

# Projet de stockage Cigéo – Examen du Dossier d’Options de Sûreté

RAPPORT IRSN N° 2017-00013

TOME 1

Réunion des Groupes permanents d’experts pour les déchets  
et pour les laboratoires et les usines des 18-19 mai 2017



---

---

## RÉSUMÉ

Le présent rapport constitue l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le Dossier d'options de sûreté (DOS) du projet Cigéo relatif au stockage de déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MAVL) en formation géologique profonde, transmis par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra). Ce dossier constitue une étape clé qui vise à présenter une vision consolidée des options de conception du stockage et qui préfigure la démonstration de sûreté attendue à l'échéance de la demande d'autorisation de création (DAC), que l'Andra prévoit de déposer en 2018. Le projet Cigéo a fait l'objet d'instructions régulières au cours de son développement, qui ont conduit l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) à formuler différentes demandes et l'Andra à s'engager à réaliser des études et travaux visant à assurer que l'installation de stockage présentera un haut niveau de sûreté. L'IRSN a ainsi examiné les progrès accomplis sur les différents aspects du projet, eu égard notamment à la définition de concepts de stockage sûrs, permettant la maîtrise des risques pendant la phase d'exploitation (incluant la réversibilité et la fermeture du stockage) et à long terme. A cet égard, l'enjeu principal de l'examen du DOS a consisté en l'identification d'éventuels points faibles pouvant conduire à des modifications majeures de concepts pour la DAC.

De l'examen de ce dossier et des informations transmises au cours de l'instruction, l'IRSN retient les principaux éléments suivants.

S'agissant des colis de déchets, l'inventaire et les caractéristiques des déchets susceptibles d'être stockés dans Cigéo sont globalement bien identifiés, en cohérence avec le scénario industriel de référence (SI 2011) retenu. L'IRSN appelle toutefois l'attention sur les évolutions possibles de ce scénario, qui pourrait être actualisé en accord avec la stratégie retenue par EDF pour gérer le parc REP et le réacteur EPR (durée d'exploitation des réacteurs, type de combustible chargé, etc.). L'IRSN constate également que le conditionnement d'environ 20 % de l'inventaire total des colis n'est pas stabilisé à ce stade. Toutefois, ces incertitudes ne sont pas de nature à remettre en cause significativement la conception générale du stockage. Pour ce qui concerne l'adaptabilité du stockage aux déchets en réserve et aux combustibles usés, l'IRSN relève que des incertitudes demeurent quant au volume exact qui serait à stocker, mais il n'apparaît pas à ce stade d'impossibilité à adapter l'emprise de l'installation pour les accueillir, si nécessaire. Les dimensions des ouvrages pour la manutention des combustibles usés appellent toutefois des évaluations géotechniques complémentaires pour en confirmer le bien fondé.

S'agissant des données relatives au site de Meuse/Haute-Marne, l'Andra a désormais acquis une connaissance détaillée qui lui permet de confirmer la pertinence de la zone retenue pour l'implantation du stockage et qui constitue un référentiel de qualité en appui de sa démonstration de sûreté. Sur cette base, l'IRSN estime comme l'Andra que les caractéristiques du site ne présentent pas de point rédhibitoire pour la mise en œuvre des concepts retenus au stade du DOS. Il sera nécessaire néanmoins, pour conforter la démonstration de sûreté, que l'Andra précise un certain nombre de points et accorde une attention particulière à l'amélioration de la représentativité du modèle hydrogéologique (pour notamment préciser la localisation des exutoires possibles des écoulements en provenance du stockage), à la confirmation de l'homogénéité de la formation hôte au droit des

flexures identifiées par la reconnaissance géophysique ainsi qu'à la maîtrise de l'endommagement de la roche et l'évolution des propriétés hydromécaniques des zones endommagées. Il conviendra également que l'Andra retienne, dans l'analyse de sûreté, certaines hypothèses et valeurs de paramètres conservatives plus conformes à l'état des connaissances.

S'agissant de l'évolution des composants du stockage (colis, aciers, bétons, matériaux argileux), l'Andra a analysé les perturbations mécaniques, chimiques, hydriques et thermiques susceptibles d'affecter leurs performances au cours de l'exploitation et après fermeture. L'IRSN souligne la qualité des nombreuses études menées par l'Andra pour caractériser l'évolution de ces composants et considère, comme pour le site, qu'un référentiel important de connaissances a été constitué. L'IRSN estime notamment que les modèles de relâchement des radionucléides hors des colis établis par l'Andra sont globalement satisfaisants et note que l'Andra s'est engagée à les consolider, notamment en précisant l'influence des matériaux d'environnement sur la phénoménologie d'altération des verres et en démontrant l'absence d'effet défavorable du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage des alvéoles HA. L'IRSN souligne toutefois la nécessité de confirmer que le dimensionnement du conteneur des colis HA et des composants de l'alvéole permet de maîtriser les incertitudes sur les phénomènes de corrosion. L'IRSN identifie également des compléments à apporter pour s'assurer que les perturbations (bactériennes, organiques, salines...) et les phénomènes rencontrés pendant les transitoires (hydraulique, gazeux, thermique...) et leurs couplages sont pris en compte de manière conservative dans les scénarios d'évolution du stockage qui seront retenus à l'échéance de la DAC. Enfin, la nécessité de recourir à des bétons bas pH dans le stockage n'apparaît pas pleinement justifiée en l'état actuel des connaissances, notamment pour ce qui concerne leur tenue mécanique sur des durées compatibles avec celle de la phase d'exploitation de Cigéo.

S'agissant de la démarche de sûreté en exploitation retenue par l'Andra, l'IRSN note que ses principes sont cohérents avec le guide de sûreté de l'ASN mais qu'elle n'est pas encore complètement aboutie et nécessite des compléments pour consolider la liste des différentes catégories de scénarios à retenir pour le dimensionnement de l'installation et sa démonstration de sûreté. En particulier, l'IRSN estime que l'Andra devra justifier les situations exclues et mieux prendre en compte les cumuls plausibles d'événements. Pour ce qui concerne la démarche de sûreté après fermeture, l'IRSN observe que l'Andra présente un ensemble de scénarios qui rend compte de différentes situations envisageables à long terme, y compris d'éventuelles exploitations du sous-sol, ce qui est satisfaisant.

S'agissant de l'analyse des risques en exploitation, l'IRSN considère de manière générale que les avancées de l'Andra dans ce domaine sont notables. Ainsi, les risques de criticité, ceux liés à la coactivité ou encore à la manutention des colis font l'objet d'une analyse de qualité de la part de l'Andra, qui retient des dispositions de maîtrise globalement appropriées. De même, la prise en compte des risques liés à l'exposition interne et externe du personnel et les dispositions de confinement des substances radioactives pour leur mise en stockage sont, dans leur principe, satisfaisantes.

Pour ce qui concerne les risques liés à l'incendie, l'IRSN estime que les dispositions de prévention prévues dans les installations de surface et souterraine sont convenables. En revanche, les dispositions de sectorisation, de détection et de lutte contre l'incendie sont à renforcer significativement en particulier pour tenir compte des

difficultés liées au caractère souterrain de l'installation et à l'accessibilité réduite des ouvrages pour l'intervention. Par ailleurs, l'IRSN considère qu'un risque d'emballement de réactions exothermiques dans ces colis ayant pour conséquence un rejet important d'activité dans l'environnement ne peut être exclu en cas d'incendie. A cet égard, l'IRSN estime qu'une solution de neutralisation de la réactivité des enrobés bitumineux en vue de leur stockage doit être privilégiée. Si un tel procédé ne pouvait être mis en œuvre, des évolutions de conception majeures des alvéoles MAVL seraient nécessaires par rapport à celle présentée au stade du DOS, pour réduire au mieux les risques et les conséquences liés au stockage des déchets bitumés en l'état.

