actuel, et celui du scénario géoprospectif, l'injection du traceur se fait dans le même niveau de l'Oxfordien, également sur la bande de 5 km localisée au nord du laboratoire, en continu dès le début de la simulation des modifications géodynamiques. Les résultats obtenus, en termes d'exutoire naturel dans le Portlandien, sont présentés dans la Figure T4-15. La Figure T4-16 montre l'évolution du panache dans l'horizon Hp1a de l'Oxfordien, dans le cadre du contexte hydrogéologique actuel.

Ces résultats montrent que le panache s'étend relativement rapidement dans l'Oxfordien en se dirigeant vers l'Ouest et le Nord-Ouest. Les exutoires naturels dans le Portlandien sont fortement affectés par l'évolution géoprospective simulée. La Saulx, comprenant son affluent l'Orge, devient l'exutoire prépondérant, dès 500 ka, au détriment de celui constitué par la Marne et de son affluent le Rongeant. Par ailleurs, dès 200 ka, apparaît un exutoire dans l'Ormain, comprenant son affluent l'Ormançon (cf. Figure T4-14).

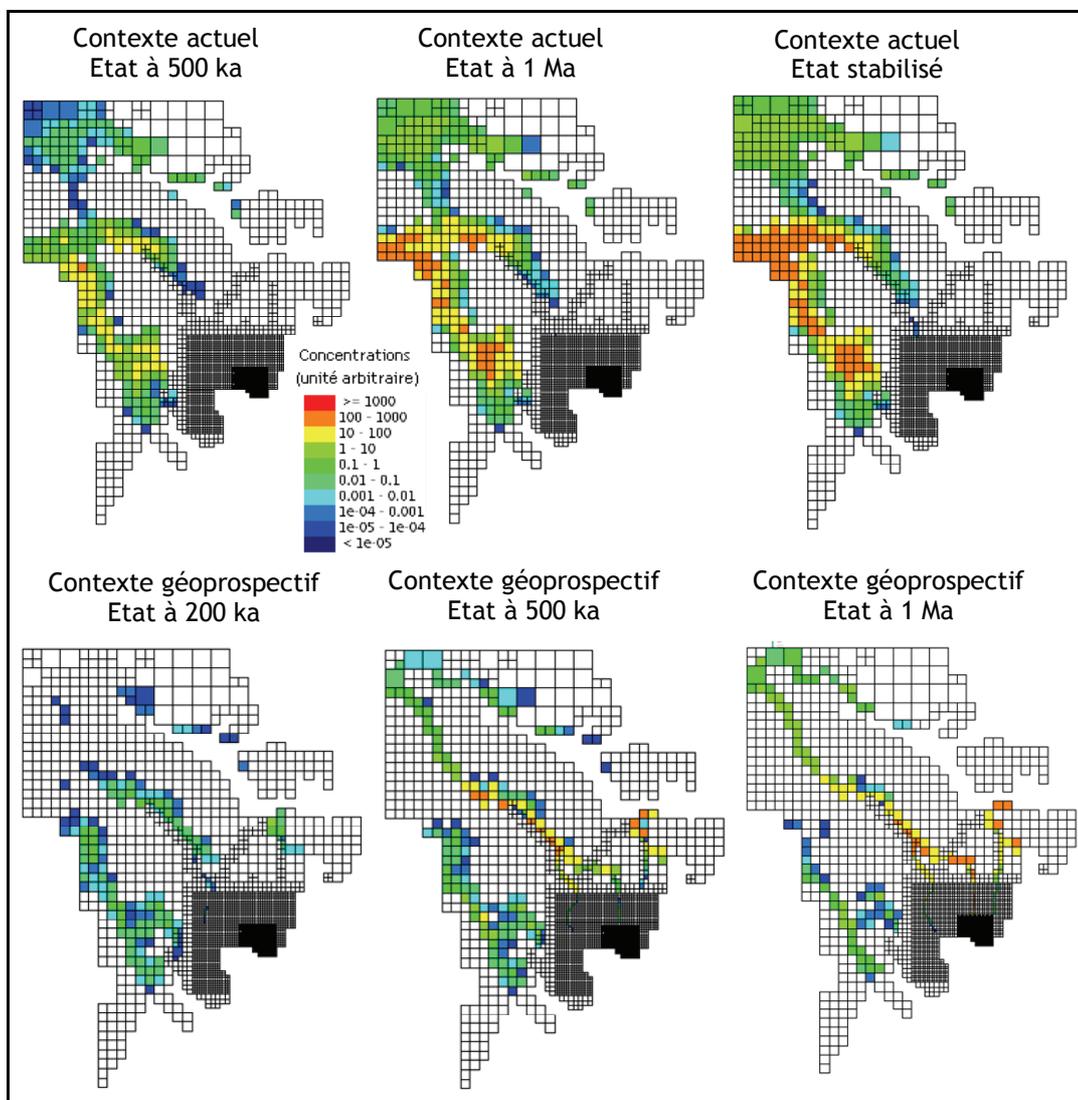


Figure T4-15 - Concentrations obtenues dans le Portlandien pour une injection constante d'environ  $2 \cdot 10^4$  (unité arbitraire).

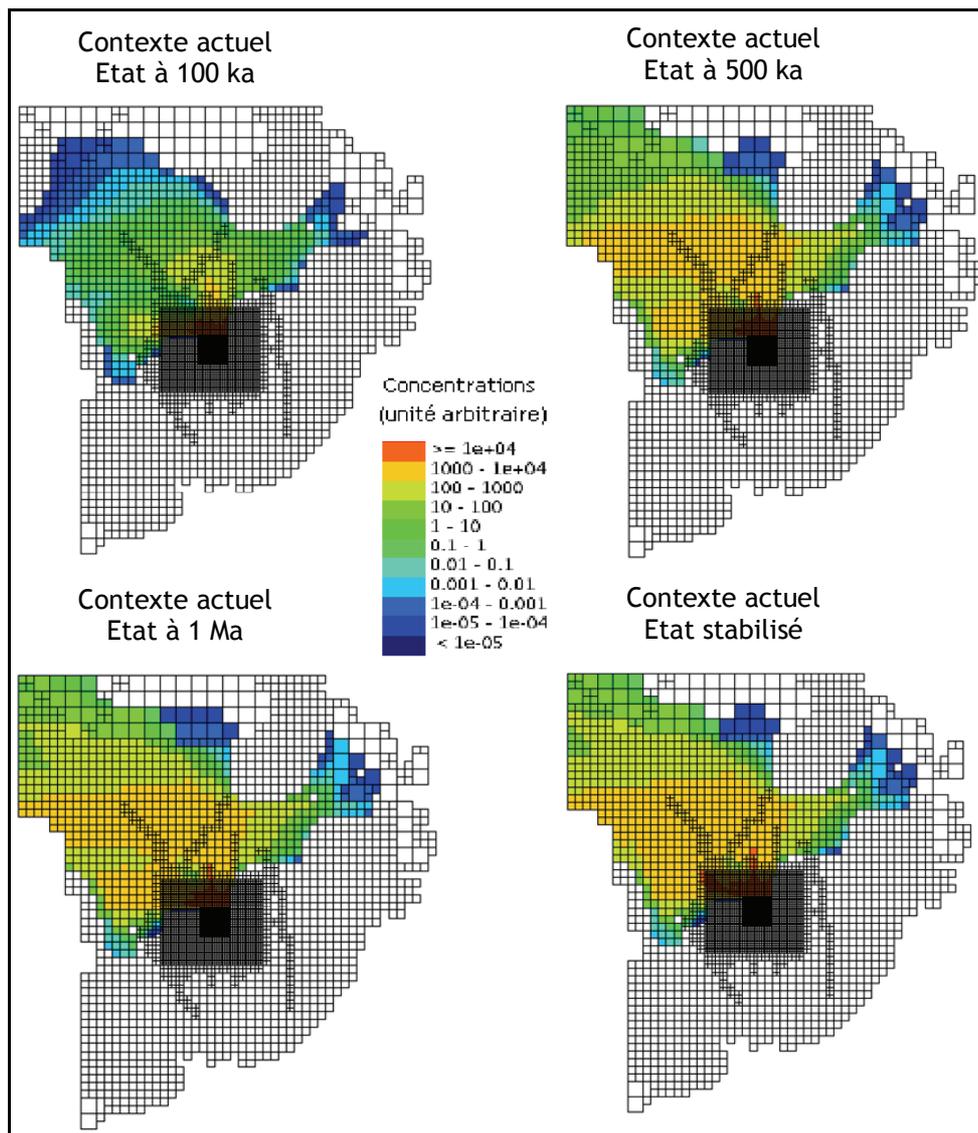


Figure T4-16 - Simulation, dans le contexte hydrogéologique actuel, de l'étendue du panache dans l'Oxfordien pour une injection constante d'environ  $2 \times 10^4$  (unité arbitraire).

#### Simulation de la perturbation hydraulique induite par le forçage des puits

Les simulations d'impact du creusement des puits ont été effectuées à l'aide du modèle local, en régime transitoire au pas de temps journalier. Les conditions journalières imposées sont des cotes de drainage (exprimées en m NGF) dans les mailles correspondant aux puits principal et auxiliaire selon le principe itératif suivant : cote imposée par le forage de garde d'un niveau poreux jusqu'à l'atteinte de celui-ci, puis cote journalière d'excavation et enfin cote du mur du niveau poreux jusqu'à l'exécution du forage de garde du niveau inférieur. Le calage est focalisé sur la représentation simultanée des variations piézométriques aux trois forages de suivi de perturbations EST201, EST203 et EST103 ainsi que sur celle des valeurs des débits (individualisés et/ou cumulés) récoltés dans les puits.

Les paramètres hydrodynamiques (transmissivité, perméabilité verticale, transmissivités de fractures), directement issus du calage « cas 1 » en régime permanent présenté précédemment, ne permettent pas de reproduire précisément les variations de charge. Des ajustements locaux de ces valeurs initiales ont été introduits par couche sur tous les niveaux de l'Oxfordien touchés par la perturbation (niveaux poreux et intercalaires). Cependant ces modifications homogènes ne suffisent pas à caler simultanément les trois piézomètres. Le calage

n'a pu être obtenu qu'en introduisant, au niveau de l'Oxfordien moyen (Hp1-4), des hétérogénéités, représentées ici par l'intermédiaire de deux structures localisées :

- une structure ouverte conductrice nécessaire pour lier hydrauliquement EST201 et EST103 dont les réponses à l'Oxfordien moyen sont similaires et pratiquement synchrones (il manque des données pour l'Oxfordien supérieur)
- une structure fermée, accentuant l'effet préexistant de la zone moins transmissive située à l'est du puits auxiliaire qui permet d'atténuer les réponses au forage EST203.

Le calcul en régime transitoire nécessite par ailleurs l'introduction de coefficients d'emmagasinement spécifiques, dont la valeur a une forte influence sur celle des débits : une valeur uniforme assez faible ( $10^{-7} m^{-1}$ ) a été retenue (à l'exception de la structure conductrice). Cette valeur est associée à la réduction d'un facteur 10 des valeurs de perméabilité des intercalaires des niveaux Hp1 à Hp4, des valeurs plus élevées entraînant une augmentation importante des débits incompatibles avec les observations.

La paramétrisation retenue est donnée dans le Tableau T4-3 et illustrée en Figure T4-17. Le calage obtenu simultanément pour les forages EST201, EST203 et EST103 est présenté en Figure T4-18 pour les niveaux Hp 1 à 4, et par forage pour l'ensemble des niveaux en Figure T4-19. Les volumes d'eau récoltés aux puits et les débits des principaux niveaux producteurs sont présentés en Figure T4-20.

Transmissivités des horizons poreux				Perméabilités verticales					
Valeurs de base issues du calage en régime permanent				Valeur uniforme initiale $10^{-7} m/s$					
Coefficients multiplicateurs appliqués	sur l'ensemble du niveau	Hp7	0,4	Valeurs en m/s retenues	sur l'ensemble du niveau	tous horizons Hp :		$10^{-8}$	
		Hp6	0,1			Intercalaires :		6/7 $5 \cdot 10^{-9}$	
	Hp5	0,06	4/5 et 5/6			$10^{-11}$			
supplémentaire pour la structure fermée	Hp1 à Hp4	0,1	pour la structure fermée			uniquement pour les intercalaires des niveaux Hp1 à Hp4	1a/1b		$10^{-9}$
	Hp5 à Hp7	1					autres		$10^{-8}$
supplémentaire pour la structure ouverte	Hp1 à Hp4	0,2 à 0,3	pour la structure ouverte			Valeur du niveau divisée par 100			
	Hp5 à Hp7	2000		Valeur du niveau multipliée par 100					
Coefficients d'emmagasinement spécifiques :				valeur homogène de $10^{-7} m^{-1}$ sur l'ensemble des niveaux de l'Oxfordien à l'exception de la structure conductrice fixée à $10^{-5} m^{-1}$					

Tableau T4-3 - Paramétrisation retenue pour le calage des forages de suivi de perturbation.

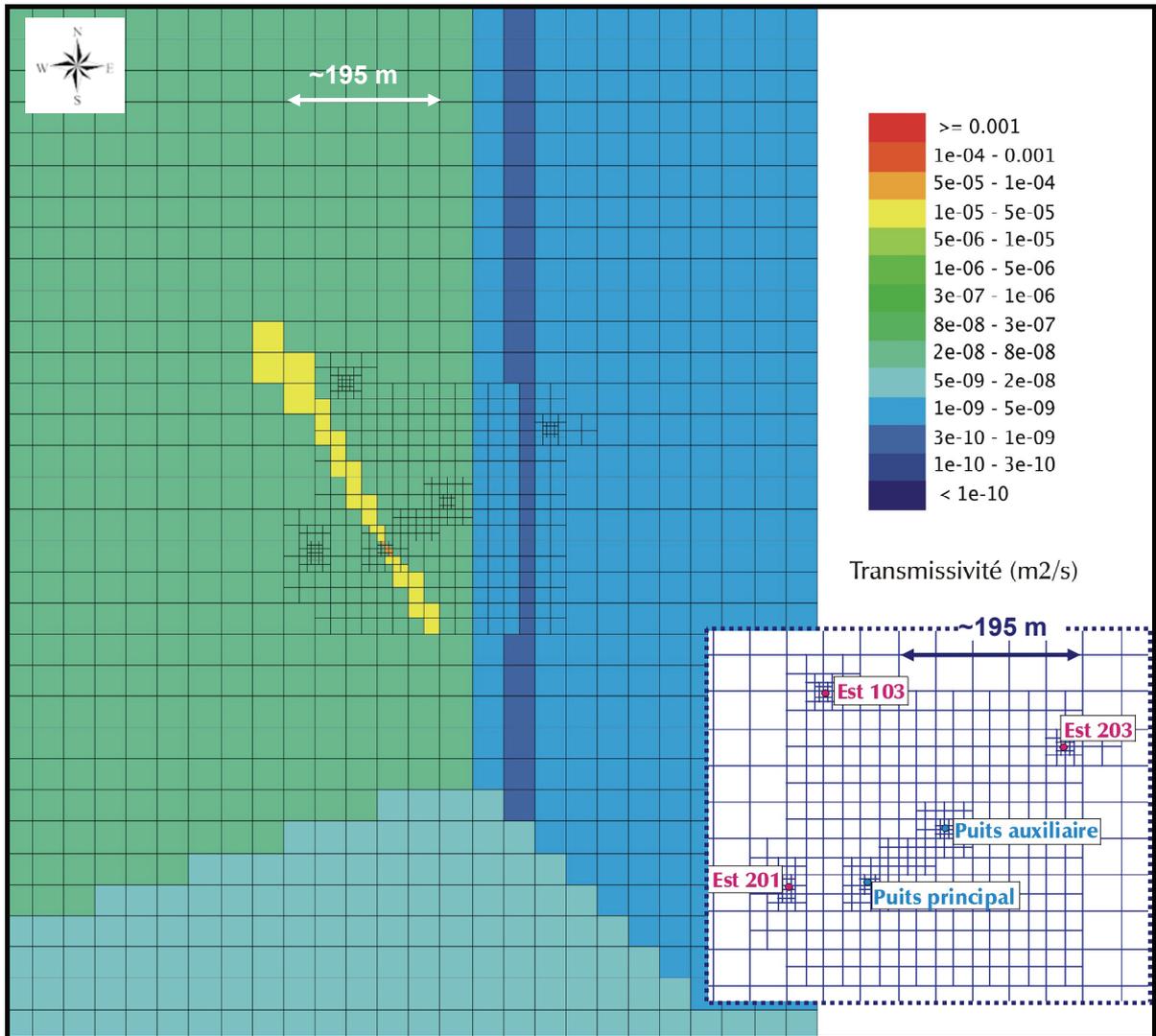


Figure T4-17 - Transmissivités Oxfordien moyen (Hp1-4) et localisation des puits et forages.

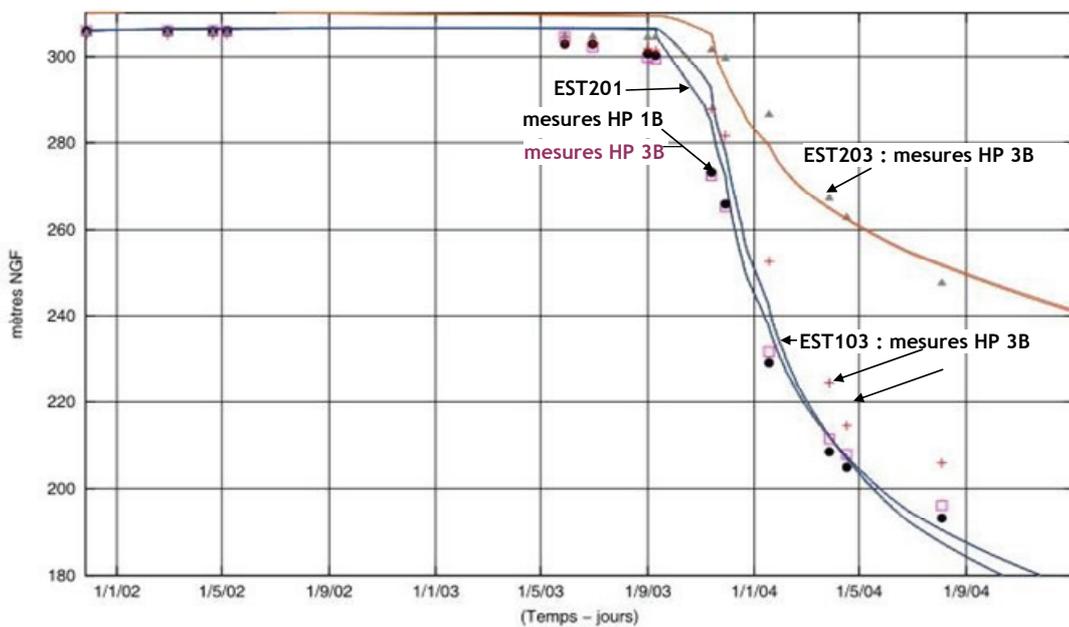


Figure T4-18 - Évolution comparée des réponses des niveaux HP1-4.