Pour ce qui concerne les autres risques en exploitation (liés aux facteurs organisationnels et humains, à la fermeture des alvéoles, au vieillissement, aux agressions d'origine externe telles que le séisme, l'inondation, les aléas climatiques et météorologiques), l'IRSN estime que les concepts actuels devraient permettre leur maîtrise. En outre, l'Andra s'est engagée à prendre en compte les remarques de l'IRSN sur ces points dans la perspective de la DAC. L'IRSN relève toutefois qu'au stade du DOS, l'analyse de sûreté de l'Andra est lacunaire pour ce qui concerne la surveillance et la gestion des conséquences pour l'exploitation des situations accidentelles (incluant le retrait éventuel de colis impactés par un accident). Or, l'IRSN considère que ces aspects pourraient nécessiter des évolutions importantes de la conception de l'installation. En effet, dans le premier cas, l'IRSN s'interroge sur la compatibilité de la conception actuellement retenue avec les moyens à mettre en œuvre pour exercer une surveillance adaptée aux enjeux particuliers posés par la maîtrise des risques, en exploitation comme à long terme. Dans le second, la possibilité d'intervenir et le cas échéant de réhabiliter l'installation est une priorité à considérer pour assurer la pérennité de la filière de gestion des déchets HA et MAVL, dont Cigéo constitue l'unique exutoire ; il convient de l'intégrer dès la conception du stockage.

Enfin, s'agissant de l'évaluation de sûreté à long terme du stockage, l'IRSN n'a pas de remarque particulière à ce stade sur la prise en compte par l'Andra des risques liés à la criticité. Concernant le risque sismique, l'IRSN recommande que l'Andra présente, dans le dossier de DAC, un spectre enveloppe des différentes hypothèses qu'elle retient. L'IRSN note par ailleurs que les impacts radiologiques estimés par l'Andra sont faibles. Les ordres de grandeur calculés n'appellent pas de remarque à ce stade, mais l'IRSN considère que les estimations devront être complétées, notamment en considérant la possibilité d'un exutoire dans l'aquifère de l'Oxfordien et en réévaluant la contribution à l'impact du <sup>79</sup>Se, selon sa spéciation chimique. En outre, l'IRSN estime que l'Andra n'a pas présenté une analyse suffisante des options d'optimisation de l'architecture du stockage (positionnement des liaisons surface-fond, longueurs des galeries, nombre et performances des scellements...) pour justifier le bien fondé du choix retenu au stade du DOS. Ce point reste un attendu important du dossier de DAC et les options retenues devront permettre de compenser la défaillance possible d'ouvrages de scellements, notamment des liaisons surface-fond, afin notamment d'assurer que le transfert des radionucléides par ces liaisons reste suffisamment limité.

En conclusion, l'IRSN souligne les efforts substantiels consentis par l'Andra pour composer le DOS, qui fait état, sur un grand nombre de thématiques, de progrès significatifs dans la définition et la prise en compte des exigences de sûreté dans la conception du stockage, notamment eu égard aux risques en phase d'exploitation,

ainsi que dans la constitution des bases de connaissances en support à l'analyse du comportement du stockage en exploitation et à long terme. L'IRSN estime que le projet a atteint, dans l'ensemble, une maturité technique satisfaisante au stade d'un DOS. Bien que des compléments importants restent à apporter dans le cadre de la constitution du dossier de DAC, et sans présager de l'échéance à laquelle ce dossier pourra *in fine* être achevé, les éléments de démonstration de la maîtrise de l'essentiel des risques à considérer devraient pouvoir être réunis, sans nécessité de révision significative des concepts. Néanmoins, l'IRSN a identifié quatre points majeurs qui pourraient entraîner des modifications substantielles de la conception du stockage :

- la maîtrise des risques liés à l'incendie dans un alvéole de stockage de colis d'enrobés bitumineux,
- la prise en compte de certaines situations accidentelles pour l'exploitation de l'installation souterraine,
- la faisabilité de la surveillance de paramètres clés de la sûreté de Cigéo,
- l'optimisation du point de vue de la sûreté de l'architecture du stockage.

Il est essentiel aux yeux de l'IRSN qu'une réponse soit apportée à ces quatre points dans le cadre de la constitution du dossier de DAC.

## SOMMAIRE

Tome 1	1
<b>INDEX DES FIGURES</b>	<b>12</b>
<b>INDEX DES TABLEAUX</b>	<b>17</b>
1 Introduction	19
1.1 <i>Objet du présent rapport</i>	19
1.2 <i>Présentation du Dossier</i>	21
1.3 <i>Contexte</i>	21
2 Description de Cigéo	29
2.1 <i>Le site de Meuse/Haute-Marne</i>	29
2.2 <i>L'architecture du stockage</i>	31
2.2.1 Installations de surface	32
2.2.1.1 Installations de surface de la zone puits	33
2.2.1.2 Installations de surface de la zone descenderie	33
2.2.2 Liaisons surface-fond	35
2.2.2.1 Descenderies	35
2.2.2.2 Puits	36
2.2.3 Installation souterraine, concepts de stockage	36
2.2.3.1 Zone de stockage et alvéoles MAVL	38
2.2.3.2 Zones de stockage et alvéoles HAO et HA1/HA2	40
2.3 <i>Les colis</i>	43
2.3.1 Les colis de déchets HA	43
2.3.2 Les colis de déchets MAVL	45
2.4 <i>Calendrier de Cigéo</i>	47
2.4.1 Construction initiale	47
2.4.2 Phase pilote	47
2.4.3 Exploitation courante	48
2.5 <i>Fermeture du stockage</i>	48
2.5.1 Opérations de fermeture	48
2.5.2 Ouvrages de fermeture	49
2.5.2.1 Bouchons d'alvéole HA	49
2.5.2.2 Fermeture des alvéoles MAVL	50
2.5.2.3 Scelllements de galeries horizontales	50
2.5.2.4 Scelllements de liaisons surface-fond	52
2.6 <i>Procédés mis en oeuvre dans les installations</i>	53

2.6.1	Procédés dans l'installation nucléaire de surface EP1	53
2.6.1.1	Description du procédé	53
2.6.1.2	Ventilation	57
2.6.2	Procédés dans la descenderie colis	58
2.6.3	Procédés dans l'installation souterraine	58
2.6.4	Séparation des procédés « exploitation » et « travaux »	64
2.7	<i>Adaptabilité de Cigéo à une évolution de l'inventaire (réserves et combustibles usés)</i>	66
2.7.1	Colis de stockage des déchets en réserves et des combustibles usés	66
2.7.1.1	Déchets en réserves	66
2.7.1.2	Combustibles usés	67
2.7.2	Adaptabilité de l'architecture de Cigéo aux déchets en réserves	68
2.7.3	Adaptabilité de l'architecture de Cigéo aux combustibles usés	69
2.8	<i>Fonctions de sûreté</i>	72
2.8.1	Phase d'exploitation	73
2.8.2	Phase après fermeture	75
2.8.3	Intégration dans l'évaluation de sûreté	77
3	Inventaire des colis de déchets	79
3.1	<i>Inventaire des colis</i>	79
3.1.1	Evolutions par rapport au PIGD indice A	80
3.1.2	Hypothèses de l'inventaire du PIGD	81
3.1.2.1	Caractéristiques des assemblages combustibles à décharger	82
3.1.2.2	Durée d'exploitation des réacteurs du parc électronucléaire et production électrique nette future	82
3.1.3	Description des colis	83
3.1.4	Marges	88
3.1.5	Caractéristiques dimensionnantes	90
3.1.6	Spécifications d'acceptation des colis primaires	92
3.2	<i>Inventaire radiologique de référence</i>	94
3.2.1	Etat des lieux des connaissances – Données de base	94
3.2.2	Démarche de construction de l'inventaire radiologique	95
3.3	<i>Inventaire chimique de référence</i>	97
3.4	<i>Chroniques de stockage</i>	97
3.4.1	Options de stockage des colis MAVL	98
3.4.2	Principe d'ordonnement de livraison des colis primaires	100
3.4.3	Ordonnement de livraison des colis primaires	101
3.5	<i>Déchets en réserve</i>	103
3.5.1	Conditionnement des déchets et inventaire des colis	104
3.5.2	Inventaire radiologique	106
3.5.3	Inventaire chimique	107

3.6	<i>Combustibles usés</i>	108
3.6.1	Scénarios et typologies de combustibles usés	108
3.6.2	Concepts et inventaire des colis	109
3.6.3	Puissance thermique des colis	111
3.6.4	Inventaires radiologique et chimique	111
3.7	<i>Conclusion</i>	111
4	Connaissance du site de Meuse/Haute-Marne	113
4.1	<i>Contexte géologique</i>	113
4.2	<i>Ressources naturelles</i>	114
4.2.1	Ressource géothermale	115
4.2.2	Ressources en hydrocarbures	116
4.3	<i>Evolution géodynamique du site</i>	118
4.4	<i>Caractérisation géotechnique de surface</i>	120
4.5	<i>La roche hôte</i>	121
4.5.1	Propriétés géologiques	121
4.5.2	Paramètres hydrodynamiques	124
4.5.3	Propriétés de transport	128
4.5.4	Propriétés mécaniques	132
4.5.4.1	Comportement géomécanique du Callovo-Oxfordien	132
4.5.4.2	Caractérisation géotechnique du Callovo-Oxfordien	140
4.6	<i>Hydrogéologie des couches aquifères</i>	143
4.6.1	Caractérisation et conceptualisation des couches aquifères du secteur de Meuse/Haute-Marne	143
4.6.1.1	Barrois	143
4.6.1.2	Oxfordien	145
4.6.1.3	Dogger	150
4.6.1.4	Trias	153
4.6.2	Hydrogéochimie des aquifères	153
4.6.3	Modèle conceptuel hydrogéologique	155
4.6.4	Modélisation numérique des écoulements souterrains	156
4.6.4.1	Modélisation numérique des écoulements souterrains « à l'actuel »	156
4.6.4.2	Modélisation numérique des écoulements souterrains « géoprospectifs »	163
5	Evolution des composants du stockage	167
5.1	<i>Comportement des colis après fermeture du stockage</i>	167
5.1.1	Conteneurs de stockage	167
5.1.2	Démarche d'établissement des modèles de relâchement	168
5.1.3	Colis de déchets salins non bitumés	169
5.1.3.1	Phénoménologie d'altération des sels non bitumés	169
5.1.3.2	Modèles de relâchement et paramètres associés	170

5.1.4	Colis de déchets salins bitumés	170
5.1.4.1	Phénoménologie d'altération des déchets salins bitumés	170
5.1.4.2	Modèles de relâchement et paramètres associés	171
5.1.5	Problématique des gonflements liés aux déchets salins bitumés et non bitumés	172
5.1.6	Colis de déchets métalliques	173
5.1.6.1	Phénoménologie d'altération des déchets métalliques	174
5.1.6.2	Modèles de relâchement et paramètres associés	175
5.1.7	Colis de déchets vitrifiés HA	176
5.1.7.1	Comportement intrinsèque du verre	177
5.1.7.2	Phénoménologie d'altération des déchets vitrifiés HA	177
5.1.7.3	Modèles de relâchement et paramètres associés	182
5.1.8	Colis de déchets vitrifiés MAVL	186
5.1.8.1	Comportement intrinsèque du verre	186
5.1.8.2	Phénoménologie d'altération des déchets vitrifiés MAVL	186
5.1.8.3	Modèles de relâchement et paramètres associés	187
5.1.9	Autres colis de déchets	188
5.1.10	Déchets en réserve	190
5.1.11	Combustibles usés	190
5.1.11.1	Phase de relâchement instantané	191
5.1.11.2	Phase de relâchement différé	193
5.2	<i>Evolution des aciers</i>	195
5.2.1	Corrosion des aciers	196
5.2.2	Pré-dimensionnement du conteneur de stockage	200
5.2.3	Pré-dimensionnement du chemisage	202
5.3	<i>Evolution des bétons</i>	203
5.3.1	Bétons bas pH	203
5.3.2	Perturbation saline par les colis de déchets MAVL	207
5.4	<i>Evolution des matériaux argileux</i>	210
5.4.1	Transitoire thermo-hydrromécanique	210
5.4.2	Transitoire hydraulique- gaz	213
5.4.3	Transitoires chimiques	218
5.4.3.1	Perturbation alcaline par les bétons	219
5.4.3.2	Perturbation saline par les déchets salins MAVL	220
5.4.3.3	Perturbation organique par les déchets MAVL	223
5.4.3.4	Réactivité de l'hydrogène de corrosion et de radiolyse	225
5.4.3.5	Impact des bactéries	226
	REFERENCES	228
	LISTE DES ACRONYMES	239

Tome 2	1
<b>INDEX DES FIGURES</b>	<b>8</b>
<b>INDEX DES TABLEAUX</b>	<b>13</b>
<b>6 Démarche de sûreté</b>	<b>15</b>
<b>6.1 Démarche de sûreté pour la phase d'exploitation</b>	<b>15</b>
6.1.1 Objectifs de protection contre les rayonnements ionisants	15
6.1.2 Principes de la démarche de sûreté	16
6.1.3 Situations de dimensionnement, de dimensionnement du PUI et exclues	17
6.1.3.1 Définition des différentes situations de fonctionnement	17
6.1.3.2 Méthodologie d'identification et de classement des différentes situations	20
6.1.4 Scénarios de cumul et ECS	23
6.1.5 EIP et AIP	26
6.1.5.1 Les EIP	26
6.1.5.2 Les AIP	27
6.1.5.3 Qualification des EIP	27
6.1.5.4 Exigences définies	28
6.1.6 Situations post-accidentelles	28
6.1.7 Surveillance	30
<b>6.2 Démarche de sûreté pour la phase après fermeture</b>	<b>32</b>
6.2.1 Démarche d'identification et de classification des scénarios	32
6.2.2 Définition du domaine d'évolution normale	33
6.2.3 Scénarios d'évolution altérée	35
6.2.4 Démarche de sélection des biosphères	38
<b>7 Evaluation de sûreté en phase d'exploitation</b>	<b>41</b>
<b>7.1 Risques internes d'origine nucléaire</b>	<b>41</b>
7.1.1 Exposition interne et externe	41
7.1.1.1 Exposition interne	41
7.1.1.2 Exposition externe	42
7.1.1.3 Démarche d'optimisation	43
7.1.1.4 Adaptabilité de Cigéo aux combustibles usés et aux déchets en réserve	44
7.1.1.5 Dispositions de surveillance de l'ambiance radiologique et de contrôle de non contamination	45
7.1.2 Dissémination de substances radioactives	47
7.1.2.1 Premier système de confinement	47
7.1.2.2 Deuxième système de confinement	49
7.1.2.3 Confinement dynamique	50
7.1.2.4 Dispositions de surveillance du confinement	53
7.1.3 Criticité	55
7.1.3.1 Installations de surface, liaisons surface-fond et installation souterraine	55
7.1.3.2 Adaptabilité de Cigéo aux déchets en réserve	59