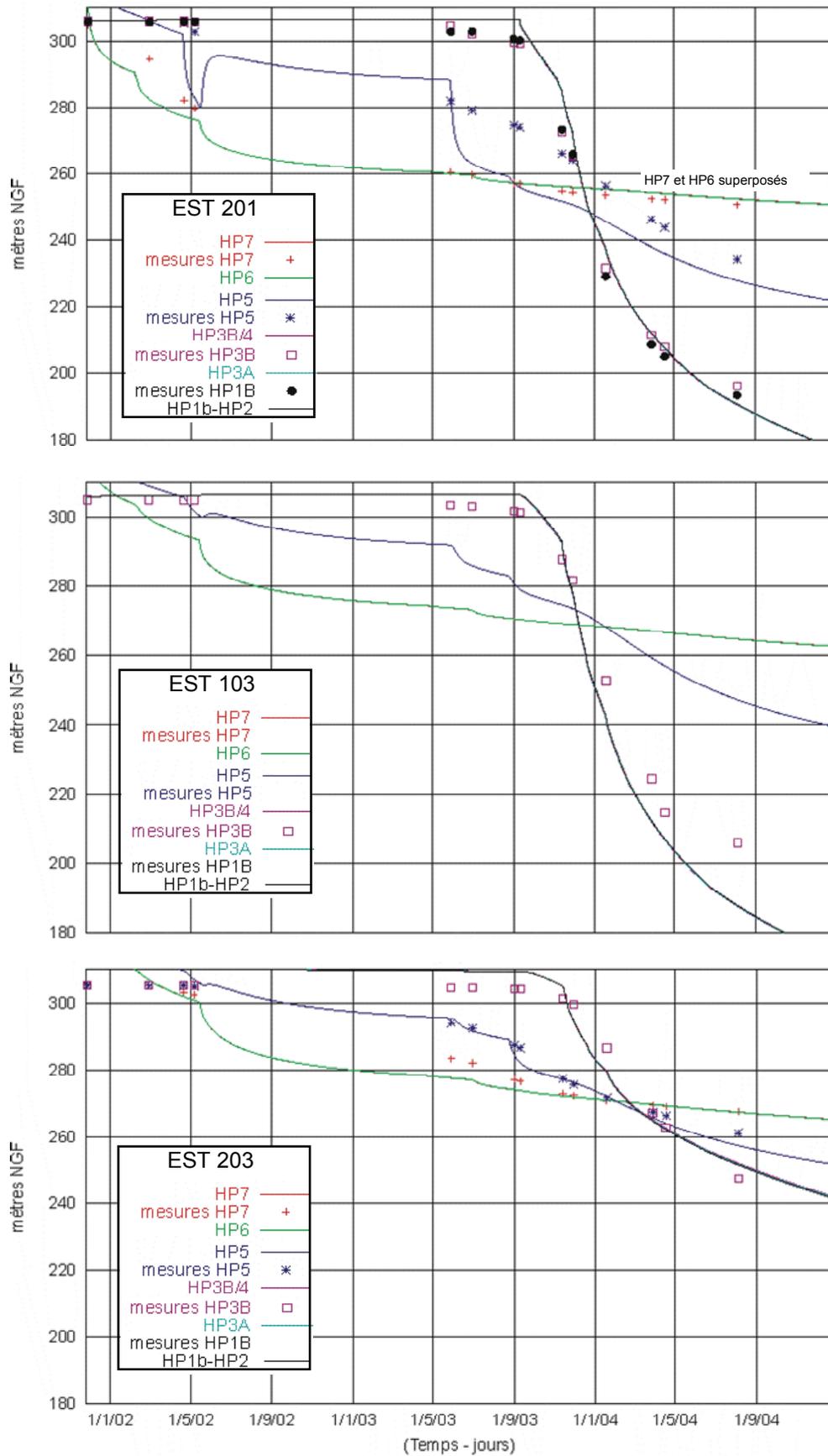


Figure T4-19 - Évolution des charges mesurées et calculées aux forages EST201, EST203 et EST103 (charges similaires pour les niveaux HP6/HP7 et pour les niveaux HP1 à HP4).

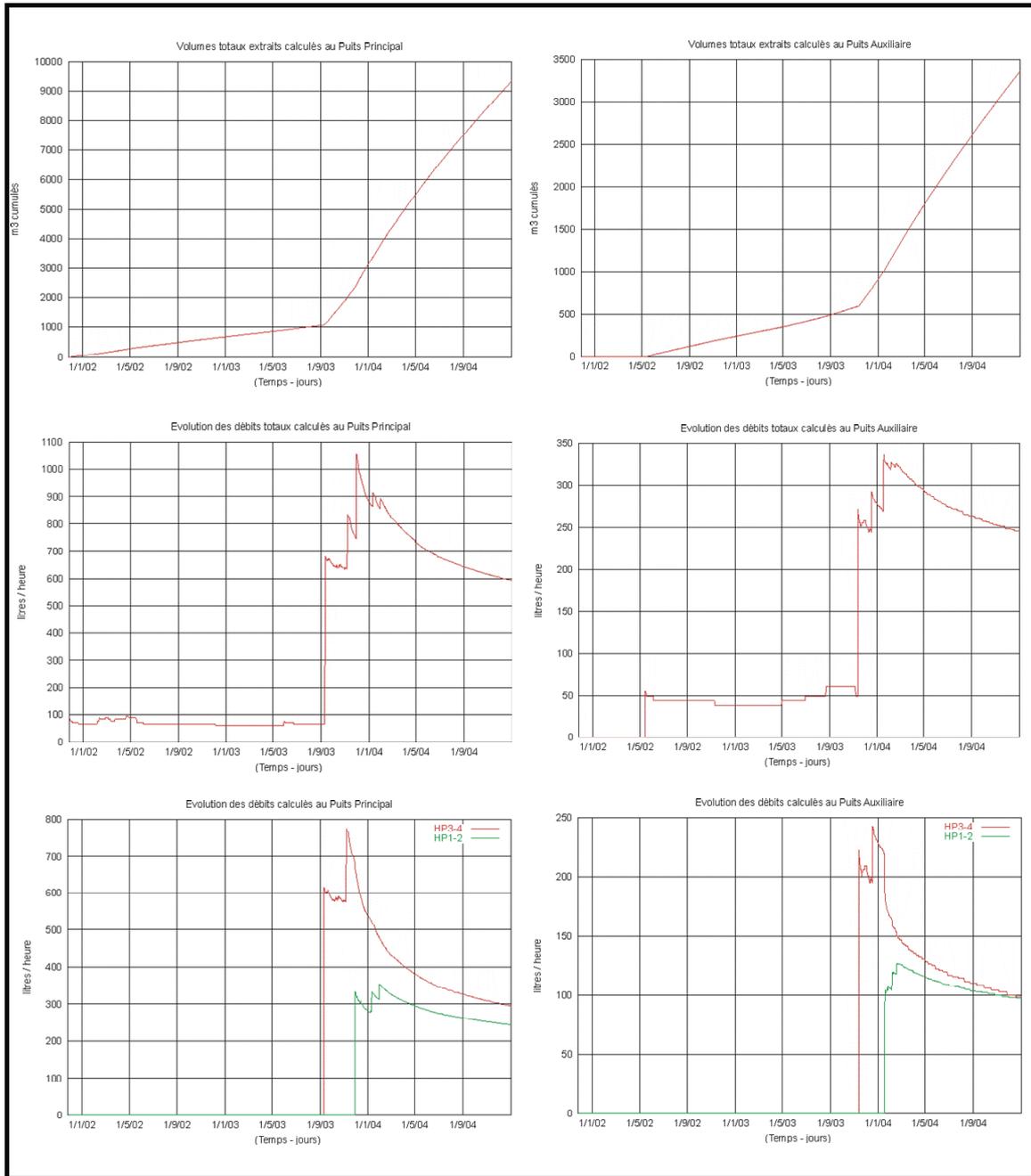


Figure T4-20 - Évolution des volumes d'exhaure et des débits calculés lors du forage des puits.

L'ordre de grandeur des volumes et débits récoltés dans les puits aux différents horizons est respecté (pour les mesures, se référer au rapport ANDRA référencé DP RP ADPE 04-0858), bien que les résultats soient un peu élevés pour le puits auxiliaire (facteur 3 à 5 sur les volumes extraits). Les débits de l'Oxfordien supérieur (entre 10 et 80 litres/heure) restent toujours faibles comparés à ceux de l'Oxfordien moyen.



## Annexe T5 - Modélisation des interactions béton/argile réalisées par l'IRSN

Les concepts de stockage de déchets radioactifs en formation argileuse profonde retenus par l'ANDRA impliquent la mise en œuvre d'importantes quantités de matériaux à base de ciments. Les avantages intrinsèques des ciments (confinement des radionucléides, résistance mécanique...) doivent être mis en balance avec leurs effets potentiellement négatifs de dégradation des performances des autres composants du stockage, en particulier les bentonites utilisées comme barrières ouvragées et les argilites constituant la roche hôte [ALON04]. La chimie des fluides du béton est en effet caractérisée, du moins en ce qui concerne les bétons classiques, par de hautes teneurs en ions alcalins et un pH supérieur à 13. La migration de ces fluides qui constituent un panache alcalin, génère sur le long terme une série de réactions géochimiques et de transformations minéralogiques importantes. Ces modifications conduisent à des perturbations plus ou moins prononcées des propriétés hydrodynamiques, mécaniques et de confinement chimique des matériaux argileux.

Les interactions entre béton et argile (bentonite, argilites) sont le résultat, pour l'essentiel, du couplage entre le transport de solutés et les réactions chimiques. Les transferts de solutés sont relativement lents et de ce fait, les expériences effectuées en laboratoire sur des périodes nécessairement courtes ne sont pas totalement représentatives du comportement à long terme des matériaux, même si de nombreux progrès ont été récemment réalisés [MICH05]. Il est nécessaire de les extrapoler aux échelles de temps d'un stockage pour estimer les perturbations [DEWI04a, DEWI04b, GAUC04, READ01, SAVA01, SOLE03]. Les développements récents des outils de simulation couplés chimie-transport, tel le code HYTEC [LEE03] utilisé pour la présente étude, permettent ce type d'estimations.

La présente annexe expose les principaux résultats de simulations effectuées par l'IRSN sans toutefois détailler l'ensemble des cas de calculs traités. Les références [DEWI04a] [DEWI04b] [ALON04] rapportent de manière plus complète certains de ces résultats.

*N.B. : Les références bibliographiques mentionnées ci-après sont listées en fin de la présente annexe.*

### **A. Modélisation des matériaux argileux et cimentaires**

#### **Minéralogie et hydrochimie**

Le cortège minéralogique type retenu pour représenter les argilites du Callovo-Oxfordien est composé d'illite (22 % en masse), d'interstratifiés illite/smectite (28 %), de quartz (30 %), de calcite (15 %), de dolomite (3 %) et de pyrite (1 %). Les smectites sont modélisées par la montmorillonite calcique. La capacité d'échange ionique (CEC) est de 20 meq/100g, le calcium représentant l'ion échangeable majoritaire. La possibilité d'échange ionique mettant en jeu des protons est aussi considérée, avec une population en protons échangeables estimée à 10 % de la CEC totale. Les caractéristiques initiales de l'eau interstitielle des argilites sont un pH de 7, un potentiel réducteur et une force ionique de 0,0075. Les ions majeurs sont le sodium, les chlorures et les sulfates. L'influence potentielle de la matière organique n'est pas prise en compte dans cette étude.

La bentonite (de type MX80) est essentiellement constituée de montmorillonite sodique (75 %) et de quartz (15 %). La calcite (1,5 %) et la pyrite (0,3 %) sont deux phases secondaires également prises en compte dans les simulations. La CEC s'élève à 75 meq/100g, avec une population en ions échangeables dominée par le sodium. L'hydrochimie est proche de celle des argilites (réductrice, de pH proche de la neutralité, avec  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  comme ions majeurs).

Le béton est représenté dans les simulations par un ciment de type CEM-I (Portland). La minéralogie (simplifiée) retenue permet de rendre compte des grands états d'évolution du ciment et des phénomènes de régulation du pH.

Les phases constitutives sont la portlandite (25 % en masse), un calcium de silicate hydraté (CSH) de rapport Ca/Si de 1,7 (CSH1.7 ; 65 %) et l'ettringite (10 %). Les eaux cimentaires sont de type K-Na-OH pour un pH élevé (13,2 à 20 °C, 11,9 à 70 °C).

### Propriétés hydrodynamiques

Le transfert de solutés est considéré comme essentiellement diffusif. Les valeurs de paramètres de diffusion sont rapportées dans le Tableau T5-2. La diffusion des anions, tels les ions hydroxydes, peut être significativement ralentie au sein des matériaux argileux compactés du fait de mécanismes d'exclusion électrostatique induits par les surfaces chargées des particules argileuses [GARC04, MELK04, VANL05]. Néanmoins, ce processus d'exclusion peut devenir négligeable pour des densités de bentonite inférieures ou égales à 1,6, ou lors d'ajout de sable en mélange avec les particules de bentonite [NAGA04]. De plus, le panache alcalin est composé d'anions (OH<sup>-</sup>), mais aussi de cations (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca(OH)<sup>+</sup>). Il existe donc une incertitude relative à la contribution de l'exclusion anionique et à ses effets sur la propagation de ce panache. Aussi, deux jeux (« sets ») de valeurs de paramètres de diffusion (cf. Tableau T5-2), sans et avec exclusion anionique, ont été utilisés afin de tenir compte de cette incertitude et d'évaluer la sensibilité de l'extension des perturbations alcalines aux valeurs des coefficients de diffusion. Le « set I » correspond au cas « sans exclusion anionique » avec des valeurs élevées de coefficient de diffusion effective dans les argiles (argilites et/ou bentonite), et le « set II », à des valeurs plus faibles caractéristiques de l'expression de ce phénomène.

### B. Principaux mécanismes et incertitudes associées

Quatre mécanismes interdépendants contrôlent la propagation des perturbations alcalines dans l'ensemble du système : i) la diffusion du fluide hyperalcalin, ii) les transformations minéralogiques importante par dissolution-précipitation de minéraux, qui consomment des ions hydroxydes (« tampon pH »), iii) le colmatage éventuel induit par les modifications minéralogiques et iv), au delà d'une zone de forte transformations minéralogiques, la régulation du pH par des processus secondaires tels les échanges de protons surfaciques.

Une des difficultés majeures dans la modélisation des interactions entre matériaux cimentaires et argileux est de sélectionner les minéraux qui peuvent se former lors de ces interactions. Il existe dans la littérature une relativement grande variabilité des minéraux secondaires observés (cf. par exemple [DEWI04a] et ses références, [GAUC04]). En particulier, la précipitation de zéolites qui présentent un fort pouvoir de tampon pH n'est pas toujours mentionnée. Le Tableau T5-1 résume les deux hypothèses minéralogiques prises en compte dans les simulations. La première hypothèse (hypothèse B) considère les minéraux les plus communément cités et/ou de cinétique de précipitation rapide (par rapport aux échelles de temps considérée pour un stockage). La seconde (hypothèse C) introduit d'autres minéraux secondaires potentiels cités de façon moins systématique dans la littérature expérimentale, dont la cinétique de formation est plus longue. Les processus d'échange ionique et/ou de complexation de surface, rapides et ubiquistes dans les matériaux argileux, sont introduits dans ces deux hypothèses. Cette approche permet de couvrir les incertitudes existantes, en l'état actuel des connaissances, sur les processus réactionnels des interactions béton/argile et leur possible contrôle cinétique afin d'en apprécier l'influence sur la propagation du panache alcalin et la dégradation des matériaux.

Phases initiales	<i>Ciment</i> :	CSH1.7, ettringite, portlandite
	<i>MX80</i> :	calcite, montmorillonite, pyrite, quartz
	<i>Argilites</i> :	illite, montmorillonite, quartz, calcite, dolomite, pyrite
Phases secondaires	<i>Hypothèse B</i> :	brucite, calcite, CSH de plus faibles rapports Ca/Si, monosulfoaluminate
	<i>Hypothèse C</i> :	<i>Hypothèse B</i> + chlorites, illite, montmorillonite, saponites, sépiolite, zéolites
Autres processus	Échange cationique et complexation de surface dans les deux hypothèses B et C	

**Tableau T5-1 - Hypothèses minéralogiques considérées dans les simulations.**

Par ailleurs, des travaux expérimentaux et l'observation d'analogues naturels des interactions béton/argile [ADLE01, LICH98] indiquent un colmatage de la porosité due à la précipitation de minéraux secondaires. L'influence de ce colmatage sur le transport des solutés reste toutefois difficile à appréhender dans le cas d'ouvrages de stockage. Sur le long terme, il pourrait fortement ralentir la propagation du panache alcalin et la migration des radionucléides dans la zone d'argile perturbée et ainsi favoriser leur confinement. Cet effet favorable doit cependant être nuancé du fait de la faible épaisseur de la zone colmatée, dont la pérennité est sujette à caution compte tenu des rejeux mécaniques probables. Bien que des simulations aient été effectuées en tenant compte des effets rétroactifs du colmatage sur le transport diffusif (cf. infra), l'incertitude précitée conduit à ne pas les retenir dans l'estimation de l'extension possible de la perturbation alcaline.

Enfin, la configuration des composants cimentaires et argileux (quantité de béton, agencement des deux types de matériaux...) en interaction influent aussi sur l'impact du panache alcalin. Différentes configurations de stockage sont par conséquent traitées dans la présente étude.

### **C. Code de calcul et bases de données**

Le code couplé chimie-transport HYTEC [LEE03], utilisé pour la présente étude, permet de simuler le transport réactif, convectif/dispersif et diffusif, en milieu poreux en une, deux ou trois dimensions spatiales. Une grande variété de processus géochimiques peut être modélisée : toutes les réactions chimiques en solution, les réactions redox, la dissolution et la précipitation de minéraux, la complexation de surface et les échanges ioniques. HYTEC est complètement couplé, c'est-à-dire que les paramètres de transport peuvent évoluer avec la minéralogie. La variation de porosité peut être calculée par l'intermédiaire du volume molaire des minéraux et de leur concentration, tandis que l'évolution des valeurs de coefficient de diffusion effective est reliée à la variation de porosité par une version adaptée de la loi d'Archie.