7.1.3.3	Adaptabilité de Cigéo aux combustibles usés	59
7.1.4	Thermique	63
7.2	<i>Agressions d'origine interne</i>	64
7.2.1	Incendie	64
7.2.1.1	Démarche	64
7.2.1.2	Situations enveloppes de dimensionnement	67
7.2.1.3	Situations de dimensionnement du PUI	69
7.2.1.4	Situations exclues	70
7.2.1.5	Dispositions de protection contre l'incendie	71
7.2.1.6	Conduite de la ventilation en situation d'incendie	74
7.2.1.7	Cas spécifique des enrobés bitumineux en alvéole MAVL	76
7.2.2	Explosion	85
7.2.2.1	Risque d'explosion lié à l'hydrogène de radiolyse en exploitation	85
7.2.2.2	Risque d'explosion lié à l'hydrogène de radiolyse lors des opérations de fermeture et de réouverture des alvéoles MAVL	89
7.2.2.3	Risque d'explosion lié à l'hydrogène de corrosion	89
7.2.2.4	Autres risques d'explosion	90
7.2.3	Transport et manutention des colis	91
7.2.3.1	Opérations de transport de colis de déchets en surface à l'extérieur des bâtiments	92
7.2.3.2	Opérations de manutention dans les installations	93
7.2.4	Retrait des colis et opérations de réouverture	100
7.2.4.1	Retrait des colis avant ou après opérations de fermeture	100
7.2.4.2	Opérations liées à la réouverture et stratégie de fermeture	108
7.2.5	Inondation d'origine interne	111
7.2.6	Activités humaines	112
7.2.7	Coactivité	118
7.2.8	Perte d'auxiliaires	123
7.2.9	Vieillessement et maintenance	124
7.3	<i>Agressions d'origine externe</i>	127
7.3.1	Séismes	127
7.3.1.1	Détermination de l'aléa sismique pour la phase d'exploitation	127
7.3.1.2	Dimensionnement sismique de Cigéo	130
7.3.2	Inondation externe	131
7.3.2.1	Installations de surface	131
7.3.2.2	Installation souterraine	134
7.3.3	Aléas météorologiques (installations de surface)	137
7.3.4	Risques liés à l'environnement industriel, aux voies de communication et à la chute d'aéronef (installations de surface)	141
7.4	<i>Effluents et déchets d'exploitation</i>	144
7.4.1	Gestion des effluents et déchets	144

7.4.2	Surveillance des eaux de surface et souterraines	145
7.5	<i>Evaluations d'impact</i>	148
7.5.1	Situations de dimensionnement	148
7.5.1.1	Evaluation des conséquences des situations incidentelles et accidentelles sur les travailleurs	148
7.5.1.2	Evaluation de l'impact sanitaire en situation de dimensionnement	148
7.5.1.3	Evaluation de l'impact environnemental en situation de dimensionnement	150
7.5.2	Situations de dimensionnement du PUI	150
8	Evaluation de sûreté en phase après fermeture	153
8.1	<i>Analyse des risques dans les installations souterraines</i>	153
8.1.1	Risque d'origine interne : criticité	153
8.1.2	Risque d'origine externe : séismes	153
8.1.2.1	Analyse déterministe	154
8.1.2.2	Évaluation probabiliste de l'aléa sismique	159
8.1.2.3	Conséquences de l'occurrence de séismes après fermeture	161
8.2	<i>Evaluation de la capacité globale de confinement</i>	162
8.2.1	Domaine d'évolution normale	162
8.2.1.1	Inventaire radiologique à terminaison	162
8.2.1.2	Principaux paramètres du scénario d'évolution normale	164
8.2.1.3	Transferts dans les encaissants du Callovo-Oxfordien et identification des exutoires	165
8.2.1.4	Enseignements des évaluations de performance et de l'impact associés au scénario d'évolution normale	166
8.2.2	Scénarios d'évolution altérée et What-if	175
8.2.3	Etude de sensibilité à l'architecture du stockage	180
8.2.4	Bilan des études de sensibilité à l'architecture du stockage	183
8.2.5	Scénarios d'intrusion humaine involontaire	185
8.2.6	Prise en compte des combustibles usés et des réserves	189
9	Conclusion générale	191
	RECOMMANDATIONS	193
	REFERENCES	195
	LISTE DES ACRONYMES	205

## INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Carte géologique du « secteur de MHM » et position de la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) dans la zone de transposition (ZT) (source Andra [53], modifiée).....	29
Figure 2 : Logs des principales formations géologiques du secteur de MHM. À gauche : couches du Mésozoïque. À droite : détail de la formation du Callovo-Oxfordien au niveau du Laboratoire souterrain [40].....	30
Figure 3 : Schéma de l'installation Cigéo comprenant les installations de surface et souterraine [39].....	32
Figure 4 : Schéma des périmètres des installations de la zone puits [39].....	33
Figure 5 : Bâtiments de l'installation EP1 [39].....	34
Figure 6 : Descenderies [39].....	35
Figure 7 : Localisation des puits dans l'installation souterraine [39].....	36
Figure 8 : Architecture à terminaison de l'installation souterraine [40]. Flèche rouge : direction de la contrainte principale (Nord-Nord-Ouest); flèche verte : direction du pendage des couches (Ouest-Nord-Ouest).....	37
Figure 9 : Schéma de la zone de soutien logistique Exploitation [39].....	37
Figure 10 : Schéma de la zone de stockage MAVL en fin de remplissage du quartier [39].....	38
Figure 11 : Schéma d'un alvéole MAVL [39].....	39
Figure 12 : Section type d'alvéole MAVL CS1, avec soutènement, revêtement et béton de remplissage. ....	40
Figure 13 : Schéma de la zone de stockage HA1/HA2 à terminaison [39].....	40
Figure 14 : Schéma d'un alvéole HA [39].....	41
Figure 15 : Coupe d'alvéole HA de type « AVM » chargée.....	42
Figure 16 : Bouchon d'exploitation HA [39].....	43
Figure 17 : Illustration d'un conteneur de stockage HA pour colis primaire de déchets vitrifiés de type R7T7 [39]... ..	44
Figure 18 : Modèles de colis de stockage HA [39].....	45
Figure 19 : Illustration d'un conteneur de stockage MAVL en béton (CS4) à couvercle vissé accueillant quatre colis primaires [39].....	46
Figure 20: Modèles de colis de stockage MAVL [39].....	46
Figure 21 : Représentation des ouvrages souterrains de la tranche T1 [41].....	47
Figure 22 : Schéma de fermeture de l'alvéole MAVL : illustration des scellements, au stade de fin d'APS [39]. Lors de l'exploitation : radiers et bétons de coffrage en blanc, béton de revêtement en gris foncé. Lors de la fermeture : béton de remplissage en gris clair, matériau argileux de scellement en orange. ....	50
Figure 23 : Schémas de principe des deux options de scellements horizontaux [39].....	51
Figure 24 : Localisation des scellements dans l'installation souterraine (cercles rouges) [39].....	52
Figure 25 : Schémas de principe des scellements verticaux et inclinés des liaisons surface-fond [39].....	53

Figure 26 : Schéma de principe de réception, de contrôle « C3 » et de basculement des emballages de transport verticaux [39]. (DDD : débit de dose) .....	53
Figure 27 : Schéma de principe de déchargement des emballages de transport verticaux et contrôle « C5 » [39]....	54
Figure 28 : Schéma de principe de déchargement des emballages de transport horizontaux et contrôle « C5 » [39].	54
Figure 29 : Schéma de principe de conditionnement de colis de stockage HA [39].....	55
Figure 30 : Schéma de principe de mise en hotte de colis de stockage HA [39] .....	56
Figure 31 : Schéma de principe de mise en hotte de colis de stockage MAVL [39]. En jaune, Machine à Levage Limité, qui soulève les hottes et les translate au ras du sol. ....	56
Figure 32 : À gauche, hotte MAVL (type 1) en vue éclatée. À droite, hotte HA en position de retrait du bouchon [39]. MLL : Machine à Levage Limité.....	57
Figure 33 : Schéma de principe du transfert incliné (haut) et illustration du funiculaire (bas) [39] .....	58
Figure 34 : Chariot de transfert des hottes [39] .....	59
Figure 35 : Tables tournantes [39].....	59
Figure 36 : Navette d'accostage MAVL [39] .....	60
Figure 37 : Table et façade d'accostage d'un alvéole MAVL [39] .....	60
Figure 38 : Table de réception de colis de stockage MAVL [39] .....	60
Figure 39 : Pont stockeur avec colis (position premier niveau) [39] .....	61
Figure 40 : Chariot stockeur [39] .....	61
Figure 41 : Robot pousseur HA et sa hotte [39].....	62
Figure 42 : Robot de retrait HA et sa hotte [39][42] .....	62
Figure 43 : Schéma de principe de la ventilation de l'installation souterraine [39] .....	63
Figure 44 : Principe de développement de l'installation souterraine [98] .....	64
Figure 45 : Principe de séparation des activités dans le quartier de stockage MAVL [39] .....	65
Figure 46 : Principe de séparation physique dans les galeries [39]. Les sas ne sont empruntés que par les services de secours en situation accidentelle, uniquement en cas de besoin. ....	66
Figure 47 : Conteneur de stockage CS4 retenu pour les déchets de graphite [48].....	67
Figure 48 : Installation souterraine avec stockage des déchets en réserves [48] .....	69
Figure 49 : Hotte blindée de transfert de colis de stockage multi-assemblages [47].....	70
Figure 50 : Coupe transversale des gabarits de passage des hottes de transfert combustibles et MAVL dans la descendrie [47] .....	70
Figure 51 : Exemple d'architecture de l'installation souterraine avec stockage des combustibles usés [47].....	71

Figure 52 : Modèles de surrection tectonique de 2008 (gauche) dit « maximaliste » et de 2011 (droite) dit « réaliste » [53].....	119
Figure 53 : Schéma de la zone endommagée initiale créée par l'excavation dans les unités argileuse (UA) et silto-carbonatée (USC) du Callovo-Oxfordien [40].....	132
Figure 54 : Schémas relatifs à l'expérimentation CDZ (auto-colmatage de l'EDZ) [212] .....	135
Figure 55 : Estimation des extensions horizontale et verticale de la zone de roche foisonnée (ZF) et de la zone de roche fracturée connectée (ZFC) à partir de la paroi excavée, en fonction du taux de vide [40]. Le taux de foisonnement pris en compte est de 10 % (transmis au cours de l'instruction). .....	139
Figure 56 : Esquisses piézométriques des calcaires du Barrois en période de basses eaux. A gauche, calcaires sublithographiques ; à droite, calcaires de Dommartin [73]. .....	145
Figure 57 : Coupe Est-Ouest de la géométrie des couches de l'Oxfordien (marnes de la Série grise et horizons producteurs) passant dans la partie Sud de la ZIRA, avec les altitudes en mètres (Z) selon les repères géographiques en Lambert III (X) [39]. Limites des couches représentées dans le modèle numérique de l'Andra en traits gris, sur lesquelles sont placées les couches des horizons producteurs Hp1-Hp4 en bleu, Hp5 en jaune et Hp6-Hp7 en violet, les Marnes inférieures à moyennes en rouge et les Marnes supérieures en orange. ....	147
Figure 58 : Représentation de la Série grise dans le modèle numérique de l'Andra. A gauche : carte de l'extension des Marnes inférieures à moyennes en gris clair et des Marnes supérieures en gris foncé (double flèche : position de la coupe en Figure 57). A droite : vue 3D des épaisseurs (mètres) des Marnes inférieures à moyennes en haut et des Marnes supérieures en bas (Andra, transmis au cours de l'instruction) .....	147
Figure 59 : Esquisses piézométriques de l'Oxfordien moyen (gauche) et de l'Oxfordien supérieur (droite) [53] .....	148
Figure 60 : Esquisse piézométrique du Dogger [53] .....	151
Figure 61 : Failles majeures retenues à l'échelle du secteur de MHM (échelle de couleur pour les failles jouant un rôle drainant : perméabilités en $10^x$ m/s ; en gris : failles dont la perméabilité a été réduite, jouant un rôle de barrière hydraulique) [88] .....	160
Figure 62 : Comparaison entre charges hydrauliques mesurées (gauche) et simulées (droite). a- Oxfordien supérieur ; b- Oxfordien moyen ; c- Dogger [53][88] .....	161
Figure 63 : Trajectoires du panache de particules dans l'Oxfordien moyen (gauche) et dans le Dogger (droite) [88] .....	162
Figure 64 - Directions et temps de transfert, dans l'Oxfordien à gauche et dans le Dogger à droite, au bout de 1 Ma de simulation dans le modèle d'évolution géomorphologique « <i>maximaliste</i> » [88]. Les flèches blanches indiquent les exutoires. ....	164
Figure 65 - Directions des particules, dans l'Oxfordien à gauche et dans le Dogger à droite, dans la configuration à l'actuel (jaune) et en configuration géoprospective à 1 Ma (vert) dans le modèle d'évolution géomorphologique « <i>phénoménologique</i> » [88]. Les flèches blanches indiquent les exutoires. ....	165
Figure 66 : Illustration des différents régimes d'altération du verre sous eau au cours du temps [40].....	178

Figure 67 : Illustration de l'évolution de la vitesse d'altération du verre et de la vitesse de relâchement des radionucléides et toxiques chimiques en fonction du temps [40] .....	180
Figure 68 : Terme source total issu des colis de stockage de combustibles usés et sensibilité aux paramètres utilisés dans les modèles de relâchement instantané (IRF) et différé. ....	194
Figure 69 : Sensibilité de l'espacement entre alvéoles HA au module d'Young (E) et à la perméabilité (K) du Callovo-Oxfordien - fin d'APS : cas des alvéoles HA2 avec une période d'entreposage de 85 ans (contraintes positives en traction) (d'après Andra ; commentaires IRSN) .....	211
Figure 70 : Concept de fermeture de l'alvéole HA (d'après Andra) .....	212
Figure 71 : Voies de transfert de l'hydrogène à l'échelle du stockage (bilan massique) (d'après Andra) .....	214
Figure 72 : Méthodologie d'identification et de classement des situations de dimensionnement et des situations hors dimensionnement [97].....	21
Figure 73 - Choix des hypothèses et des données pour les situations « <i>de référence</i> » et « <i>enveloppe</i> » (transmis par l'Andra au cours de l'instruction).....	34
Figure 74 : Alimentation électrique du pont stockeur en alvéole MAVL [42] .....	103
Figure 75 : Positionnement des « acteurs FOH » dans l'organisation du projet Cigéo [44] .....	113
Figure 76 : Comparaison des spectres SMS proposés par l'Andra. En vert (SDD) : spectre de dimensionnement issu de l'évaluation probabiliste de 2005, retenu au stade du DOS. En noir : SMF. En violet : analyse de sensibilité aux incertitudes sur le SMS évalué par méthode déterministe en vue de la DAC. Le spectre SMS « médian » couvre par définition 50 % des valeurs obtenues en prenant en compte les incertitudes. ....	129
Figure 77 : Arbre logique déterministe considéré par l'Andra pour le calcul du niveau SMPP sur le site de Cigéo [108]. Branche 1 : « <i>modèle structural régional</i> » ; branche 2 : « <i>modèle structural régional</i> ». ....	155
Figure 78 : « Spectre SMPP 2004 » de référence au stade du DOS (en noir) et spectres étudiés pour la DAC, pour la localisation « descenderies » : évaluation déterministe (en orange) avec étude de sensibilité aux centiles 16, 50 et 84 % et spectres (valeurs moyennes) obtenus pour les 3 « sources » retenues ; évaluation probabiliste UHRS à 60 000 ans (en vert) aux centiles 16, 50 et 84 % [108]. ....	157
Figure 79 : Débits molaires au cours du temps au toit du Callovo-Oxfordien et en sortie des liaisons surface-fond pour l' <sup>129</sup> I pour les SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à gauche) et les scénarios <i>What-if</i> de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à droite) (les valeurs de paramètres retenues pour caractériser les autres composants du stockage sont celles de la situation « <i>de référence</i> » du SEN).....	177
Figure 80 : Débits molaires au cours du temps au toit du Callovo-Oxfordien et en sortie des liaisons surface-fond pour l' <sup>129</sup> I pour les SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à gauche) et les scénarios <i>What-if</i> de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à droite) (les valeurs de paramètres retenues pour caractériser les autres composants du stockage sont celles de la situation « <i>enveloppe</i> » du SEN).....	177
Figure 81 : Débits molaires au cours du temps au toit et au mur du Callovo-Oxfordien en situation « <i>enveloppe</i> » (de gauche à droite : SEN, SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (tous scellements défailants), Scénario <i>What-if</i> de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (tous scellements défailants)) .....	178