Toutes les simulations de cette étude sont basées sur l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique, en partie justifiée par l'existence de forts gradients géochimiques, par des rapports surface/solutions très élevés et, dans le cas des déchets C et des combustibles usés, par une température relativement élevée (bien que sur une durée moins longue que celle des interactions argile/béton). En outre, les données cinétiques dépendent par nature des caractéristiques du système (effets inhibiteurs ou catalyseurs, surface spécifique...). Elles ne sont de ce fait pas toujours bien définies pour les phases minéralogiques constitutives des matériaux dans leur état initial et les changements au cours de l'évolution du système sont difficilement quantifiables. Il est à noter qu'un effet cinétique qualitatif est introduit dans la présente étude via les hypothèses minéralogiques considérées, les minéraux de l'hypothèse C étant caractérisés par des cinétiques lentes à une température de 20°C.

La base de données thermodynamiques EQ3/6 a été sélectionnée et enrichie avec des données expérimentales complémentaires pour les phases cimentaires (CSH0.8 et CSH1.1, monosulfoaluminate) ainsi que pour les échanges

ioniques et de complexation de surface des matériaux argileux (cf. [DEWI04a], WERS04]). Les données de l'AEN ont été sélectionnées pour le technétium et l'uranium. Parmi les minéraux primaires du ciment et des argilites, et ceux qui peuvent potentiellement se former au cours du temps, quatre espèces ont été sélectionnées : clinoptilolite (une zéolite), CSH1.1, CSH1.8 et montmorillonite. Ce choix résulte de leur rôle reconnu comme majeur dans la rétention, du fait de leur abondance ou de leurs propriétés intrinsèques, et de la disponibilité des données dans la littérature.

#### **D. Configurations étudiées**

Quatre configurations de composants argileux et cimentaires représentatives, bien que simplifiées, d'ouvrages de stockage ont fait l'objet de simulations en 1D (non radial) et/ou en 3D cylindrique :

- une configuration « alvéole de déchets B », qui consiste en tunnel cylindrique horizontal d'un diamètre de 6 m et une longueur de 100 m, entouré d'argilites (interactions béton/argilites). Par simplification, il est supposé que l'alvéole de stockage est entièrement rempli de ciment : aucune distinction n'est faite entre le béton des colis de déchets et celui du soutènement/revêtement, qui est assimilé à un ciment. Une zone endommagée par l'excavation (EDZ) de 1 m d'épaisseur est considérée. Une température homogène de 20°C est retenue ;
- une configuration « alvéole de déchets C ». L'étude se focalise sur les 12 premiers mètres d'un tunnel cylindrique horizontal, comprenant un bouchon de 3 m de longueur en bentonite compactée, soutenu par un mur en ciment de 4 m de longueur. Le diamètre du tunnel est de 0,7 m, et l'épaisseur de l'EDZ est limitée à 0,05 m. Une température moyenne de 25°C est retenue ;
- une configuration « alvéole de CU », qui consiste en un tunnel cylindrique horizontal court (20 m de long, 2,5 m de diamètre), comprenant des colis de 0,6 m de diamètre enveloppés dans une barrière de bentonite (95 cm d'épaisseur). Un bouchon de la même bentonite (5 m de longueur), disposé à l'entrée du tunnel et soutenu par un mur de ciment (1 m de longueur), isole les combustibles de la galerie de manutention. La température retenue est de 25°C ou 70°C ;
- une configuration « scellement » avec un système d'ancrage dans l'EDZ (saignée), pour une galerie de 8 m de diamètre, avec un revêtement en béton de 50 cm d'épaisseur, et un radier en béton de 1 m d'épaisseur. Le système d'ancrage est constitué d'une bentonite compactée pure ou d'un mélange de 80 % de bentonite et de 20 % de sable (assimilé à du quartz).

#### **E. Synthèse des principaux résultats**

Le Tableau T5-2 en fin de la présente annexe résume les extensions des transformations minéralogiques et du panache alcalin atténué (pH-10) pour l'ensemble des configurations étudiées.

##### **Configuration « alvéole de déchets B » - Interactions argilites/ciment**

*Les simulations ont été effectuées en 1D sans géométrie radiale.*

De manière générale, le pH est un paramètre clé des interactions ciment/argile, qui donne une indication globale de l'extension du panache alcalin et des transformations minéralogiques. Il renseigne indirectement sur les possibles modifications des propriétés de sorption et la solubilité de radionucléides au sein de ces matériaux. La Figure T5-1 présente l'évolution des profils de pH calculés, après 100 000 ans d'interaction entre le matériau cimentaire modélisé et les argilites, pour les hypothèses minéralogiques B et C. Trois zones se distinguent sur ces profils : i) dans le ciment, le pH chute de 13,3 à 12,3 (tampon opéré par la portlandite), ii) à l'interface, le

panache alcalin du ciment est tamponné plus ou moins fortement en fonction des hypothèses minéralogiques par les réactions de précipitation-dissolution de minéraux, iii) au-delà de la zone fortement reminéralisée, un panache alcalin (pH-10) atténué migre sur une distance d'ordre métrique à plurimétrique tout en étant progressivement tamponné par les processus d'échange de protons surfaciques.

Les schémas réactionnels (dissolution de minéraux primaires et précipitation de phases secondaires) associés au tampon du panache alcalin sont illustrés par la Figure T5-1, dans le cas de l'hypothèse C après 100 000 ans. D'intenses transformations minéralogiques se produisent à l'interface argilites/ciment. Deux fronts minéralogiques majeurs se distinguent : à l'interface proprement dite, où précipitent CSH1.1 et phases magnésiennes et, un peu plus en aval, où la montmorillonite est transformée en zéolite et en illite, en partie du fait d'un flux d'ions potassium relâché par le ciment. Après 100 000 ans d'interaction, la zone fortement reminéralisée s'étend sur 1 à 2 m (set I pour l'EDZ). Cette extension de la zone de fortes transformations minéralogiques peut être considérée comme maximale du fait de propriétés hydrodynamiques élevées assignée à l'EDZ et la non prise en compte de la dilution radiale du panache alcalin. En outre, un tampon moins marqué du panache alcalin que celui calculé par une approche thermodynamique pourrait découler de la prise en compte des cinétiques de réaction et conduire à des résultats a priori intermédiaires entre les courbes obtenues pour les hypothèses B et C.

La simulation d'un ciment de Portland de pH initial d'environ 12,3 conduit à éluder le processus d'illitisation et diminue l'agressivité du panache alcalin, comme indiqué dans [VEIL04]. Cependant, dans une approche strictement thermodynamique, l'épaisseur de la zone d'argilites minéralogiquement altérées reste sensiblement équivalente au cas correspondant à un ciment de Portland de pH initial de 13,2 (simulations non illustrées dans la présente annexe).

Par ailleurs, la prise en compte d'une rétroaction des processus de reminéralisation sur le transport diffusif conduit à colmatage de la porosité en quelques centaines d'années pour les deux hypothèses minéralogiques retenues, du fait de la précipitation localisée de minéraux de volumes molaires élevés (CSH et zéolites) et de calcite (cf. Figure T5-2). Le colmatage s'accompagne généralement, dans les simulations effectuées, d'une ouverture de la porosité du matériau cimentaire. La diminution de la porosité, et consécutivement du coefficient de diffusion, implique un ralentissement, puis un arrêt quasi total, du transfert de matière entre le ciment et les argilites. Néanmoins, comme signalé ci-dessus (section B), l'épaisseur calculée de colmatage est faible et par conséquent mécaniquement fragile. De plus, les simulations supposent à la fois une homogénéité de la précipitation des minéraux et un colmatage complet de l'espace poral. Il est possible qu'en réalité le colmatage soit moins localisé et plus imparfait. Dans ce cas, l'impact sur le transfert de solutés serait nettement moins prononcé dans un milieu déjà caractérisé par de faibles valeurs de porosité et de coefficient de diffusion.

Enfin, l'évolution du coefficient de distribution ( $K_d$ ) du Cs et de la limite de solubilité du Tc induite par la perturbation alcaline est illustrée en Figure T5-3. Au cours de l'évolution du système, les valeurs de  $K_d$  et de limite de solubilité fluctuent globalement d'un ordre de grandeur, favorablement ou défavorablement vis-à-vis du confinement des radionucléides. La destruction de minéraux primaires conduit en effet à la précipitation de solides secondaires (CSH, illite et éventuellement zéolites) caractérisés également par des propriétés de rétention.

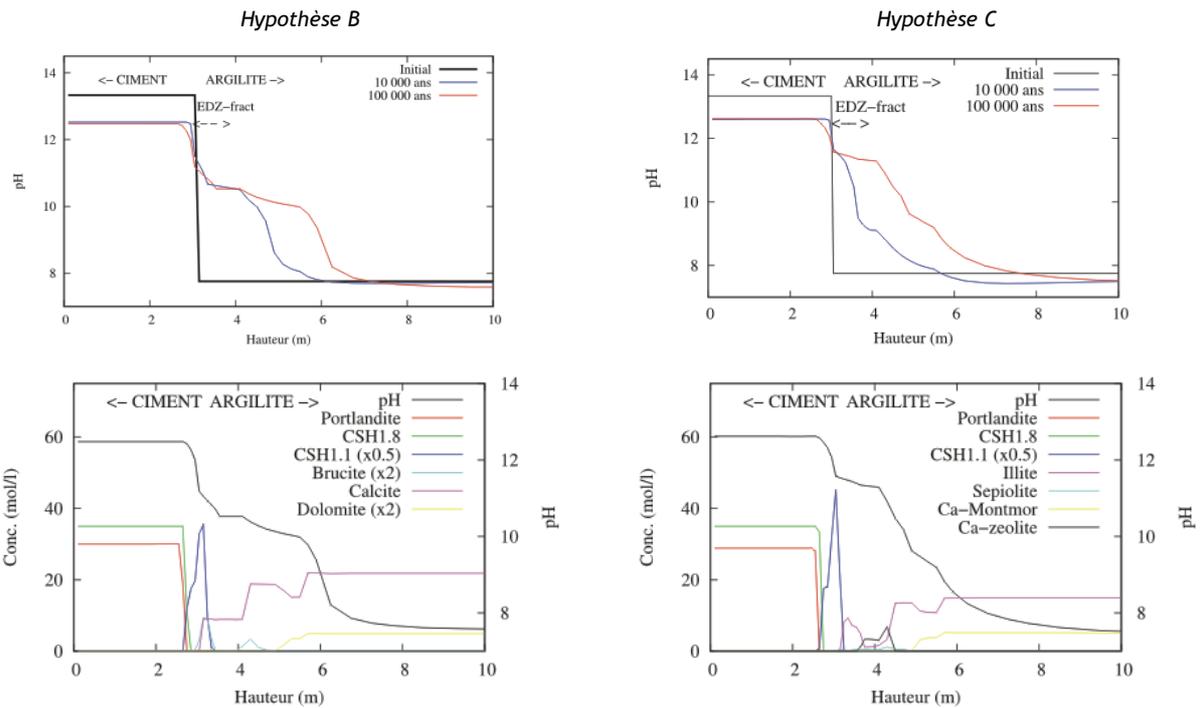


Figure T5-1 - Évolution sur 100 000 ans du pH et transformations minéralogiques à 100 000 ans pour les hypothèses minéralogiques B et C et la fourchette élevée des coefficients de diffusion (set I) ; calculs en configuration 1D non radiale.

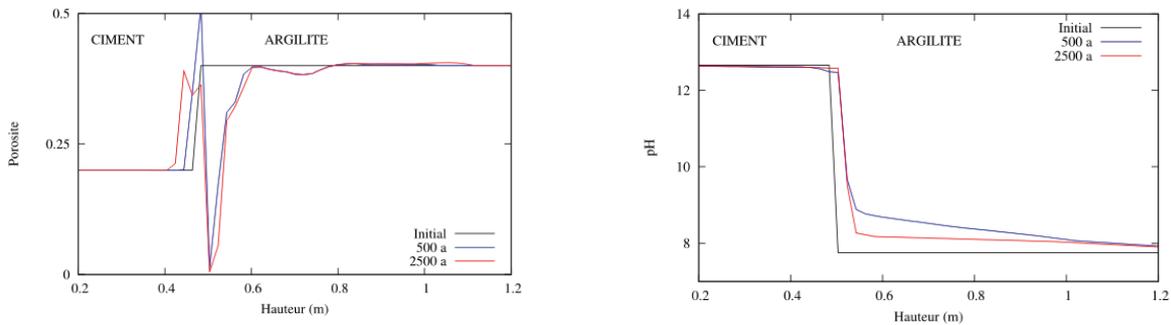


Figure T5-2 - Zoom à l'interface argilites/ciment : une forte chute de porosité stoppe l'avancée du panache alcalin (hypothèse C).

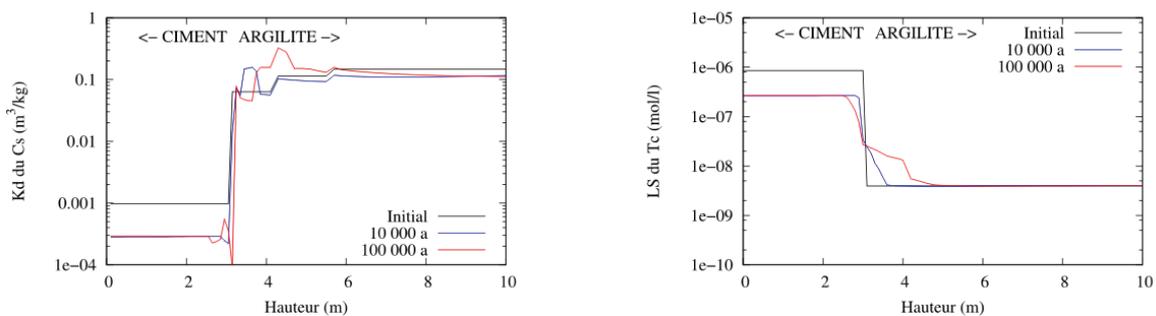


Figure T5-3 - Évolution du Kd du césium (hypothèse C) et de la limite de solubilité (LS) du technétium (hypothèse B).

### Configuration « alvéole de déchets C » - Interactions argilites/bentonite/ciment

*Les simulations ont été effectuées en 3D en géométrie cylindrique.*

L'évolution des profils de pH calculés sur 100 000 ans avec les valeurs élevées des coefficients de diffusion (set I, Tableau T5-2) pour les hypothèses B (avec et sans colmatage) et C est rapportée sur la Figure T5-4.

Le panache alcalin reste confiné sur une zone d'extension pluridécimétrique à métrique. Il s'amenuise de façon sensible au cours du temps compte tenu de la faible quantité de ciment (cylindre de 70 cm de diamètre) présente dans la configuration « déchets C », ce qui minimise les perturbations par rapport aux autres configurations étudiées. Dans les simulations effectuées, la portlandite (une des principales sources du panache alcalin) est en effet complètement dissoute après 20 000 ans d'interaction. De façon similaire à la configuration « déchets B », une zone localisée (cf. Tableau T5-2 pour les extensions calculées) et caractérisée par d'importantes transformations minéralogiques tamponne plus ou moins efficacement le pH suivant les hypothèses minéralogiques (B et C).

### Configuration « alvéole de CU » - Interactions bentonite/ciment

*Les simulations ont été effectuées en 1D sans géométrie radiale.*

La nature du matériau argileux (argilites ou bentonite) n'influence en première approximation que peu le type et la séquence des processus d'interactions ciment/argile. Comme pour les configurations précédentes, une zone d'altération minéralogique intense est observée, ainsi qu'une propagation dans le milieu argileux d'un panache alcalin atténué, plus ou moins étendue en fonction des hypothèses minéralogiques. La quantité de ciment (cylindre de 2,5 m de diamètre) est suffisante dans cette configuration pour maintenir une source alcaline sur 100 000 ans par dissolution de portlandite. L'extension de la zone fortement altérée et du panache alcalin dépend à nouveau significativement, sur le long terme, de la valeur du coefficient de diffusion effective affectée à la barrière bentonitique (Figure T5-5 et Tableau T5-2). La zone fortement altérée s'étend sur quelques dizaines de centimètres à 1,5 m et le panache alcalin atténué (pH-10) se propage sur une distance de quelques mètres au maximum.

Les résultats des simulations effectuées en considérant une température de 70°C (non illustrés dans la présente annexe) sont proches de ceux obtenus pour une température de 25°C. À cet égard, il est probable qu'une modélisation cinétique conduirait, pour ces deux températures, à une différence significative de l'intensité et de l'extension de la perturbation alcaline.

Enfin, pour ce qui concerne l'effet de cette perturbation sur les propriétés de confinement chimique de la bentonite, les valeurs de  $K_d$  et les limites de solubilités fluctuent d'un ordre de grandeur autour des valeurs initiales dans le cas des éléments étudiés, comme dans le cas des interactions argilites/ciment.

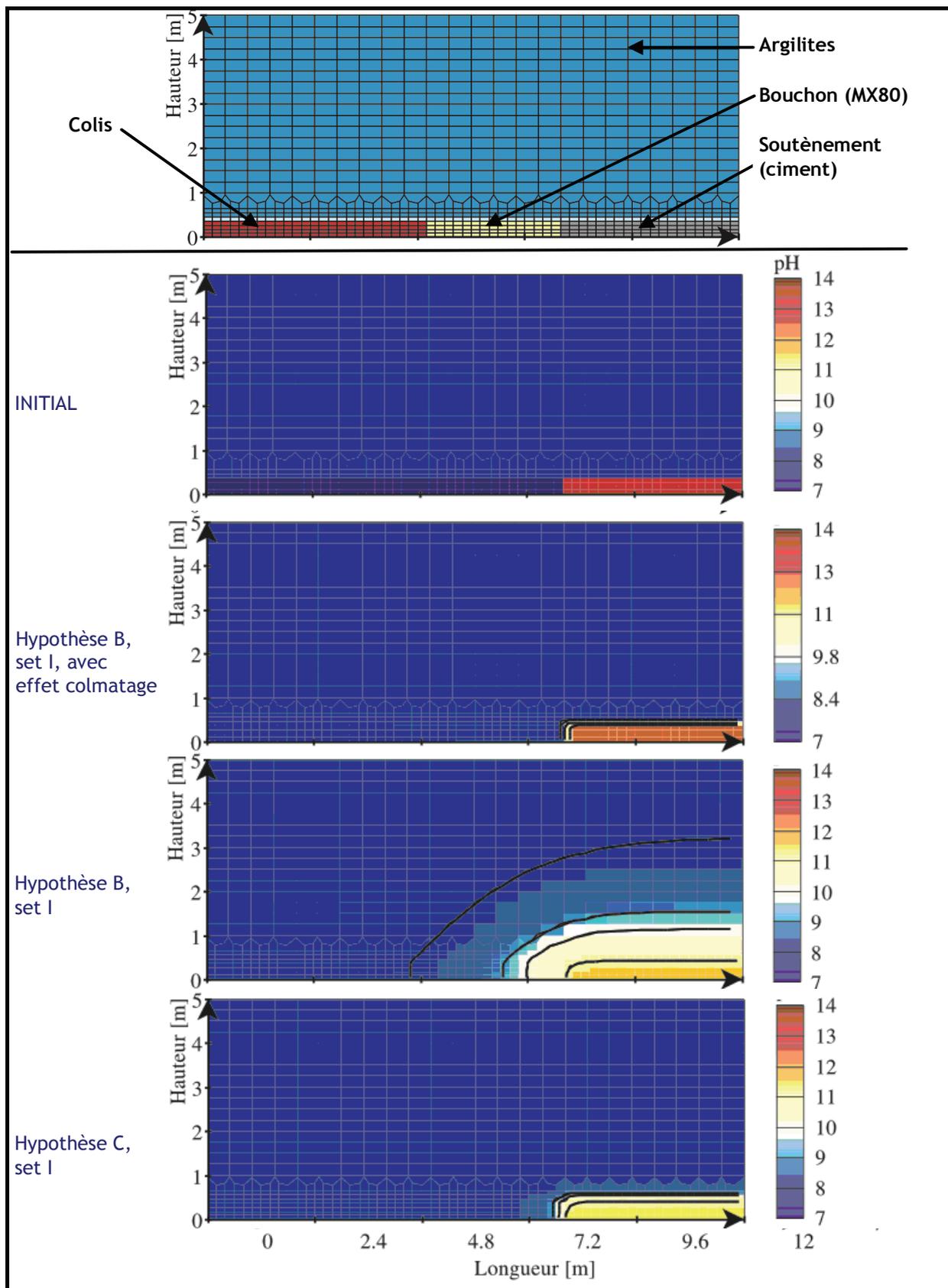


Figure T5-4 - Maillage et profils de pH en symétrie 3D-cylindrique, initialement et après 100 000 ans.

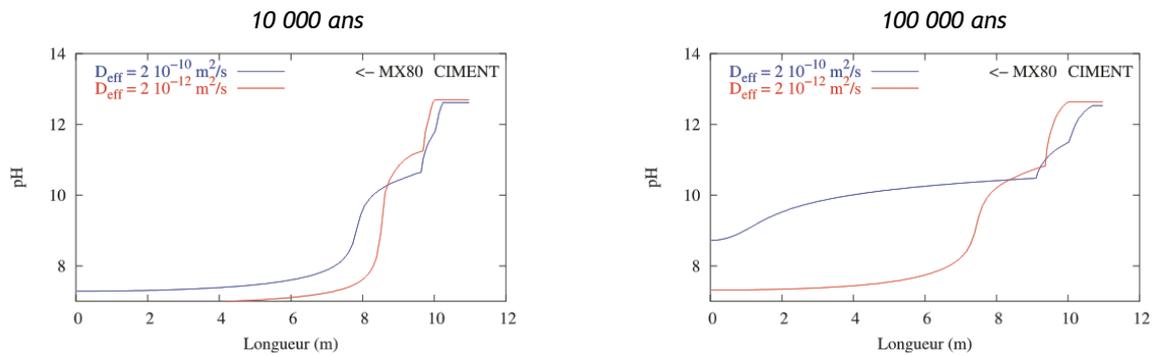


Figure T5-5 - Extension du panache alcalin en fonction de la valeur du coefficient de diffusion effective après 10 000 et 100 000 ans (1D non radial, hypothèse B, 25 °C).

### Configuration « scellement » - Interactions argilites/bentonite/ciment

*Les simulations ont été effectuées en 3D en géométrie cylindrique.*

Dans le cas d'un scellement en bentonite pure (set II, calculs non illustré dans la présente annexe), les transformations minéralogiques calculées restent limitées ; en particulier, l'« épaulement » situé entre deux tronçons de revêtement en béton conserve sa minéralogie initiale sur une partie de sa longueur et la saignée n'est que peu impactée. En revanche, pour un mélange bentonite-sable, caractérisé par des valeurs de coefficients de diffusion peu dépendantes du processus d'exclusion anionique (set I, Tableau T5-2), le système d'ancrage du scellement subit des modifications minéralogiques sur toute la longueur de l'épaulement et la hauteur de saignée verticale qui intercepte l'EDZ. Ceci est plus particulièrement manifeste à proximité immédiate du radier. La source alcaline que constitue la portlandite du soutènement en béton de la galerie est significativement atténuée après une durée de l'ordre de 20 000 ans, mais la présence d'un radier en ciment d'un mètre d'épaisseur maintient une source alcaline pendant une période supérieure à 100 000 ans.

La néoformation de zéolite calcique et d'illite (hypothèse minéralogique C) est représentée sur la Figure T5-6. L'extension du panache alcalin est du même ordre de grandeur que celle de la zone de transformation minéralogique. L'épaulement de la saignée est perturbé dès 10 000 ans. Une durée d'interaction de 50 000 ans est néanmoins nécessaire pour que le premier tiers de saignée verticale, recoupant l'EDZ commence à se transformer sous l'effet du panache alcalin. L'EDZ, pour laquelle un coefficient de diffusion significativement plus élevé (cf. Tableau T5-2) est retenu, tamponne le panache mais pourrait aussi induire un lent transfert de potassium vers la saignée. Il est à noter que si l'illitisation partielle peut diminuer le gonflement de la saignée, elle n'entraîne pas nécessairement une perte drastique de perméabilité.

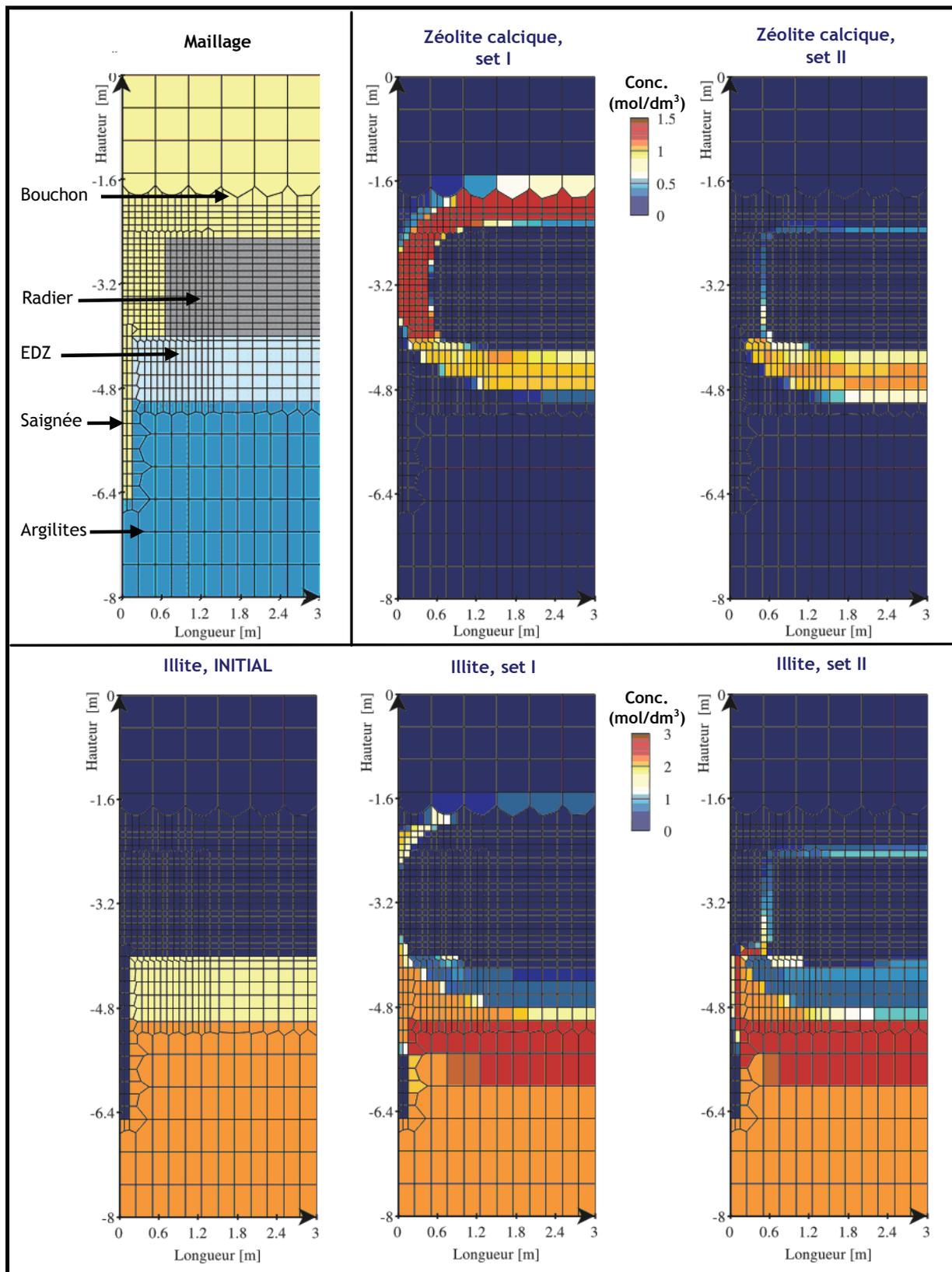


Figure T5-6 - Évolution minéralogique du système d'ancrage à proximité du radier après 100 000 ans d'interaction en fonction du type de matériau constitutif de l'ouvrage de scellement : mélange bentonite-sable (set I) ou bentonite pure (set II). Hypothèse minéralogique C ; géométrie 3D cylindrique.

Configuration	Ciment	Paramètres hydrodynamiques Diffusion effective (m <sup>2</sup> /s)	Minéralogie	Transformations minéralogiques majeures		Panache alcalin atténué (pH = 10)	
				Extension à 10 <sup>4</sup> ans	Extension à 10 <sup>5</sup> ans	Extension à 10 <sup>4</sup> ans	Extension à 10 <sup>5</sup> ans
« Déchets B » calculs 1D, non radial	CEM-I (pH = 13,3), longueur = 3 m	Ciment 2,0 10 <sup>-11</sup> Argilites 1,5 10 <sup>-11</sup> EDZ 3,5 10 <sup>-10</sup> (épaisseur = 1 m)	Hypothèse B	0,25 m	0,75 m	1,5 m	4 m
			Hypothèse C	0,5 m	1,5 m	0,5 m	1,5 m
« Déchets C » calculs 3D, cylindriques	CEM-I (pH = 13,3), longueur = 4 m	Ciment 2,0 10 <sup>-11</sup> MX80 2,0 10 <sup>-10</sup>	Hypothèse B	0,1 m	0,2 m	1 m	1,5 m
			Hypothèse C	0,2 m	0,5 m	0,2 m	0,5 m
« Combustibles usés » calculs 1D, non radial	CEM-I (pH = 13,3), longueur = 1 m	Ciment 2,0 10 <sup>-11</sup> MX80 4,0 10 <sup>-12</sup>	Hypothèse B	0,01 m	0,2 m	0,3 m	1,5 m
			Hypothèse C	0,01 m	0,25 m	0,01 m	0,1 m
« Combustibles usés » calculs 1D, non radial	CEM-I (pH = 13,3), longueur = 1 m	Ciment 2,0 10 <sup>-11</sup> MX80 2,0 10 <sup>-10</sup>	Hypothèse B	0,3 m	0,8 m	2 m	6 m
			Hypothèse C	0,4 m	1,5 m	0,4 m	1,5 m
		Ciment 2,0 10 <sup>-11</sup> MX80 3,0 10 <sup>-12</sup>	Hypothèse B	-	-	0,8 m	2,0 m

Tableau T5-2 - Synthèse des résultats de modélisation pour les configurations « alvéole de déchets B », « alvéole de déchets C » et « alvéole de CU ».

## Références bibliographiques citées dans la présente Annexe T5

- [ADLE01] Adler, M., 2001. Interaction of claystone and hyperalkaline solutions at 30°C: a combined experimental and modeling study. Ph.D. thesis, Bern University (Switzerland).
- [ALON04] Alonso, J., Becker, D.A., Storck, R., Besnus, F., Pellegrini, D., Serres, C., Johnson, L., Hart, J., Marivoet, J., Sillen, X., Vieno, T., Nordman, H., Petkovsek, B. (2004). Bentonite barriers in integrated performance assessment (BENIPA). E.C., Luxembourg, report EUR 21023 EN.
- [DEWI04a] De Windt, L., Pellegrini, D., van der Lee, J., 2004. Coupled modeling of cement/claystone interactions and radionuclides migration. *J. Cont. Hydr.* 68, 165-182.
- [DEWI04b] De Windt, L., Pellegrini, D., van der Lee, J., 2004. Reactive transport modeling of a spent fuel repository in a stiff clay formation considering excavation damaged zones. *Radiochim. Acta* 92, 841-848.
- [GARC04] García-Gutiérrez, M., Cormenzana, J., Missana, T., Mingarro, M., 2004. Diffusion coefficients and accessible porosity for HTO and <sup>36</sup>Cl in compacted FEBEX bentonite. *Appl. Clay Sc.* 26, 65-73.
- [GAUC04] Gaucher, E., Blanc, P., Matray, J.M., Michau, N., 2004. Modeling diffusion of an alkaline plume in a clay barrier. *Appl. Geoch.* 19(10), 1505-1515.
- [LEE03] van der Lee, J., De Windt, L., Lagneau, V., Goblet, P., 2003. Module-oriented modeling of reactive transport with {HYTEC}. *Comp. Geosc.* 29, 265-275.
- [LICH98] Lichtner, P.C., Pabalan, R.P., Steefel, C.I., 1998. Model calculation of porosity reduction resulting from cement-tuff diffusive interaction. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 506, 709.
- [MELK04] Melkior, T., Mourzagh, D., Yahiaoui, S., Thoby, D., Alberto, J., Brouard, C., Michau, N., 2004. Diffusion of an alkaline fluid through clayey barriers and its effect on the diffusion properties of some chemical species. *Appl. Clay Sc.* 26, 99-107.
- [MICH05] Michau, N., et al, in press. Effects of Cement on CLAY barrier performance - phase II. Tech. Rep. Project FIKW-CT-2000-00028, European Union.
- [NAKA04] Nakayama, S., Sakamoto, Y., Yamaguchi, T., Akai, M., Tanaka, T., Sato, T., Iida, Y., 2004. Dissolution of montmorillonite in compacted bentonite by highly alkaline aqueous solutions and diffusivity of hydroxide ions. *Appl. Clay Sc.* 27, 53-65.
- [READ01] Read, D., Glasser, F.P., Ayora, C., Guardiola, M.P., Sneyers, A., 2001. Mineralogical and microstructural changes accompanying the interaction of Boom Clay with ordinary Portland cement. *Adv. Cement Res.* 13(4), 175-183.
- [SAVA01] Savage, D., Noy, D., Mihara, M., 2002. Modelling the interaction of bentonite with hyperalkaline fluids. *Appl. geoch.* 17, 207-223.
- [SOLE03] Soler, J.M., 2003. Reactive transport modeling of the interaction between a high-pH plume and a fractured marl: the case of Wellenberg. *Appl. geoch.* 18, 1555-1571.
- [VANL05] Van Loon, L., Müller, W., Iijima, K., 2005. Activation energies of the self-diffusion of HTO, <sup>22</sup>Na<sup>+</sup> and <sup>36</sup>Cl<sup>-</sup> in a highly compacted argillaceous rock (Opalinus Clay). *Appl. Geoch.* 20(5), 961-972.
- [VIEI04] Vieillard, P., Ramírez, S., Bouchet, A., Cassagnabère, A., Meunier, A., Jacquot, E., 2004. Alteration of the Callovo-Oxfordian clay from Meuse-Haute Marne underground laboratory (France) by alkaline solution. II. Modelling of mineral reactions. *Appl. geoch.* 19(11), 1699-1709.
- [WERS04] Wersin, P., Curti, E., Appelo, C., 2004. Modelling bentonite-water interactions at high solid/liquid ratios: swelling and diffuse double layer effects. *Appl. Clay Sc.* 26, 249-257.