Figure 82 : Influence de la longueur des galeries de liaison - SEN et *What-if* 3 en situation « de référence », quartier MAVL, 129I : débits molaires au niveau des indicateurs intermédiaires et sortant des ouvrages de liaison surface-fond (en rouge) et du Callovo-Oxfordien (en vert). (Andra, [123]). Le modèle JAPS05 correspond au modèle utilisé dans les évaluations d'impact présentées dans le DOS ( $L_{ref} \approx 300$  m). Les modèles GALZP-2 ( $L_{ref}+200m$ ) et GALZP-2 ( $L_{ref}+400m$ ) postulent des allongements de galerie respectivement de 200 m et 400 m.....182

Figure 83 : Localisations possibles des forages par rapport au système de stockage et aux panaches de radionucléides [40].....186

Figure 84 : Représentation des situations de forages retenus pour l'évaluation de sûreté après fermeture à l'échéance de la DAC [40] .....188

## INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : Fonctions du colis de stockage MAVL en phase d'exploitation [39].....	74
Tableau 2 : Fonctions du colis de stockage HA en phase d'exploitation [39].....	75
Tableau 3 : Inventaire des colis primaires de déchets HA et MAVL du PIGD-D [162] .....	79
Tableau 4 : Inventaires des colis primaires de déchets HA et MAVL du PIGD-D [162] et du PIGD-A [161] .....	80
Tableau 5 : Niveaux de connaissance retenus pour déterminer l'inventaire de référence et facteurs de marge associés [40] .....	96
Tableau 6 : Déchets FAVL mis en réserve [48] .....	105
Tableau 7 : Déchets mis en réserve correspondant au fonctionnement et au démantèlement d'un réacteur EPR supplémentaire [48] .....	106
Tableau 8 : Radionucléides de période supérieure à 100 ans dont l'activité dans le stockage augmenterait de plus de 3 % avec l'accueil des déchets en réserve [48] .....	107
Tableau 9 : Dimensions et masses des colis de stockage de combustibles usés [47] .....	110
Tableau 10 : Nombre de colis primaires de combustibles usés et de colis de stockage associés .....	110
Tableau 11 : Profondeur estimée (en m) par l'Andra des niveaux stratigraphiques recherchés au niveau Laboratoire souterrain (EST210), du barycentre des puits de Cigéo et à l'aplomb du milieu de la zone HA sur la ZIRA. UT, UA1, UA2, UA3 : cf. Figure 2.....	121
Tableau 12 : Perméabilités verticales (Kv) et horizontales (Kh) du Callovo-Oxfordien .....	125
Tableau 13 : Résultats du calage Andra (modèle « de référence ») .....	158
Tableau 14 : Paramètres retenus en référence pour les déchets métalliques dans le cas où le modèle par corrosion est applicable [92] .....	176
Tableau 15 : Taux de relâchement (%) retenu pour les radionucléides contribuant à l'IRF(t=0) - valeurs moyennes (valeurs pénalisantes) .....	192
Tableau 16 : Taux de relâchement (%) retenu pour l' <sup>129</sup> I contribuant à l'IRF(t=0) - valeurs moyennes (valeurs pénalisantes) .....	192
Tableau 17 - Objectifs de protection contre les rayonnements ionisants (Andra, transmis au cours de l'instruction) 15	
Tableau 18 : Définition de la robustesse des dispositions pour chaque type de ligne de défense [97] .....	20
Tableau 19 : Délais d'atteinte du critère de température en peau de fût .....	81
Tableau 20 - délai d'atteinte d'une concentration de 75 % de la LIE pour un débit de 40 L/colis de stockage/an (Andra, [39]).....	86
Tableau 21 : Températures extrêmes présentées par l'Andra.....	138
Tableau 22 : Données retenus par l'Andra pour l'aléa vent extrême.....	139

Tableau 23 : Données retenus par l'Andra pour l'aléa tornade. ....	140
Tableau 24 : Probabilités annuelles de chute pour chaque cible et chaque famille d'aéronef [39] .....	143
Tableau 25 : Caractéristiques considérées pour établir les spectres SMPP du modèle par faille (branche 1 de l'arbre logique de la Figure 77) [108]. ....	156
Tableau 26 : Calcul IRSN des temps de retour « TR » d'un aléa considéré en fonction de la durée de vie cible « Dv » d'une installation et de la probabilité de dépassement « Pt » de cet aléa. Ce calcul est fondé sur l'hypothèse que la sismicité est un processus « poissonnien » : $TR = -DvLn(1 - Pt)$ .....	161
Tableau 27 : Valeurs des principaux paramètres retenues pour la situation « <i>de référence</i> » et la situation « <i>enveloppe</i> » par l'Andra pour évaluer le scénario d'évolution normale [118] .....	164
Tableau 28 - Bilan massique sur un million d'années, maximum de débit molaire en différentes localisations du milieu géologique pour le SEN (situation « <i>de référence</i> » en haut et situation « <i>enveloppe</i> » en bas) .....	172
Tableau 29 - Facteurs de conversion ( $Sv.an^{-1}$ par $Bq.L^{-1}$ ) appliqués par l'Andra pour les groupes de référence « multi-activités » aux exutoires du Barrois et du Dogger, pour les biosphères chaude et tempérée. ....	173
Tableau 30 - Doses maximales estimées par l'Andra aux exutoires du Barrois et du Dogger pour les biosphères chaude et tempérée. ....	174
Tableau 31 - Valeurs de perméabilités retenues pour chaque scénario et configuration de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (situation « <i>de référence</i> » en haut et situation « <i>enveloppe</i> » en bas) .....	176

# **1 INTRODUCTION**

## **1.1 OBJET DU PRESENT RAPPORT**

Par lettre ASN/CODEP-DRC-2016-021886 du 2 août 2016 [1], le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé aux Présidents des groupes permanents d'experts pour les déchets (GPD) et pour les laboratoires et les usines (GPU), l'avis des groupes d'experts qu'ils président sur le dossier « Projet Cigéo<sup>1</sup> - Dossier d'Options de Sûreté » (DOS), en particulier sur la pertinence des hypothèses, démarches, objectifs de performance et concepts retenus, notamment en termes d'études ou justifications complémentaires qui seront nécessaires pour constituer une demande d'autorisation de création (DAC). La lettre précitée (cf. Annexe A1 du présent rapport) demande d'analyser l'ensemble des documents constituant le DOS (cf. chapitre 1.2) dans le cadre d'une instruction unique, au regard :

- des attentes de l'ASN sur le contenu de ce dossier, transmises à l'Andra en décembre 2014 [2],
- du guide de sûreté du 12 février 2008 de l'ASN relatif au stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde, appelé « Guide de l'ASN relatif au stockage géologique » [3],
- des exigences applicables aux Installations Nucléaires de Base (INB) précisées dans l'arrêté du 7 février 2012 [4] et dans la décision de l'ASN du 17 novembre 2015 [5] relative au rapport de sûreté des INB,

en veillant à expliciter les interrelations entre les chaînes de conception résultant des exigences de sûreté en exploitation du stockage et ceux liés à la sûreté après fermeture. L'ASN précise que doivent être examinées à ce titre :

- la *démarche de sûreté et les données d'entrée* relatives aux colis et au site ;
- la *sûreté en exploitation* : choix relatifs aux méthodes de construction et à la fermeture de l'installation, maîtrise des risques d'origine externe et interne (incluant les spécificités de Cigéo relatives au vieillissement et à la gestion des coactivités), premières évaluations complémentaires de sûreté (ECS) ;
- la *sûreté après fermeture* : modélisation du système de stockage (hypothèses, outils, phénoménologie, incertitudes...), choix des scénarios.