## Annexe T6 - Valeurs des paramètres retenus par l'ANDRA pour les scénarios d'évolution du stockage

Perméabilité [m/s]									
Béton		EDZ fracturée		EDZ microfissurée		Callovo-Oxfordien		Argile gonflante	
référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité
1,00E-06	2,00E-13	5,00E-09	1,00E-06	5,00E-11	5,00E-09	5,00E-14	5,00E-13	1,00E-11	1,00E-09
						5,00E-13	5,00E-12		

Porosité cinématique [-]											
		Béton		EDZ fracturée		EDZ microfissurée		Callovo-Oxfordien		Argile gonflante	
	période	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité
Be10	1600000	15%		9%		9%		9%		18%	
C14	5730	15%		9%		9%		9%		18%	
Cl36	302000	15%		9%		9%		9%		18%	
Ca41	103000	15%		9%		9%		9%		18%	
Ni59	75000	15%		9%		9%		9%		18%	
Se79	65000	15%		9%		9%		9%		18%	
Zr93	1530000	15%		9%		9%		9%		18%	
Mo93	3500	15%		9%		9%		9%		18%	
Nb93m	16,4	15%		9%		9%		9%		18%	
Nb94	20300	15%		9%		9%		9%		18%	
Tc99	213000	15%		9%		9%		9%		18%	
Pd107	6500000	15%		9%		9%		9%		18%	
Sn126	100000	15%		9%		9%		9%		18%	
I129	1,6E+07	15%		9%		9%		9%		18%	
Ho166m	1200	15%		9%		9%		9%		18%	
Cs135	2300000	15%		9%		9%		9%		18%	

		Porosité accessible à la diffusion [-]									
		Béton		EDZ fracturée		EDZ microfissurée		Callovo-Oxfordien		Argile gonflante	
	période	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité
Be10	1600000	30%	10%	20%		18%	21%	18%	21%	36%	
C14	5730	30%	10%	15%		5%	4%	5%	4%	5%	
Cl36	302000	30%	10%	15%		5%	4%	5%	4%	5%	
Ca41	103000	30%	10%	20%		18%	21%	18%	21%	36%	
Ni59	75000	30%	10%	20%		18%	21%	18%	21%	36%	
Se79	65000	30%	10%	15%		5%	4%	5%	4%	5%	
Zr93	1530000	30%	10%	20%		18%	21%	18%	21%	36%	
Mo93	3500	30%	10%	15%		5%	4%	5%	4%	5%	
Nb93m	16,4	30%	10%	15%		5%	4%	5%	4%	5%	
Nb94	20300	30%	10%	15%		5%	4%	5%	4%	5%	
Tc99	213000	30%	10%	20%		18%	21%	18%	21%	36%	
Pd107	6500000	30%	10%	20%		18%	21%	18%	21%	36%	
Sn126	100000	30%	10%	20%		18%	21%	18%	21%	36%	
I129	1,6E+07	30%	10%	15%		5%	4%	5%	4%	5%	
Ho166m	1200	30%	10%	20%		18%	21%	18%	21%	36%	
Cs135	2300000	30%	10%	20%		18%	21%	18%	21%	36%	

		Coefficient de diffusion effective [m <sup>2</sup> /s]									
		Béton		EDZ fracturée		EDZ microfissurée		Callovo-Oxfordien		Argile gonflante	
	période	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité
Be10	1600000	6,00E-10	2,00E-13	5,00E-10		2,50E-10	5,00E-10	2,50E-10	5,00E-10	5,00E-10	
C14	5730	6,00E-10	2,00E-13	1,00E-11		5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	
Cl36	302000	6,00E-10	2,00E-13	1,00E-11		5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	
Ca41	103000	6,00E-10	2,00E-13	5,00E-10		2,50E-10	5,00E-10	2,50E-10	5,00E-10	5,00E-10	
Ni59	75000	6,00E-10	2,00E-13	5,00E-10		2,50E-10	5,00E-10	2,50E-10	5,00E-10	5,00E-10	
Se79	65000	6,00E-10	2,00E-13	1,00E-11		5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	
Zr93	1530000	6,00E-10	2,00E-13	5,00E-10		2,50E-10	5,00E-10	2,50E-10	5,00E-10	5,00E-10	
Mo93	3500	6,00E-10	2,00E-13	1,00E-11		5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	
Nb93m	16,4	6,00E-10	2,00E-13	1,00E-11		5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	
Nb94	20300	6,00E-10	2,00E-13	1,00E-11		5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	
Tc99	213000	6,00E-10	2,00E-13	5,00E-10		2,50E-10	5,00E-10	2,50E-10	5,00E-10	5,00E-10	
Pd107	6500000	6,00E-10	2,00E-13	5,00E-10		2,50E-10	5,00E-10	2,50E-10	5,00E-10	5,00E-10	
Sn126	100000	6,00E-10	2,00E-13	5,00E-10		2,50E-10	5,00E-10	2,50E-10	5,00E-10	5,00E-10	
I129	1,6E+07	6,00E-10	2,00E-13	1,00E-11		5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	1,00E-11	5,00E-12	
Ho166m	1200	6,00E-10	2,00E-13	5,00E-10		2,50E-10	5,00E-10	2,50E-10	5,00E-10	5,00E-10	
Cs135	2300000	6,00E-10	2,00E-13	5,00E-10		2,50E-10	5,00E-10	2,50E-10	5,00E-10	5,00E-10	

		Coefficient de diffusion de pore [m <sup>2</sup> /s]									
		Béton		EDZ fracturée		EDZ microfissurée		Callovo-Oxfordien		Argile gonflante	
	période	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité
Be10	1600000	2,00E-09	2,00E-12	2,50E-09	2,00E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	
C14	5730	2,00E-09	2,00E-12	6,67E-11	2,00E-09	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	
Cl36	302000	2,00E-09	2,00E-12	6,67E-11	2,00E-09	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	
Ca41	103000	2,00E-09	2,00E-12	2,50E-09	2,00E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	
Ni59	75000	2,00E-09	2,00E-12	2,50E-09	2,00E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	
Se79	65000	2,00E-09	2,00E-12	6,67E-11	2,00E-09	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	
Zr93	1530000	2,00E-09	2,00E-12	2,50E-09	2,00E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	
Mo93	3500	2,00E-09	2,00E-12	6,67E-11	2,00E-09	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	
Nb93m	16,4	2,00E-09	2,00E-12	6,67E-11	2,00E-09	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	
Nb94	20300	2,00E-09	2,00E-12	6,67E-11	2,00E-09	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	
Tc99	213000	2,00E-09	2,00E-12	2,50E-09	2,00E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	
Pd107	6500000	2,00E-09	2,00E-12	2,50E-09	2,00E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	
Sn126	100000	2,00E-09	2,00E-12	2,50E-09	2,00E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	
I129	1,6E+07	2,00E-09	2,00E-12	6,67E-11	2,00E-09	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	2,50E-10	1,00E-10	
Ho166m	1200	2,00E-09	2,00E-12	2,50E-09	2,00E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	
Cs135	2300000	2,00E-09	2,00E-12	2,50E-09	2,00E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	2,38E-09	1,39E-09	

		Kd [m <sup>3</sup> /kg]									
		Béton		EDZ fracturée		EDZ microfissurée		Callovo-Oxfordien		Argile gonflante	
	période	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité
Be10	1600000			0,001		0,001		0,001		0,001	
C14	5730	0,5		0,0001		0,0001		0,0001		0	
Cl36	302000	0		0		0		0		0	
Ca41	103000	0,5		0,00118		0,00118		0,00118		0,001	
Ni59	75000	2		0,16	0,1	0,16	0,1	0,16	0,1	0,5	0,1
Se79	65000	0,1	0,0015	0		0		0		0	
Zr93	1530000	40	10	1	0,1	1	0,1	1	0,1	100	10
Mo93	3500	0		0,003		0,003		0,003		0	
Nb93m	16,4	10	0,1	1,16	0,75	1,16	0,75	1,16	0,75	10	1
Nb94	20300	10	0,1	1,16	0,75	1,16	0,75	1,16	0,75	10	1
Tc99	213000	0		10	2	10	2	10	2	30	10
Pd107	6500000	0,6	0,1	0,7	0,16	0,7	0,16	0,7	0,16	0,9	0,9
Sn126	100000	10	0,1	14	6	14	6	14	6	11	3
I129	1,6E+07	0,001		0	0,001	0	0,001	0	0,001	0	
Ho166m	1200	100	30	50	5	50	5	50	5	12	1,2
Cs135	2300000	0,01	0,0005							0,1	0,06

		Retard [-]									
		Béton		EDZ fracturée		EDZ microfissurée		Callovo-Oxfordien		Argile gonflante	
	période	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité
Be10	1600000	1		29000 290**	1	31900 320**	1	31900 320**	1	973 98**	1
C14	5730	3500		2,5	1	5,6	1	5,6	1	1	
Cl36	302000	1		1		1		1		1	
Ca41	103000	3500		16 3**	1	16 3**	1	16 3**	1	6 1,5**	1
Ni59	75000	14000		1800	1150	2050	1100	2050	1100	2430	487
Se79	65000	700		1		1		1		1	
Zr93	1530000	280000		12000	1150	12800	1100	12800	1100	486000	48600
Mo93	3500	1		47	1	139	1	139	1	1	1
Nb93m	16,4	70000		18000	11500	53400	43100	53400	43100	350000	35000
Nb94	20300	70000		18000	11500	53400	43100	53400	43100	350000	35000
Tc99	213000	1		120000	23400	128000	21900	128000	21900	146000	48600
Pd107	6500000	4200		8100	1840	8950	1750	8950	1750	4380	4380
Sn126	100000	70000		160000	69400	179000	65700	179000	65700	53500	14600
I129	1,6E+07	8	28	1	16	1	47	1	47	1	
Ho166m	1200	700000		580000	5750	639000	5480	639000	5480	58300	5830
Cs135	2300000	71		Langmuir*		Langmuir*		Langmuir*		487 50**	290 30**

\* isotherme de Langmuir : Cadsorbée =  $1,8462e-7/(4,75e-7+Cequilibre)$     \*\* ( $\Delta T > 20$  °C)

		Csat [mol/m³]									
		Béton		EDZ fracturée		EDZ microfissurée		Callovo-Oxfordien		Argile gonflante	
	période	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité	référence	sensibilité
Be10	1600000	soluble	0,00E+00	1,00E-02	1,00E+01	1,00E-02	1,00E+01	1,00E-02	1,00E+01	1,00E-02	1,00E+01
C14	5730	1,00E-02	4,00E-02	2,30E+00	9,00E+00	2,30E+00	9,00E+00	2,30E+00	9,00E+00	2,30E+00	9,00E+00
Cl36	302000	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble
Ca41	103000	2,00E+01	3,00E+01	2,30E+00	9,00E+00	2,30E+00	9,00E+00	2,30E+00	9,00E+00	2,30E+00	9,00E+00
Ni59	75000	2,30E-04	1,30E-03	5,00E-02	1,00E+00	5,00E-02	1,00E+00	5,00E-02	1,00E+00	5,00E-02	1,00E+00
Se79	65000	1,30E-02	5,00E+00	5,00E-07	5,00E-04	5,00E-07	5,00E-04	5,00E-07	5,00E-04	5,00E-07	5,00E-04
Zr93	1530000	6,00E-03	5,00E-02	2,00E-05	3,00E-03	2,00E-05	3,00E-03	2,00E-05	3,00E-03	2,00E-05	3,00E-03
Mo93	3500	7,00E-04	1,00E+00	1,00E-05	1,00E-03	1,00E-05	1,00E-03	1,00E-05	1,00E-03	1,00E-05	1,00E-03
Nb93m	16,4	2,40E-04	6,00E-02	2,00E-04	2,00E-03	2,00E-04	2,00E-03	2,00E-04	2,00E-03	2,00E-04	2,00E-03
Nb94	20300	2,40E-04	6,00E-02	2,00E-04	2,00E-03	2,00E-04	2,00E-03	2,00E-04	2,00E-03	2,00E-04	2,00E-03
Tc99	213000	soluble	soluble	4,00E-06	1,00E-04	4,00E-06	1,00E-04	4,00E-06	1,00E-04	4,00E-06	1,00E-04
Pd107	6500000	1,00E-02	1,00E-02	4,00E-04	1,00E-02	4,00E-04	1,00E-02	4,00E-04	1,00E-02	4,00E-04	1,00E-02
Sn126	100000	3,00E-05	5,70E-04	1,00E-05	1,00E-04	1,00E-05	1,00E-04	1,00E-05	1,00E-04	1,00E-05	1,00E-04
I129	1,6E+07	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble
Ho166m	1200	2,00E-03	1,00E-02	1,00E-04	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-03
Cs135	2300000	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble	soluble

## Annexe T7 - Simulations de la migration de radionucléides réalisées par l'IRSN

L'IRSN a réalisé un modèle numérique du stockage des combustibles usés (cf. Figure T7-1). Ce modèle n'est pas strictement identique à celui réalisé par l'ANDRA (le code de calcul et le maillage utilisés sont différents) mais s'appuie sur les principales hypothèses de l'ANDRA (inventaires, cinétiques des relâchements d'activité (cf. Tableau T7-5), propriétés chimiques et hydrauliques des différents composants et de la formation hôte) et sur les principes généraux d'architecture du stockage définis par l'ANDRA (dimensions des ouvrages, alvéoles borgnes, regroupement des alvéoles en modules, emplacements des scellements, galerie de liaison entre la zone de stockage et le puits d'accès...).

Les transferts de  $^{129}\text{I}$ , du  $^{79}\text{Se}$  et du  $^{36}\text{Cl}$  ont été simulés depuis les alvéoles de stockage jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien avec le code MELODIE.

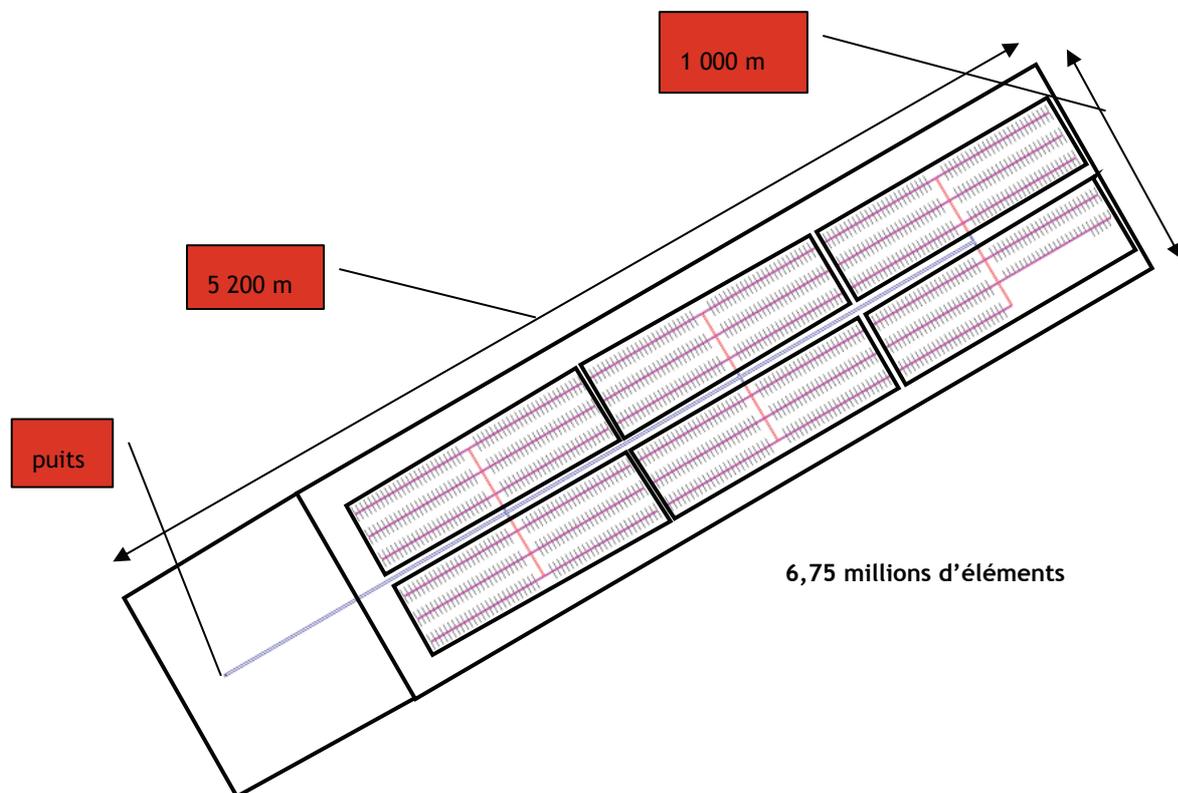


Figure T7-1 - Schéma du modèle numérique de la zone de stockage CU1 connectée au puits d'accès (coupe horizontale dans l'axe des tunnels).

### A. Calcul relatif au scénario d'évolution normale

Selon les résultats de ce calcul, les débits molaires de  $^{129}\text{I}$ , du  $^{79}\text{Se}$  et du  $^{36}\text{Cl}$  transitant vers les encaissements au travers de l'installation de stockage et du Callovo-Oxfordien ainsi que les temps caractéristiques des transferts d'activité au toit de la formation hôte sont du même ordre de grandeur que ceux estimés par l'ANDRA.

Les débits molaires calculés au toit et au mur du Callovo-Oxfordien (COX) sont synthétisés dans le Tableau T7-1 et la Figure T7-2. La formation hôte est la principale voie de transfert des radionucléides.

	Valeur du débit molaire maximal (mol/an)	Temps d'obtention du débit molaire maximal (an)	Pourcentage d'activité sortant du Callovo-Oxfordien par rapport à l'activité totale (%)
$^{129}\text{I}$	9,24 E-02	240 000	77,6
$^{36}\text{Cl}$	6,19 E-04	180 000	32,1
$^{79}\text{Se}$	1,39 E-06	1 000 000	0,04

Tableau T7-1 - Synthèse des résultats pour le COX sain.

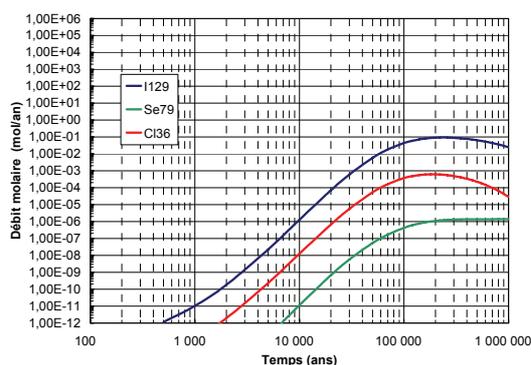


Figure T7-2 - Débit molaire au sortir du Callovo-Oxfordien - CU1 - gradient ascendant 0,2 m/m.

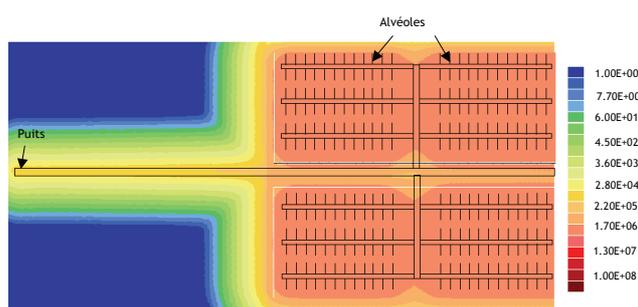


Figure T7-3 - Cartographie des concentrations d' $^{129}\text{I}$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) à 500 000 ans pour les colis CU1.

### B. Calcul relatif au scénario d'évolution altérée « défaut de scellement »

Ce scénario, basé sur le modèle numérique d'une zone de stockage de combustibles usés précédemment décrit, a pour objectif d'estimer l'influence de la défaillance de l'ensemble des scellements de puits et de la zone de stockage sur la migration des radionucléides au sein de l'installation et de la formation hôte. La défaillance des divers scellements est modélisée selon le mode de calcul retenu par l'ANDRA (cf. Figure T7-4).

Sur la base des résultats de ce modèle, on observe que les tendances obtenues par le modèle de l'IRSN sont similaires à celles observées par l'ANDRA, à savoir la prédominance de la voie de transfert au travers du Callovo-Oxfordien par rapport à la voie de transfert par les ouvrages.