En outre, l'ASN [1] souhaite que soit examinée la prise en compte dans le DOS de ses demandes ainsi que des engagements de l'Andra, formulés lors des précédentes instructions (cf. chapitre 1.3) et attendus au stade du DOS. Elle demande également que soit établi l'avancement du Dossier sur l'ensemble des demandes et engagements qui ont été formulés dans la perspective du dépôt du dossier de DAC. Outre les éléments concernant la démonstration de sûreté de l'installation, ces demandes et engagements concernent notamment :

- la *réversibilité* : pertinence des options prises à ce stade, au regard des exigences d'adaptabilité du stockage et de récupérabilité des colis de déchets dans différentes situations de fonctionnement de l'installation, en cohérence avec l'avis de l'ASN du 31 mai 2016 [7] ;

---

<sup>1</sup> Centre Industriel de stockage GÉologique

- *la phase pilote* : éléments de définition retenus vis-à-vis de cette phase, incluant la démarche d'établissement de l'inventaire strictement nécessaire au confortement de la démonstration de sûreté ;
- *la surveillance* : principes et objectifs du programme de surveillance ;
- *les facteurs organisationnels et humains (FOH)* : pertinence de l'organisation mise en place par l'exploitant pour intégrer les FOH dans la conception ainsi que la démarche d'identification des activités humaines.

Enfin, l'ASN demande que les groupes permanents tirent profit, pour formuler leur avis, de la revue internationale menée par les pairs sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) à l'automne 2016 [8]. Cette revue a porté sur le programme de R&D mené par l'Andra en lien avec le développement du projet, le plan de surveillance en exploitation, la définition des scénarios pour la sûreté en exploitation comme à long terme et enfin, les actions post-Fukushima (par exemple les scénarios extrêmes). Les résultats de cette revue sont présentés en Annexe A2.

Le présent rapport est composé de trois tomes, portant respectivement sur :

- l'état des connaissances sur le site et les composants du stockage, dans leur état initial puis résultant de leur évolution possible en exploitation et après fermeture du stockage (tome 1),
- l'analyse de sûreté en exploitation et après fermeture (tome 2),
- les annexes.

Le premier tome présente, dans le chapitre 1, le dossier de l'Andra et rappelle le contexte général de la présente instruction, puis décrit dans le chapitre 2 le site, les colis de déchets, les installations de Cigéo ainsi que le calendrier du projet. Les chapitres suivants portent sur l'analyse par l'IRSN du DOS, avec l'examen de l'état des connaissances sur les inventaires des colis de déchets radioactifs (chapitre 3), sur le site de Meuse/Haute-Marne (MHM) (chapitre 4) et sur l'évolution des composants du système de stockage (chapitre 5).

Le second tome présente l'examen par l'IRSN de la démarche de sûreté de l'Andra pour la phase d'exploitation et la phase de post-fermeture du stockage (chapitre 6), puis examine l'évaluation de sûreté présentée par l'Andra pour la phase d'exploitation (chapitre 7) et pour la phase après fermeture (chapitre 8). Enfin, une conclusion générale est réalisée sur l'examen par l'IRSN du projet Cigéo au stade du DOS (chapitre 9).

Les conclusions de l'IRSN résultant de l'instruction sont repérées dans le texte de la façon suivante :

- en **caractères gras encadrés avec une numérotation précédée de la mention « R »** figurent les conclusions qui font l'objet de propositions de recommandations présentées lors de la réunion des GPD et GPU ;
- en **caractères gras précédés d'une barre verticale double épaisse** figurent les conclusions ayant fait l'objet d'engagements de la part de l'Andra à l'issue de la « réunion préparatoire » à la réunion du groupe permanent tenue le 15 mars 2017, par la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 (cf. Annexe A3) ;
- en **caractères gras** sont mentionnées les autres conclusions de l'IRSN.

## 1.2 PRESENTATION DU DOSSIER

Le **DOS** est composé de plusieurs documents, qui entrent tous dans le périmètre du présent examen. Ainsi, par lettre Andra DG-16-0105 du 6 avril 2016 [38], l'Andra a transmis les documents suivants :

- Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation, appelé « **DOS-Expl** » [39] dans le présent rapport ;
- Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture, appelé « **DOS-AF** » [40] dans le présent rapport ;
- Proposition de plan directeur pour l'exploitation, appelé « **PDE** » [41] dans le présent rapport ;
- Dossier d'options techniques de récupérabilité appelé « **DORec** » [42] dans le présent rapport ;
- Spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires dans **Cigéo** [43] ;
- Esquisse de la notice présentant les capacités techniques de l'exploitant de **Cigéo** et les réflexions sur la stratégie industrielle [44] ;
- Glossaire des livrables CIGEO 2015 [45].

Par lettre Andra DG-16-0141 du 13 mai 2016 [46], l'Andra a transmis les documents complémentaires suivants :

- Adaptabilité de **Cigéo** pour le stockage de combustibles nucléaires usés [47] ;
- Adaptabilité de **Cigéo** pour le stockage des déchets en réserves [48].

Par lettre ASN CODEP-DRC-2016-021729 du 16 juin 2016 [49], l'ASN a accusé réception de ce dossier et demandé que l'Andra apporte des compléments sur l'impact de **Cigéo** sur l'environnement, sur les essais technologiques réalisés et sur l'approche de l'Andra pour intégrer le rôle des facteurs humains dans la maîtrise des risques. L'ASN a également demandé dans la lettre précitée de transmettre les éléments démontrant la bonne prise en compte à ce stade des engagements 2014 D2, 2015 D10, 2015 D11 pris par l'Andra [1], relatifs respectivement à la justification de l'architecture retenue, à la démonstration de la possibilité du retrait de colis au cours de la phase d'exploitation et au rétablissement des différentes fonctions du stockage à la suite d'une situation accidentelle. Une liste de 33 documents complémentaires, issues des références Andra, à transmettre pour l'instruction est également établie dans la lettre précitée. Enfin, constatant des manques trop importants pour instruire le document relatif aux spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à **Cigéo** [43], l'ASN a demandé à l'Andra de transmettre, sous un délai d'un mois (i.e., pour juillet 2016), une version complétée dudit document.

Sur les trois thématiques abordées au premier point, l'Andra a transmis une documentation explicitant l'état d'avancement de ses travaux. Sur le dernier point relatif aux spécifications préliminaires d'acceptation, l'Andra a transmis un document présentant la méthode d'élaboration de ces spécifications [50]. L'ensemble de ces documents a été intégré au dossier instruit.

Au cours de l'instruction, le dossier examiné a été complété par certains documents dits « de second niveau » comprenant notamment les 33 documents précités, listés dans les documents référencés du présent rapport, ainsi que par les réponses de l'Andra aux questions posées par l'IRSN.