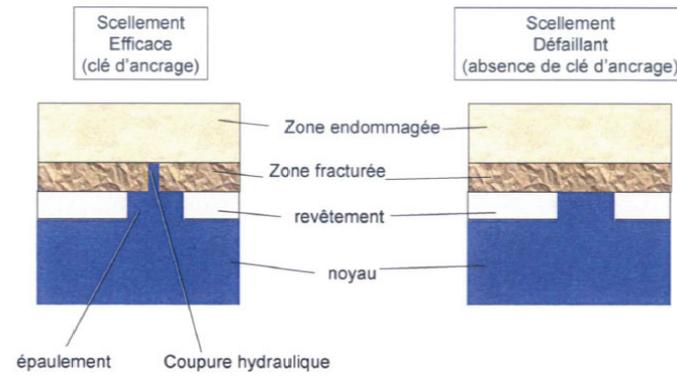


Figure T7-4 - Principe de modélisation d'un scellement défaillant.

Sortie	Valeur du débit molaire maximal (mol/an)		Temps d'obtention du débit molaire maximal (an)		Pourcentage d'activité sortant du Callovo-Oxfordien par rapport à l'activité totale (%)	
	Puits	COX sain	Puits	COX sain	Puits	COX sain
$^{129}\text{I}$	2,09 E-03	9,13 E-02	260 000	240 000	2,1	75

Tableau T7-2 - Synthèse des résultats pour le puits et le Callovo-Oxfordien (COX) sain.

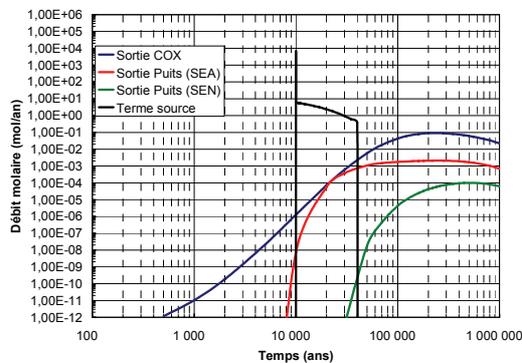


Figure T7-5 - Débit molaire au sortir du puits et du Callovo-Oxfordien - CU1 -  $^{129}\text{I}$  - gradient ascendant 0,2 m/m.

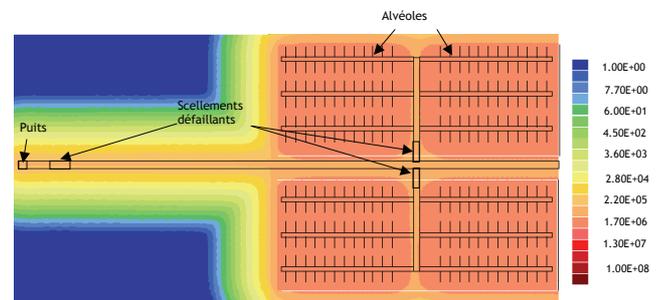


Figure T7-6 - Cartographie des concentrations d' $^{129}\text{I}$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) à 500 000 ans pour les colis CU1.

### C. Estimation de l'influence d'une faille secondaire à proximité des alvéoles de stockage

Afin d'évaluer l'influence d'une faille secondaire à proximité des alvéoles de stockage, l'IRSN a imaginé dans le modèle de calcul représentant une zone de stockage de déchets CU1 une faille interceptant la galerie d'accès au puits. Cette faille est supposée reconnue lors du creusement de la galerie et une distance de garde de 60 m est appliquée entre la faille et les premiers alvéoles de stockage. En première approche, la faille est supposée peu perméable au regard des transmissivités possibles de structures équivalentes observées à Tournemire [155]. La porosité cinématique, les paramètres de transport et géochimiques de la faille (cf. Tableau T7-3) sont similaires à ceux de la roche hôte non-fracturée tels que définis par l'ANDRA. Afin de se placer directement dans une situation a priori pénalisante, il est fait l'hypothèse que la faille n'est pas scellée à l'intersection avec la galerie. Pour ce

qui concerne les autres ouvrages de liaison ainsi que les tunnels de stockage, les scellements et bouchons en argile gonflante sont ancrés dans l'EDZ. Un gradient hydraulique ascendant de 0,2 m/m est appliqué sur l'ensemble du modèle. Le terme source de l'<sup>129</sup>I est issu des modèles de relâchement utilisés par l'ANDRA pour les combustibles CU1 (cf. Tableau T7-5).

	Perméabilité (m/s)	Coefficient de diffusion effective (m <sup>2</sup> /s)	Porosité accessible à la diffusion (%)	Porosité cinématique (%)	Retard (-)	Limite de solubilité (mol/m <sup>3</sup> )
<sup>129</sup> I	1,00 E-10	5,00 E-12	5	9	1	soluble

Tableau T7-3 - Paramètres de la faille.

Les débits molaires sont calculés au toit et au mur du Callovo-Oxfordien. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau T7-4 et les Figures T7-7 et T7-8. Les flux sortant par la faille sont inférieurs de 3 ordres de grandeur au flux sortant par la roche saine du Callovo-Oxfordien. Le débit molaire et le temps de transfert au travers du Callovo-Oxfordien non-fracturé sont similaires à ceux obtenus sans présence de la faille (voir partie A de la présente Annexe).

Sortie	Valeur du débit molaire maximal (mol/an)		Temps d'obtention du débit molaire maximal (an)		Pourcentage d'activité sortant du Callovo-Oxfordien par rapport à l'activité totale (%)	
	Faille	COX sain	Faille	COX sain	Faille	COX sain
<sup>129</sup> I	1,06 E-04	9,24 E-02	350 000	240 000	0,1	77,6

Tableau T7-4 - Synthèse des résultats pour la faille et le Callovo-Oxfordien (COX) sain.

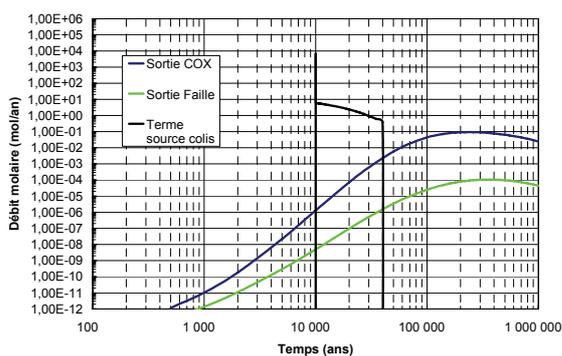


Figure T7-7 - Débit molaire au droit d'une faille secondaire et au sortir du Callovo-Oxfordien - CU1 - <sup>129</sup>I - gradient ascendant 0,2 m/m.

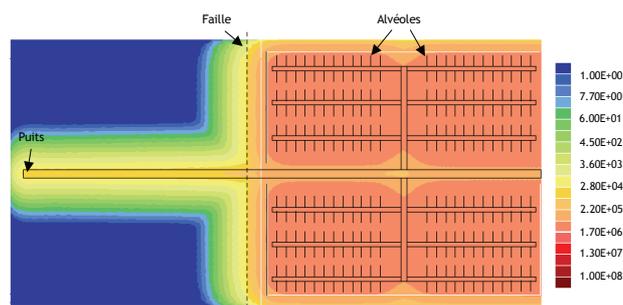


Figure T7-8 - Cartographie des concentrations d'<sup>129</sup>I (Bq/m<sup>3</sup>) à 500 000 ans pour les colis CU1.

#### D. Synthèse des modèles de relâchement des combustibles usés

Le Tableau T7-5 est une synthèse des modèles et valeurs de paramètres de l'ANDRA retenus par l'IRSN pour réaliser ses calculs de migration de radionucléides.

CU	Fraction labile	CU1 (UOX2)	Taux de combustion (GWj.t <sup>-1</sup> )	45	
			<sup>79</sup> Se, <sup>135,137</sup> Cs, <sup>126</sup> Sn, <sup>36</sup> Cl	2,1 %	
			Autres RN	1,8 %	
			<sup>14</sup> C	10 %	
		CU1 (UOX3 et URE)	Taux de combustion (GWj.t <sup>-1</sup> )	55 (45 pour les URE)	
			<sup>79</sup> Se, <sup>135,137</sup> Cs, <sup>126</sup> Sn, <sup>36</sup> Cl	7,3 %	
			Autres RN	4,9 %	
			<sup>14</sup> C	10 %	
		CU2 (MOX)	Taux de combustion (GWj.t <sup>-1</sup> )	48	
			<sup>79</sup> Se, <sup>135,137</sup> Cs, <sup>126</sup> Sn, <sup>36</sup> Cl	33,9 %	
			Autres RN	30 %	
			<sup>14</sup> C	10 %	
		Taux de relâchement par dissolution D3Al	des colis non défaillants	5 %	
			des colis défaillants	5 %	
		Dissolution radiolytique (an <sup>-1</sup> )			3 10 <sup>-5</sup>
		Taux de relâchement (an <sup>-1</sup> )	PA du zircaloy	3,5 10 <sup>-5</sup>	
PA de l'inconel (ressorts)	2 10 <sup>-3</sup>				
PA des aciers inox	4 10 <sup>-4</sup>				
Reste de l'inventaire en RN	Labile				
Modèle alternatif de dissolution classique (mol.l <sup>-1</sup> ) (limite de solubilité)			7 10 <sup>-7</sup>		

Tableau T7-5 - Synthèse des modèles de relâchement des combustibles usés.



## Annexe T8 - Performances de confinement des barrières d'une installation de stockage des déchets radioactifs (BENIPA)

Les résultats présentés ci-après sont issus de l'exercice européen BENIPA<sup>35</sup> et concernent l'évaluation des performances de confinement des barrières ouvragées en bentonite (barrière de voisinage, bouchon d'alvéole) et des scellements<sup>36</sup>. Cette évaluation est réalisée sur la base d'une analyse de sensibilité des flux d'activité relâchés à trois scénarios d'évolution du stockage. Ces trois scénarios déclinent trois états de fonctionnement possibles des scellements représentatifs d'une évolution normale ou dégradée du stockage.

Le modèle numérique développé comprend également les divers éléments d'un stockage pouvant constituer des chemins préférentiels de transfert de l'activité relâchée par les colis : la zone endommagée autour des excavations, une galerie de liaison et un puits connectant les ouvrages profonds à la surface (Figure T8-1). La formation d'argilite, encadrée par deux aquifères inférieur et supérieur, est traversée par une structure conductrice mineure subverticale postulée afin d'induire un transfert local convectif au sein de la formation hôte diffuse. La galerie et le puits sont remblayés par un matériau poreux et relativement perméable. Les bouchons et scellements de bentonite sont placés respectivement en bout de tunnel et dans la galerie de liaison. Ils sont supposés intercepter la zone endommagée mais afin de rendre compte des incertitudes de conception et d'évaluer l'influence des dispositifs de scellement sur les régimes hydrauliques à l'intérieur du stockage, cette fonction peut être considérée ou non dans la modélisation. Un des scellements représentés est supposé intercepter la structure conductrice postulée traversant la formation hôte.

Les performances de confinement des trois types de barrières ouvragées en bentonite sont évaluées sur la base de l'atténuation des flux d'activité relâchés par les colis qu'elles procurent pour les trois scénarios d'évolution suivants :

- un scénario de « référence » (intitulé « Cas de référence » dans le Tableau T8-1) pour lequel tous les scellements interceptent la zone endommagée,
- un scénario de comportement altéré des scellements (intitulé « Défaut de scellement » dans le Tableau T8-1) visant à simuler un défaut d'ancrage dans la zone endommagée (dans ce cas, la zone endommagée contourne le bouchon du scellement),
- un scénario « extrême » (intitulé « Sans scellement » dans le Tableau T8-1) postulant l'inefficacité du scellement dont les propriétés sont équivalentes dans ce cas à celles d'un matériau de remplissage.

Les flux d'activité sont calculés à l'aide du code MELODIE au droit du puits, au toit de la formation hôte et au droit de la structure drainante (Figure T8-2).

La Figure T8-2 représente les flux d'activité normalisés calculés aux interfaces précitées en fonction du temps et des trois scénarios d'évolution pour plusieurs radionucléides (<sup>129</sup>I, <sup>14</sup>C, <sup>79</sup>Se, <sup>94</sup>Nb et <sup>135</sup>Cs) choisis en fonction de leurs caractéristiques et propriétés de transfert dans les milieux argileux. Les principaux résultats déduits notamment de la comparaison entre, d'une part les trois scénarios d'évolution du stockage et d'autre part le comportement de l'<sup>129</sup>I (radionucléide à vie longue, non sorbé et soluble) et du <sup>135</sup>Cs (radionucléide à vie longue, sorbé et soluble) sont les suivants (cf. Tableau T8-1) :

<sup>35</sup> BENIPA est un exercice européen du 6<sup>ème</sup> PCRD Euratom dédié à l'évaluation des performances des barrières ouvragées en bentonite auquel l'IRSN a participé entre 2000 et 2003.

<sup>36</sup> *Lessons learnt from IRSN modelling performed for the 5th EC PCRD BENIPA exercise* - D. Pellegrini, F. Besnus, C. Certes, F. Deleruyelle, C. Serres, *EUROSAFE, Paris (2003)*.

Lorsque les scellements interceptent la zone fracturée et constituent des zones de faible perméabilité, le régime dominant dans la galerie et le puits est diffusif. En revanche, lorsque les scellements n'interceptent pas la zone fracturée, on observe l'établissement d'un régime de transfert pour lequel l'influence de la convection est plus marquée dans la galerie et le puits : les flux d'activité sont plus élevés et apparaissent plus tôt dans le puits. La convection devient dominante lorsque les bouchons (corps de scellement) ont des propriétés de confinement équivalentes à celles d'un remblai: les ouvrages court-circuitent la formation hôte, les temps de transfert diminuent significativement et les flux en sortie de puits sont plus importants (Figure T8-2).

Dans ce dernier cas, les propriétés de sorption a priori favorables de la bentonite jouent un rôle sur le transfert des radionucléides de vie moyenne qui décroissent durant le transfert ( $^{94}\text{Nb}$ ). Toutefois, pour des radionucléides à vie longue comme le  $^{135}\text{Cs}$ , ces effets favorables de retard ne sont pas sensibles sur une faible distance telle que celle correspondant au rayon d'une couronne de barrière ouvragée de voisinage. En effet, on observe dans le Tableau T8-1, colonne « Cas sans scellement, Puits », les mêmes ordres de grandeur d'activité relâchée au droit du puits que le  $^{135}\text{Cs}$  soit sorbé ou non dans la barrière ouvragée de voisinage (valeurs respectivement de 3,18 % contre 3,6 %).

Lorsque les scellements interceptent la zone fracturée, le transfert d'activité est contrôlé par les propriétés de confinement de la formation hôte. Mais même dans l'hypothèse très pessimiste où les scellements ont disparu (« Cas sans scellement ») la formation hôte, de par ses propriétés de sorption équivalentes à celles de la bentonite et un volume accessible évidemment sans commune comparaison avec celui offert par la barrière de voisinage en bentonite, contribue toujours à retarder et à atténuer les transferts d'activité de certains radionucléides tout au long du parcours dans la galerie et le puits. Cet effet « pompe » de la formation hôte est quantifiable lorsqu'on compare, Tableau T8-1, les pourcentages d'activité relâchée au droit du puits pour l' $^{129}\text{I}$  et le  $^{135}\text{Cs}$  et correspond dans ce cas à un ordre de grandeur d'atténuation (11,3 % contre 1,33 % pour respectivement l' $^{129}\text{I}$  et le  $^{135}\text{Cs}$ ).

Sur la base de ces résultats, il est possible de hiérarchiser l'importance des différentes barrières en bentonite destinées à maintenir ou à rétablir un régime d'écoulement diffusif dans les ouvrages et de préciser le rôle et l'importance de la formation hôte en fonction des différents scénarios étudiés.

En premier lieu, les scellements dans la galerie constituent l'élément déterminant du contrôle du régime hydraulique à l'intérieur des ouvrages. Toutefois, ce résultat suppose que le niveau de performance requis pour interrompre efficacement la zone fracturée au droit des scellements est atteint in situ et que les propriétés favorables des scellements sont préservées des diverses interactions physico-chimiques susceptibles d'altérer la bentonite et les interfaces.

Pour ce qui concerne la barrière ouvragée de voisinage autour des colis, le temps de transfert des radionucléides à vie moyenne ou longue, peu sorbés ou solubles au travers d'une couronne de barrière ouvragée de quelques dizaines de centimètres est très rapide (de l'ordre de la centaine d'années). À l'exception des flux d'activité des radionucléides à vie courte qui seront effectivement atténués par une épaisseur de barrière ouvragée, le flux d'activité relâché par les colis est transmis à la zone endommagée sans que la décroissance radioactive ne permette d'atténuer ce flux. Ces observations sont également vraies pour le bouchon d'alvéole.

Pour ce qui concerne les radionucléides sorbés et peu solubles, un corps de barrière ouvragée, même formant une « boîte diffusive idéale » autour des colis, ne joue qu'un rôle mineur dans la limitation du transfert de radionucléides. Aussi, un corps de barrière ouvragée de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur apporte peu dans l'atténuation des flux d'activité relâchés par rapport d'une part à l'architecture borgne des tunnels qui permet de maintenir, quel que soit le scénario d'écoulement étudié, un régime diffusif autour des colis et, d'autre part, au rôle également très favorable des propriétés chimiques de la formation hôte elle-même, y compris dans la zone fracturée. En effet, dans l'hypothèse d'un écoulement convectif dans les galeries consécutif à la disparition des scellements, la formation hôte continue de jouer un rôle de « pompe » pour le panache de radionucléides.

Pourcentage d'activité relâchée aux droit de :	10 <sup>4</sup> ans	Cas de référence		Défaut de scellement		Cas sans scellement	
		Puits	Structure	Puits	Structure	Puits	Structure
		<sup>129</sup> I	-	5,26	-	4,2	11,3
<sup>14</sup> C	-	2,25	-	1,7	8,07	1,5	
<sup>135</sup> Cs*	-	-	-	-	1,33	-	
<sup>135</sup> Cs**	-	-	-	-	0,15	-	
10 <sup>6</sup> ans	<sup>129</sup> I	0,33	74,6	14,7	61	36	51
	<sup>79</sup> Se	0,006	29,1	3,3	24	21	21
	<sup>14</sup> C	1E-6	3,6	0,026	2,8	8,9	2,4
	<sup>135</sup> Cs*	-	0,038	-	0,009	3,6	1E-4
	<sup>135</sup> Cs**	-	0,022	-	0,006	3,18	-

\* : sorption dans la formation hôte

\*\* : sorption dans la formation hôte et la bentonite

Tableau T8-1 - proportion d'activité relâchée au droit du puits et d'une structure pour trois scénarios d'évolution du stockage (les cellules en bleu représentent l'effet pompe de l'argile et celles en rouge représentent l'influence de la sorption dans la barrière ouvragée de voisinage).

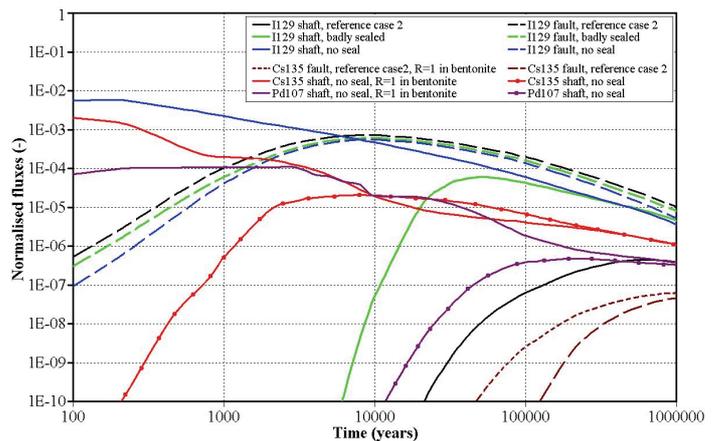
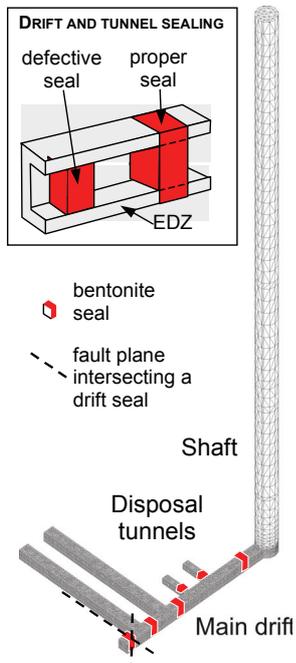


Figure T8-1 - Maillage 3D des ouvrages et zoom sur le principe de fonctionnement des scellements dans la zone endommagée

Figure T8-2 - Flux normalisés pour différentes situations d'évolution du stockage



# ANNEXES ADMINISTRATIVES



*Les annexes administratives ne sont pas disponibles pour le format informatique du présent rapport.*



# Liste des documents transmis par l'ANDRA et références bibliographiques

## Liste des documents transmis par l'ANDRA à la DGSNR

Dossier 2005 Argile, « niveaux 1 à 4 » (transmis par lettre ANDRA-DG/05-0149 du 4 juillet 2005)

	Titre	Référence
	<b>Dossier 2005 Argile « Niveau 1 »</b>	
[1]	Dossier 2005 Argile - Synthèse	
	<b>Dossier 2005 Argile « Niveau 2 »</b>	
[2]	Dossier 2005 Argile - Tome - Architecture et gestion du stockage géologique	C.RP.ADP.04.0001
[3]	Dossier 2005 Argile - Tome - Évolution phénoménologique du stockage géologique	C.RP.ADS.04.0025
[4]	Dossier 2005 Argile - Tome - Évaluation de sûreté du stockage géologique	C.RP.ADSQ.04.0022
	<b>Dossier 2005 Argile « Niveau 3 »</b>	
[5]	Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne (Présentation générale, 3 Tomes, Annexe)	C.RP.ADS.04.0022.A
[6]	Référentiel de connaissances et modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et à vie longue	C.RP.AHVL.04.0006.A
[7]	Référentiel de comportement des colis de déchets à haute activité et à vie longue	C.RP.ASCM.04.0017.A
[8]	Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue - Matériaux à base d'argiles gonflantes - Matériaux cimentaires - Corrosion des matériaux métalliques - Matériaux à base d'argilites excavées et remaniées (4 Tomes)	C.RP.ADS.04.0015.A
[9]	Référentiel de comportement des radionucléides et des toxiques chimiques d'un stockage dans le Callovo-Oxfordien jusqu'à l'homme. Site de Meuse/Haute-Marne (2 Tomes)	C.RP.ASTR.04.0032.A
	<b>Dossier 2005 Argile « Niveau 4 »</b>	
[10]	Synthèse hydrogéologique des calcaires du Barrois - Bilan des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le site de l'Est - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (2 Volumes)	D.RP.0HYN.03.004.B
[11]	Lot4 - Puits d'accès et auxiliaire - Rapport de synthèse du Kimméridgien Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (2 Volumes)	D.RP.0ANT.02.021.B
[12]	Oxfordien calcaire - Rapport de synthèse - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (2 Volumes)	D.RP.ADPE.04.1109.A
[13]	Callovo-Oxfordien - Rapport de synthèse - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (2 Volumes)	D.RP.ADPE.04.1110.B
[14]	Formation Dogger - Rapport de synthèse - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne	D.RP.ADPE.05.0302.A
[15]	Forage de reconnaissance de la formation - Synthèse FRF - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (2 Volumes)	D.RP.ADPE.04.1245.A
[16]	Forages scientifiques profonds - Synthèse FSP - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (3 Volumes)	D.RP.ADPE.03.0753.B
[17]	Le modèle géologique du Callovo-Oxfordien à l'état initial	C.NT.ASMG.03.0101.C
[18]	Les modèles géologique et hydrogéologique des formations géologiques encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien à l'état initial	C.NT.ASMG.03.0108.B

[19]	L'évolution géodynamique (Tectonique et Climatique) et son impact sur l'hydrogéologie et l'environnement de surface - Site de Meuse/Haute-Marne	C.NT.ASMG.03.0106.B
[20]	L'aléa sismique à long terme et son impact pour un stockage. Site de Meuse/Haute-Marne	C.NT.ASMG.03.0102.C
[21]	Analyse fonctionnelle externe d'un stockage en formation argileuse profonde	C.RP.AHVL.00.140.D
[22]	Analyse fonctionnelle interne d'un stockage en formation argileuse profonde, en phase d'exploitation-observation	C.RP.AHVL.01.033.D
[23]	Analyse fonctionnelle interne d'un stockage en formation argileuse profonde, en phase post-fermeture	C.RP.AHVL.01.031.D
[24]	Spécification technique de besoin d'un stockage en formation argileuse profonde	C.SP.AHVL.02.132.C
[25]	Colis de stockage de déchets B	C.NT.ASTE.04.0507.B
[26]	Colis de stockage de déchets C	C.NT.ASTE.04.0508.B
[27]	Colis de stockage de combustibles usés en formation argileuse profonde	C.NT.ASTE.04.0509.B
[28]	Conception, construction et fermeture d'alvéoles de stockage de déchets B en formation argileuse profonde	C.NT.ASTE.04.0510.B
[29]	Conception, construction et fermeture d'alvéoles de stockage de déchets vitrifiés et de combustibles usés en formation argileuse profonde	C.NT.ASTE.04.0511.B
[30]	Scellement et remblais des galeries et des puits d'un stockage en formation argileuse profonde	C.NT.AHVL.04.0030.A
[31]	Transfert et mise en alvéole des colis de stockage en formation argileuse profonde (Colis B, C et combustibles usés)	C.NT.ASTE.04.0512.A
[32]	Récupération des colis de stockage de déchets B, C et de combustibles usés avant et après scellement des alvéoles de stockage en formation argileuse profonde	C.NT.ASTE.04.0506.A
[33]	Sûreté opérationnelle : analyse de risque dans un stockage en formation argileuse profonde	C.NT.ASTE.04.0514.A
[34]	Analyse des niveaux de réversibilité d'un stockage en formation argileuse profonde	C.RP.AHVL.04.0028.B
[35]	Observation et surveillance d'un stockage en formation argileuse profonde	C.RP.AHVL.04.0029.A
[36]	Synthèse des études de sûreté - Criticité d'un stockage en formation argileuse profonde	C.NT.AMES.04.0041.A
[37]	L'évolution phénoménologique normale d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse/Haute-Marne - Les processus majeurs : nature, temps caractéristiques et principaux couplages	C.NT.ASIT.04.0012.B
[38]	La thermo-convection dans la couche du Callovo-Oxfordien et les formations géologiques encaissantes sous l'effet de la charge thermique d'un stockage	C.NT.ASTR.03.105.B
[39]	La charge thermique d'un stockage - Site de Meuse / Haute-Marne	C.NT.ASIT.03.118.C
[40]	La production et le transfert de gaz dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien - Lien avec le transitoire hydraulique	C.NT.ASCM.03.0042.B
[41]	Le transitoire hydraulique d'un stockage : décharge, désaturation - resaturation, retour à un état d'équilibre hydraulique	C.NT.ASIT.03.117.C
[42]	L'organisation des écoulements dans et autour du stockage après resaturation et retour à un état d'équilibre hydraulique - Site de Meuse/Haute-Marne	C.NT.ACSS.03.0111.A
[43]	Le modèle d'écoulement et de transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien sain et perturbé	C.NT.ASTR.03.0022.C
[44]	Le transfert de solutés dans les alvéoles de stockage des déchets B et dans le Callovo-Oxfordien en champ proche pendant la période de désaturation, resaturation et retour à un état d'équilibre hydraulique	C.NT.ACSS.03.0112.B
[45]	Le comportement mécanique d'alvéoles de stockage de déchets B dans le temps	C.RP.ASMG.03.0110.B
[46]	Le comportement mécanique d'alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés dans le temps	C.RP.ASMG.03.0109.B

[47]	Le comportement mécanique de scellements de galeries dans le temps	C.RP.ASMG.03.0111.A
[48]	Le comportement mécanique des scellements de puits dans le temps	C.RP.ASMG.03.0112.A
[49]	Effets d'un stockage sur le comportement mécanique à grande échelle de la couche du Callovo-Oxfordien et des formations géologiques encaissantes	C.NT.ASMG.04.0046.A
[50]	La chimie des eaux interstitielles dans la couche du Callovo-Oxfordien à l'état initial	C.NT.ASTR.03.023.C
[51]	Le transitoire Redox dans un stockage et dans le Callovo-Oxfordien en champ proche	C.NT.ASIT.03.127.B
[52]	Évaluation des possibilités de reconcentration de radionucléides au sein d'un stockage en formation argileuse profonde	C.NT.ASTR.03.0111.B
[53]	La corrosion des composants métalliques du stockage : les (sur)conteneurs de colis de déchets vitrifiés et de combustibles usés et les infrastructures métalliques	C.NT.ASCM.03.0046.C
[54]	L'évolution chimique des ouvrages d'un stockage à base d'argile gonflante : alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés et scellements de galeries et de puits	C.NT.ASCM.03.043.B
[55]	L'évolution chimique des ouvrages d'un stockage à base de béton : alvéoles de stockage de déchet B, appuis de scellements et de bouchons d'alvéoles, infrastructures des galeries	C.NT.ASCM.03.021.C
[56]	La perturbation alcaline liée à un stockage : les argilites du Callovo-Oxfordien en champ proche et les composants à base d'argile gonflante	C.NT.ASTR.03.069.B
[57]	Synthèse des modèles de relâchement des colis de déchets à haute activité et à vie longue	C.NT.ASCM.03.0045.B
[58]	La solubilité et la rétention de radionucléides et de toxiques chimiques au sein du Callovo-Oxfordien sain et perturbé	C.NT.ASTR.03.099.C
[59]	La solubilité et la rétention de radionucléides et de toxiques chimiques au sein d'alvéoles de stockage de déchets B	C.NT.ASTR.03.106.B
[60]	La solubilité, la rétention et le transport de radionucléides et de toxiques chimiques au sein d'alvéoles de stockage de colis de déchets C et combustibles usés	C.NT.ASTR.03.108.B
[61]	L'évolution phénoménologique des galeries d'un stockage et le comportement des radionucléides dans les galeries	C.NT.ASIT.04.0014.C
[62]	La solubilité et la rétention de radionucléides et de toxiques chimiques dans les formations encaissantes	C.NT.ASTR.03.104.C
[63]	Les biosphères de référence - Site de Meuse/Haute-Marne	C.RP.ASMG.03.0104.C
[64]	Évaluation des facteurs de conversion biosphère pour les radionucléides et des risques associés aux toxiques chimiques. Modélisation de leur comportement dans les biosphères de référence - Site de Meuse/Haute-Marne	C.NT.ASTR.03.0110.B
[65]	Comparaison entre l'approche de sûreté de l'ANDRA et les recommandations de la RFS III.2.f - Dossier argile et granite 2005	C.NT.ADSQ.04.0023.A
[66]	Analyse qualitative de sûreté en phase de post-fermeture d'un stockage - Liste des événements extérieurs	C.NT.AMES.04.0039.A
[67]	Analyse qualitative de sûreté à long terme d'un stockage en formation argileuse profonde	C.NT.AMES.04.0049.A
[68]	Comparaison FEP's - AQS	C.RP.AMES.04.0037.A
[69]	Cadrage des scénarios à quantifier pour 2005	C.NT.AMES.02.0063.C
[70]	Définition du scénario d'évolution normale	C.NT.AMES.03.052.C
[71]	Définition du scénario défaut de colis	C.NT.AMES.03.009.D
[72]	Définition du scénario défaut de scellements et/ou transfert par la zone endommagée	C.NT.AMES.03.010.C
[73]	Définition du scénario forage dans le stockage	C.NT.AMES.03.055.C

[74]	Définition du scénario de fonctionnement très dégradé	C.NT.AMES.05.0017.A
[75]	L'architecture des calculs de sûreté d'un stockage en formation argileuse profonde	C.NT.ACSS.03.113.C
[76]	La conceptualisation « phénoménologique » du scénario d'évolution normale (SEN) - Propositions	C.NT.ASIT.03.0128.B
[77]	Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 - Scénario d'évolution normale (S.E.N.) - Calculs de référence et de sensibilité - Schémas de calculs, hypothèses, données et résultats	C.RP.ACSS.05.0005.B
[78]	Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 - Scénario d'Évolution Altérée (S.E.A.) «Défaut de colisage » - Calculs de référence et de sensibilité - Schémas de calculs, hypothèses, données et résultats	C.RP.ACSS.05.0007.A
[79]	Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 - Scénario d'Évolution Altérée (S.E.A.) - « Défaut de scellement » - Calculs de référence et de sensibilité - Schémas de calculs, hypothèses, données et résultats	C.RP.ACSS.05.0010.A
[80]	Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 - Scénario d'Évolution Altérée (S.E.A.) - « Forage Exploratoire » - Calculs de référence et de sensibilité - Schémas de calculs, hypothèses, données et résultats	C.RP.ACSS.05.0008.A
[81]	Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 - Scénario d'Évolution Altérée (S.E.A.) - « Fonctionnement très dégradé » - Schémas de calculs, hypothèses, données et résultats	C.RP.ACSS.05.0012.A
[82]	Analyse phénoménologique des situations de stockages (APSS)	92 documents

#### Documents antérieurs au Dossier 2005 Argile

	Titre	Référence	Lettre ANDRA
[83]	Référentiel géologique du site de Meuse/Haute-Marne (5 Tomes)	A.RP.ADS.99.005.B	DG/01-270 du 27/09/01
[84]	Meuse/Haute-Marne. Carte géologique de la zone de reconnaissance et de son environnement proche	D.IM.ASTE.01.044.B	ANDRA/01-431 du 12/11/01
[85]	Site de Meuse/Haute-Marne. Cartographie géologique et structurale de l'environnement régional du site (3 Volumes)	D.RP.0G2R.00.003.A	DSQE/DIR/02-147 du 30/04/02
[86]	Laboratoire de recherche souterrain Meuse/Haute-Marne. Lot 1 - Sismique 3D. Rapport de synthèse	B.RP.0ANT.00.073.A	DG/01-270 du 27/09/01
[87]	Synthèse des options initiales de conception d'un stockage de déchets de haute activité et à vie longue	C.RP.A.HVL.98.003.B	DG/98-506 du 24/07/98

**Liste des documents transmis par l'ANDRA à l'IRSN**

**Documents référencés dans le Dossier 2005 Argile (« niveau 5 »)**

	<b>Titre</b>	<b>Référence</b>	<b>Lettre ANDRA</b>
	<b>Géologie</b>		
[88]	Site de Meuse/Haute-Marne. Sismique 3D après retraitement 2002. Rapport d'interprétation géologique et structural	C.RP.0BEI.03.002.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[89]	Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Sismique 3D après retraitement 2002. Interprétation des horizons du Dogger carbonaté pour l'optimisation des implantations et trajectoires des forages FRF	C.RP.0BEI.03.001.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[90]	Site de Meuse/Haute-Marne. Consolidation du modèle structural de secteur. Analyse des microstructures tectoniques présentes dans l'Oxfordien et le Dogger calcaires. Approche comparative. Données de terrain (2 Volumes)	C.RP.0IGA.02.002.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[91]	Site de Meuse/Haute-Marne. Consolidation du modèle structural de secteur. Analyse des microstructures tectoniques présentes dans l'Oxfordien et le Dogger calcaires. Approche comparative. Traitement statistique (2 Volumes)	C.RP.0ARM.02.007.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[92]	Site de Meuse/Haute-Marne. Consolidation du modèle structural de secteur. Intégration des données 2D, 3D avec les données cartographiques de terrain. Unités structurales et modèle consolidé. Volumes 1/3 (méthodologie), 2/3 (texte) et 3/3 (figures)	C RP 1GTR 02 002	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[93]	Site de Meuse/Haute-Marne. Complément du modèle structural de secteur. Complément à l'interprétation des profils sismiques 2D, interprétation des 6 nouveaux profils sismiques et conversion temps/profondeur	C.RP.1GTR.03.001.B	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[94]	Rapport de synthèse de l'Oxfordien. Lot4-Puits d'accès et auxiliaire	D.RP.0ANT.04.021.A	DSQE/DIR/05-198 du 22/09/2005
[95]	Site de Meuse/Haute-Marne. Estimation des séismes de référence. Période d'exploitation d'un stockage : SMHV & SMS. Première approche pour le SMPP. Volume 1/4 : Synthèse, 108p. ; Volume 2/4 : Présentation des modèles sismotectoniques, 92 p. ; Volume 3/4 : Évaluation de la magnitude des SMPP, méthode Kijko, 27p. ; Volume 4/4 : Résultats des calculs aux différentes étapes, 36 p	C.RP.0GTR.02.003.A	DSQE/DIR/05-0172 du 20/07/05
[96]	Aléa sismique. Consolidation de l'approche déterministe, essais préliminaire d'une approche probabiliste. Site Meuse/Haute-Marne (3 Volumes)	C.RP.0GTR.04.0013.A	DSQE/DIR/05-0172 du 20/07/05
[97]	Comportement des massifs rocheux et des ouvrages souterrains et perturbations hydrogéologiques sous actions sismiques	620.RP.0BRG.91.005.A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[98]	Effet des séismes sur les ouvrages souterrains. Thèse A. Kurose (2000) - École polytechnique	-	DSQE/DIR/05-0208 du 20/09/05
[99]	Étude de la stabilité mécanique des ouvrages de stockage sous aléa sismique - Projet HAVL Site de Meuse/Haute-Marne	C.RP.0GST.04.0001.A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[100]	Comportement des installations souterraines sous aléa sismique. Projet HAVL - Argile	C.RP.ASMG.04.014.B	DSQE/DIR/05-0208 du 20/09/05

	<b>Hydrogéologie</b>		
[101]	Note d'appui à la modélisation du transport de sel et du transfert de solutés d'un stockage	C.NT.ASMG.03.071.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[102]	Analyse et interprétation des rabattements induits dans les chambres d'observation des forages EST201, EST202 et EST203 par le fonçage du puits principal	D.RP.OCPE.02.004.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[103]	Évolution du modèle hydrogéologique région/secteur. Écoulement et transport en aquifère. Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport final 2003	C.RP.0IFP.04.58158.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[104]	Modélisation du transport en aquifère - 2004. Consolidation du modèle hydrogéologique région/secteur 2003 et analyse de sensibilité à l'évolution géomorphologique sur 1 Ma. Rapport final : Consolidation et Recalage du Modèle d'Écoulement	C.RP.0IFP.04.58288.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[105]	Évolution du modèle hydrogéologique de site dans le cadre de la construction des modèles conceptuels de transport 2003. Site Meuse/Haute-Marne	D.RP.0ANT.04.009.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[106]	Actualisation du calage du modèle hydrogéologique de site. Site Meuse/Haute-Marne	D.RP.0ANT.05.008.B	DSQE/DIR/05-0172 du 20/07/05
[107]	Évolution de la géosphère et de la biosphère. Incidence sur l'hydrologie et l'hydrogéologie. Site Meuse/Haute-Marne	C.NT.ASMG.03.066.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[108]	Modélisation générique de l'impact de l'évolution géodynamique externe sur l'hydrogéologie du secteur élargi. Site Meuse/Haute-Marne	C.RP.12CEA.04.003.A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[109]	Modélisation générique de l'impact de l'évolution géomorphologique sur l'hydrogéologie du site. Site Meuse/Haute-Marne	C.RP.12CEA.04.001.A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[110]	Laboratoire de recherche souterrain Meuse/Haute-Marne - Lot 2 - Forages de suivi de perturbations - Rapport de synthèse	B.RP.0ANT.01.010.B	DSQE/02-003 du 15/05/02
	<b>Transport dans le Callovo-Oxfordien</b>		
[111]	Phénomènes de transports couplés dans les argilites : synthèse et perspectives	D.RP.0IPG.03.002.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[112]	Étude des phénomènes osmotiques dans les argilites du Callovo-Oxfordien	D.RP.0IPG.03.003.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[113]	Étude des propriétés de diffusion des solutés anioniques dans les argilites. Rapport final	CEA/DEN/DPC/SECR/04-026.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
	<b>Perturbations chimiques</b>		
[114]	ECOCLAY II : Effects of cement on clay barrier performance - Phase II - Final report	C.RP.ASCM.04.0009	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
	<b>Corrosion</b>		
[115]	Dimensionnement vis-à-vis de la corrosion, des (sur)conteneurs de colis de déchets vitrifiés et de combustibles usés	C.NT.ASCM.03.0012.A	DSQE/DIR/05-0172 du 20/07/05
[116]	Influence de la teneur en eau de l'argile sur la corrosion en phase aérée et désaérée de l'acier au carbone à 25 et 90 °C	EDF HT-29/04/024/A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[117]	Estimation empirique de la cinétique de corrosion localisée des aciers non et faiblement alliés : évolution du facteur de piqûration	EDF HT-29/03/013/A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05

	<b><i>Incendie-explosion</i></b>		
[118]	Étude des conséquences d'un incendie en galerie et en alvéole pour un colis de stockage de déchets B2.1	C.NT.0ATI.04.006.A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[119]	Étude des conséquences d'une collision de hotte de transport de colis C en galerie	C.NT.0ATI.04.007.A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[120]	Étude des conséquences d'une collision de hotte de transport de colis CU en galerie	C.NT.0ATI.04.002.A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[121]	Évaluation des risques associés à l'émission de gaz par les colis de déchets B	C.NT.ASTE.04.0763.B	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[122]	Étude du risque incendie en phase de construction et d'exploitation	C.NT.0STC.04.059.A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[123]	Fire risk analysis of underground transports to the deep repository for spent fuel (rapport établi pour the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co)	Rapport n° 01191/FN	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
	<b><i>Criticité</i></b>		
[124]	Synthèse de l'analyse de sûreté-criticité préliminaire des colis du type B et C du modèle d'inventaire de dimensionnement (MID)	C.NT.0COT.04.0003.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[125]	Étude du risque de criticité à long terme. Analyse qualitative de la littérature à l'international	C.NT.0HEM.04.0001.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[126]	Analyse du risque de criticité à long terme suite à la migration des radionucléides hors des colis primaire	C.NT.0MIL.05.0001.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[127]	Justification des choix réalisés pour la sûreté-criticité des CSD-C en formation argileuse profonde - Synthèse des principaux résultats d'études	C.NT.FMES.04.0001.B	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[128]	Calculs de criticité pour le stockage des colis B5.4 en formation argileuse profonde - Masses maximale admissible et minimale critique d'oxyde de plutonium (PuO <sub>2</sub> ) par CSD-C	C.NT.0ARP.05.0001.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[129]	Étude du risque d'occurrence d'un accident de criticité suite à la chute d'un colis B.5 en puits	C.NT.3SGN.04.107.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[130]	Étude de criticité : faisabilité du stockage des colis de type C en formation géologique profonde	C.NT.0MIL.05.0002.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[131]	Calculs de criticité pour le stockage des combustibles usés en formation argileuse profonde - Gestion documentaire	C.NT.0MIL.05.0007.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[132]	Projet HAVL Argile - Synthèse thématique sur la sûreté-criticité du stockage des combustibles usés : retour d'expériences nationale et internationale	C.NT.0MIL.04.0006.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[133]	Analyse préliminaire de sûreté-criticité pour le conditionnement en surface des colis CU	C.NT.0MIL.04.0017.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[134]	Scénarios d'accident de criticité suite à une chute de colis de stockage en puits	C.NT.3SGN.04.108.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[135]	Définition des scénarios potentiels de dégradation du colis de stockage CU1 (4 assemblages) pour les études de criticité	C.NT.AMES.04.0042.A	DSQE/DIR/05-0179 du 03/08/05
[136]	Approche d'une modélisation de la physique de l'accident de criticité dans un colis de combustibles irradiés en formation géologique profonde et étude de ses conséquences	C.NT.FMES.05.0011.B	DSQE/DIR/05-0186 du 26/10/05

	<b>Colis</b>		
[137]	Dossier de référence sur le comportement à long terme des verres nucléaires	CEA.RT.DPC/2004/06	DSQE/DIR/05-0172 du 20/07/05
[138]	Problématique des verres nucléaires - sorption du silicium sur les produits de corrosion	EDF HT-29/04/026/A	DSQE/DIR/05-0175 du 29/07/05
[139]	Référentiel scientifique sur l'évolution à long terme des combustibles usés	CEA.RT.DPC/SECR/04-032-B	DSQE/DIR/05-0172 du 20/07/05
[140]	Dossier de synthèse sur le comportement à long terme des colis : dossier de référence phénoménologique « CSD-C » 2004	CEA.RT.DPC/SCCME/04-685-A	DSQE/DIR/05-0213 du 29/09/05
	<b>Biosphère</b>		
[141]	Prospection de terrain aux environs du laboratoire MHL. Mise à jour des données et rédaction du référentiel du site MHM relatif aux modèles de transfert dans les biosphères actuelles	C.RP.0HEM.04.02.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[142]	Évaluation de l'influence des pratiques humaines sur les sols forestiers, agricoles, urbains et industriels des environs du site Meuse/Haute-Marne	C.RP.1INR.04.05.A	DSQE/DIR/05-0168 du 01/07/05
[143]	Projet de stockage en subsurface de déchets FAVL graphites - Dossier d'Allocation de Performance - Calculs préliminaires des facteurs de conversion biosphère du chlore 36	F.NT.ASTR.02.073.C	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[144]	Transfer of Chlorine 36 in the biosphere : bibliography and Modelling - Final report	C.RP.0ECO.2000.03.A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05
[145]	Stable Chlorine in soils, plants and waters of the Bure area, France	C.RP.0ECO.2000.04.A	DSQE/DIR/05-0187 du 22/08/05

## Références bibliographiques publiques

	<i>Géologie et géodynamique</i>
[146]	André G., Hibsich C., Beaudoin B. Carpentier C., Fourcade S., Cathelineau M. et Élion P. Filons sédimentaires oxfordiens : implications tectoniques et diagénétiques pour l'Est du bassin de Paris. <i>Bull. Soc. géol. Fr.</i> , 2004, t. 175, n° 6, pp. 595-605
[147]	André G., 2003. Caractérisation des déformations méso-cénozoïques et des circulations de fluides dans l'Est du Bassin de Paris. Thèse doct. ès-sciences, Laboratoire G <sup>2</sup> R - UMR 7566, Univ. H. Poincaré - Nancy I, 311 p.
[148]	Bergerat F., 1985. Déformations cassantes et champs de contraintes tertiaires dans la plate-forme européenne. - Thèse doct. d'Etat, Paris, 1985 - <i>Mém. Sci. de la Terre Univ. P. &amp; M. Curie</i> , 85-07, 315 p.
[149]	Coulon, M., Frizon de Lamotte, D., 1988. Les extensions cénozoïques dans l'est du Bassin de Paris: mise en évidence et interprétation. <i>C. R. Acad. Sc., Paris (II)</i> , 307, 1113-1119.
[150]	Lacombe O., 1992. Maclage, fracturation et paléocontraintes intraplaques : application à la plateforme carbonatée Ouest-européenne. Thèse, Univ. P. & M. Curie, 316 p.
[151]	Le Pichon, X., Bergerat, F. and Roulet, M.-J. (1988). Plate kinematics and tectonics leading to the Alpine belt formation; a new analysis. <i>Geol. Soc. Am., Spec. Paper</i> 218, 111-131.
[152]	Rocher M., Cushing M.E., Lemeille F., Lozac'h Y, Angelier J., 2004. Intraplate paleostresses reconstructed with calcite twinning: improved method and application to the Lorraine platform area (eastern France). <i>Tectonophysics</i> , 387, 1-21.
[153]	Savoie, S., Cabrera, J., Matray, JM, 2003. Different hydraulic properties of single fractures in argillaceous medium: the case of the IRSN Tournemire site (France). <i>Proceedings of IAH Conference on Groundwaters in Fractured Rocks, Prague, Sept 2003.</i> 383-384.
[154]	Soliva R., 2003. Coissance des failles normales dans les séries stratifiées hétérogènes : Rôle de la restriction verticale et de la coalescence sur les lois d'échelles et la distribution spatiale des failles Exemples naturels et approche théorique. Thèse doct. ès-sciences, Univ. Paris XI.
[155]	Soliva R. & Benedicto A., 2005. Geometry, scaling relations and spacing of vertically restricted normal faults. <i>J. Struct. Geol.</i> , 27, 2, p. 317-325.
[156]	Villemin T. (1986). Tectonique en extension, fracturation et subsidence: le Fossé rhénan et le bassin de Sarre-Nahe, Thèse Univ. P. et M. Curie, Paris, 258 p.
[157]	Autran A., Bles J.-L., Combes PH., Cushing M., Dominique P., Durouchoux Ch., Mohammadioun B., TerrierR M., 1998. Working Group EPAS Probabilistic Seismic Hazard Assessment in France, Part 1: Seismotectonic Zonation, ECEE'98, Paris.
[158]	Cushing E.M., Lemeille F., Grellet B., Renardy F., 1998. Paleoseismological studies in the Upper Rhine graben area. Poster n° SS22A-21, AGU Fault Meeting.
[159]	Cushing E.M., Lemeille F., Cotton F., Grellet B., Audru J.-C., Renardy F., 2000. Paleo-earthquakes investigations in the Upper Rhine Graben in the framework of the Paleosis project. <i>In Colloque Paleosis</i> , pp. 39-43, « Evaluation of the potential for large earthquakes in regions of present day low seismic activity in Europe », 13-17 mars 2000, Han -sur-Hesse, Belgique, Camelbeeck T. éd., 170 p.
[160]	Fourniguet J., 1978. Géodynamique actuelle dans le Nord et le Nord-Est de la France. Apport des comparaisons de nivellement. Ed. BRGM, Mém. 127, Orléans.
[161]	Fukushima Y., Gariel J.C., Tanaka R., 1995. Site dependant attenuation relations of seismic motion parameters at depth using borehole data. <i>BSSA</i> , 85, 6, p. 1790-1804.
[162]	Kijko A., 2002. Statistical estimation of maximum regional earthquake magnitude Mmax. <i>Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering.</i> Londres, 2002.
[163]	Lemeille F., Cushing E.M., Cotton F., Grellet B., Menillet F., Audru J.-C., Renardy Y F. et Flehoc C., 1999. Traces d'activité pléistocène de failles dans le Nord du fossé du Rhin (plaine d'Alsace, France). <i>C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes</i> , 328, p. 839-846.
[164]	Lenôtre N., Thierry P., Blanchin R. & Brochard G., 1999. Current vertical movement demonstrated by comparative leveling in Brittany (France). <i>Tectonophysics</i> , 301, p. 333-344.

[165]	Cowie P. A. & Scholz C. H., 1992. Displacement-Length Scaling Relationship for Faults: Data Synthesis and Discussion. <i>J. Struct. Geol.</i> , 14, p. 1149-1156.
[166]	Gavrilenco P., Melikadze G., Chelidze T., Gibert D. & Kumsiashvili, G., 2000. Permanent water level drop associated with the Spitak Earthquake: Observations at Lisi Borehole (Republic of Georgia) and modelling. <i>Geophysical Journal International</i> , 143 (1), p. 83-98.
[167]	Gomberg J., Reasenberg P. A., Bodin P. & Harris R. A., 2001. Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes. <i>Nature</i> , 411, p. 462-466.
[168]	Johnson P.A & Xiaoping J., 2005. Nonlinear dynamics, granular media and dynamic earthquake triggering. <i>Nature</i> , 437, p 871-874.
[169]	Montgomery D.R. & Manga M., 2003, Streamflow and water well responses to earthquakes. <i>Science</i> , v. 300p., p. 2047-2049.
[170]	Parsons T. & Dreger D., 2000. Static-stress impact of the 1992 Landers earthquake sequence on nucleation and slip at the site of the 1999 M=7.1 Hector Mine earthquake, southern California. <i>Geophys. Res. Let.</i> , 27, p. 1949-1952.
[171]	Roeloffs E.A, 1998. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. <i>Journal of Geophysical Research B: Solid Earth</i> , 103 (1), p.869-889.
[172]	Schlische R.W., Young S.S., Ackermann R.V., Gupta A., 1996. Geometry and scaling relations of a population of very small rift-related normal faults. <i>Geology</i> , 24 (8) , p. 683-686.
[173]	Gomberg J. & Johnson P. A., 2005. Dynamic triggering of earthquakes. <i>Nature</i> , 437, p. 830.
[174]	Blès J.L. et Gros Y. (1991) Stress field changes in the Rhone Valley from the Miocene to the present. <i>Tectonophysics</i> , 194, p. 265-277.
	<b>Hydrogéologie</b>
[175]	FORPRO 2004/08 Rf -Forages scientifiques profonds : état zéro du site de Meuse/Haute-Marne à partir des forages FSP réalisés en 2003. Rapport Final.
	<b>Corrosion</b>
[176]	Parkins R.N. (1996), Conceptual understanding and life prediction for SCC of pipelines, <i>Proceedings of CORROSION/96, Part I, Life Prediction of Structures Subject to Environmental Degradation: The Science and its Control in Engineering Practice</i> , 1-49.
[177]	Wendler-Kalsch E. (1980) The effects of film formation and mechanical factors on the initiation of stress corrosion cracking of unalloyed steels in carbonate solutions. <i>Werkstoffe und Korrosion</i> , 31, p.534.
[178]	Blanchard E. et Pételot D. (1990), Étude d'un cas pratique de corrosion sous contrainte, <i>Corrosion sous contrainte - phénoménologie et mécanismes</i> , Bombannes, Les Éditions de Physique, p. 819-823.
[179]	Huijbregts W. <i>et al.</i> (2001), Stress corrosion cracking in district heating Pipes, <i>Euroheat &amp; Power / Fernwärme International</i> , June 2001, p. 52-58.
	<b>Géomécanique</b>
[180]	Bouvard-Lecoanet A. <i>et al.</i> (1992), <i>Ouvrages souterrains. Conception - Réalisation - Entretien</i> , Presses ENPC.
[181]	Panet M. (1995), <i>Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement</i> , Presses ENPC.
[182]	Ramambaoa N. (2001), Étude du comportement hydromécanique des argilites - application au site de Tournemire. Thèse École Polytechnique.
[183]	Bultel F. (2001), <i>Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements de tunnels</i> . Thèse ENPC.
[184]	Gaombalet J. (2004), <i>Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage</i> . Thèse École Polytechnique.
[185]	Boidy E. (2002), <i>Modélisation numérique du comportement différé des cavités souterraines</i> . Thèse UJF.
[186]	Lemaitre J. et Chaboche J.L. (1988), <i>Mécanique des matériaux solides</i> . Éd. Dunod.
[187]	Miehe B. (2004), <i>Modélisation de la zone endommagée induite par le creusement du puits d'accès au laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (argilites de l'Est)</i> . Thèse ENSMP.
[188]	Euridice News Nr. 2, septembre 2003.

[189]	Barnichon J.D. et Volckaert G. (2000), Hydro-Mechanical coupling in the Boom clay : Recent in-situ observations, predictions and perspectives. Workshop ENSMP, octobre 2000.
[190]	Pellet F., Deleruyelle F. et <i>al.</i> (2004), Numerical modeling of the Excavated Damaged Zone around underground openings. 3 <sup>rd</sup> Asian Rock Mechanics Symposium - Kyoto, 2004.
[191]	Hajdu A. (2003), Modélisation numérique du comportement viscoplastique endommageable des roches et application aux ouvrages souterrains de stockage. Thèse UJF Grenoble.
[192]	Buzzi O. (2004), Hydromécanique du contact entre Géomatériaux : Expérimentation et modélisation. Application au stockage de déchets nucléaires. Thèse UJF Grenoble.
	<b><i>Réversibilité</i></b>
[193]	Viala M. (2000), Contrôle, la revue de l'Autorité de sûreté nucléaire, n° 134, avril 2000, p.54-55.