## 1.3 CONTEXTE

La loi de programme du 28 juin 2006 [9] relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs prévoit la poursuite des études et recherches sur le stockage réversible en couche géologique profonde « *de sorte que, au vu des résultats des études conduites, la demande de son autorisation prévue à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement puisse être instruite en 2015* ». Le débat public préalable au dépôt de la **DAC** pour une installation

de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute activité (HA) et moyenne activité à vie longue (MAVL), prévu par l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, s'est tenu du 15 mai au 15 décembre 2013. À la suite de ce débat, l'Andra a proposé une modification du calendrier de développement du projet Cigéo par délibération de son conseil d'administration du 5 mai 2014 [10], en intégrant en particulier le dépôt d'un DOS, préalablement à la DAC, ainsi qu'en introduisant une « phase industrielle pilote » avant le fonctionnement à cadence industrielle de l'installation. La lettre ASN/CODEP-DRC-2014-016991 du 10 juillet 2014 [12] précise que sur la base de ce nouveau calendrier, l'Andra remettrait en 2015 à l'Etat une proposition de plan directeur pour l'exploitation de Cigéo et à l'ASN ce DOS, en préalable au dépôt de la DAC de Cigéo. La Loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016 (dite « Longuet-Namy ») [11], précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible, modifie la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 en portant à 2018 l'instruction de la DAC, et modifie l'article L. 542-10-1 en définissant la réversibilité et introduisant la phase pilote dans la réglementation.

Le DOS, transmis à l'ASN en avril et mai 2016 (cf. chapitre 1.2), se positionne ainsi selon l'Andra entre la fin des études d'avant-projet sommaire (APS) et le début de celles de l'avant-projet détaillé (APD), dont les résultats constitueront les éléments majeurs du dossier venant en support de la DAC.

### Maîtrise des risques en exploitation

L'Andra a développé sa démarche de maîtrise des risques en exploitation dans divers dossiers transmis à l'ASN depuis 2005. Les éléments saillants de leur évaluation par l'IRSN sont rappelés ci-dessous.

Il convient de rappeler qu'au stade du « Dossier 2005 Argile », dénommé « Dossier 2005 » dans le présent rapport, établi par l'Andra dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 dite « loi Bataille » relative à la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue, et visant à démontrer la faisabilité d'un stockage profond en couche géologique argileuse, l'Andra présentait une première évaluation de la sûreté de l'installation de stockage en phase d'exploitation. Ce dossier a fait l'objet d'une instruction par l'IRSN présentée les 12 et 13 décembre 2005 devant le GPD [13], d'un avis du GPD [14] et d'un avis de l'ASN [15] qui a estimé que les principes de conception étaient globalement satisfaisants au regard des risques envisagés. Le GPD estimait [14] que le projet de stockage présenté par l'Andra était faisable mais assortissait ses conclusions de recommandations relatives notamment aux systèmes de maintenance, aux dispositions à retenir au regard du stockage des enrobés bitumés (risque incendie) et aux études de sûreté-criticité. En outre, l'instruction concluait que les études présentées par l'Andra, qui intégraient un premier retour d'expérience industriel d'installations nucléaires et minières, montraient qu'il devait être possible de séparer les activités de construction et d'exploitation nucléaires selon les principes retenus par l'Andra et que les dispositions de stockage envisagées ne présentaient pas d'obstacle au transfert des colis de déchets dans des conditions sûres. Néanmoins, la définition des moyens et procédés d'exploitation et l'évaluation de sûreté associée restaient encore à un stade préliminaire et certains points, qui pourraient avoir une incidence forte sur les concepts de stockage qui seraient retenus, nécessitaient d'importants compléments d'études. Aussi, l'ASN [15] a notamment demandé de confirmer le bien fondé des choix de concepts de stockage par des démonstrateurs d'ouvrages de stockage et des études relatives à la sûreté, en particulier pour les dispositifs de ventilation permettant de limiter le risque d'explosion dû à la présence de gaz de radiolyse et pour la reprise des colis de déchets dans les alvéoles de stockage.

L'Andra a retenu en 2009 une zone de 30 km<sup>2</sup> appelée « ZIRA » (Zone d'Intérêt pour une Reconnaissance Approfondie), en vue de l'implantation de l'installation. Il est à noter que l'avis de l'IRSN [24] sur le choix de la ZIRA

pour implanter un stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien, était davantage orienté vers la compatibilité des caractéristiques de la ZIRA avec la sûreté à long terme du stockage (cf. ci-dessous) ; l'ASN [25] soulignait cependant la nécessité de reconnaître la formation karstifiée du Barrois au futur emplacement des installations de surface, afin de prévenir le risque d'inondation lié à des poches karstiques lors du creusement.

Le « Dossier 2009 » comprenant des options de conception, de sûreté et de réversibilité de l'installation de stockage, a fait l'objet d'une instruction par l'IRSN présentée les 29 et 30 novembre 2010 devant le GPD [16], d'un avis du GPD [17], et d'un avis de l'ASN [18]. L'Andra y développait son analyse des risques associés à l'exploitation du stockage et présentait les principales options retenues pour maîtriser ces risques, introduisait des évolutions majeures de concepts telles que le transfert de colis de déchets par descenderie, le principe d'alvéoles MAVL « passants » et des galeries de transfert moins nombreuses et plus larges. A l'issue de l'instruction, l'ASN [18] a notamment demandé à l'Andra, à l'échéance de la DAC, de (i) compléter l'analyse des risques liés à une défaillance des colis de déchets en tant que première barrière de confinement, (ii) justifier l'exclusion d'un scénario d'incendie lié à la reprise des réactions exothermiques à l'intérieur des colis, notamment de boues bitumées, (iii) présenter les dispositions de limitation des conséquences liées à un feu dans les alvéoles MAVL en cas de défaillance du système d'extinction embarqué sur l'engin de stockage. En outre, l'Andra s'engageait à préciser la démarche de sûreté retenue, plus particulièrement les critères de sélection des scénarios retenus notamment pour le dimensionnement de l'installation, et à compléter son analyse des risques en phase d'exploitation concernant des points tels que la prise en compte de l'évolution des matériaux, la dissémination de substances radioactives, l'incendie, l'explosion, la manutention des colis de déchets et la coactivité.

Dans son avis sur les commentaires de l'Andra relatifs au rapport de l'IEER transmis en 2012, l'IRSN [26] estimait qu'afin d'apporter des éléments de démonstration probants des performances pouvant être atteintes par les solutions techniques qui seront retenues par l'Andra, la confirmation au moyen d'essais en vraie grandeur de leur bien-fondé restait d'actualité, mais que celle-ci ne pourrait pas être apportée en totalité avant la DAC. Ainsi, une phase de qualification *in situ* par des essais en vraie grandeur, qui précéderait la mise en service nominale de Cigéo, était considérée comme indispensable, assortie de prescriptions de sûreté particulières (limitation de l'inventaire stocké aux besoins de la qualification des concepts retenus et modalités d'exploitation spécifiques apportant l'assurance de pouvoir récupérer en toutes circonstances les colis stockés).

A l'issue de l'instruction par l'IRSN [19] du « Dossier Jesq03 » en 2013 qui présentait, à un stade intermédiaire de la réalisation de l'esquisse du projet, des évolutions de concept ainsi que leur impact sur la sûreté de l'installation, l'ASN [20] estimait que des éléments de conception allaient dans un sens favorable à la sûreté en phase d'exploitation du stockage. En particulier, l'ASN soulignait que (i) les choix structurants en matière d'architecture du stockage qui avaient été considérés favorables en 2009 étaient maintenus voire renforcés (faisceau de deux galeries de liaison dans la zone de stockage MAVL, séparation physique des activités nucléaires et de travaux au niveau de la zone centrale, minimisation du nombre d'interfaces entre zones nucléaire et de travaux) et (ii) le référentiel incendie élaboré par l'Andra constituait une première étape indispensable pour permettre la mise en œuvre de dispositions de protection contre l'incendie adaptées aux spécificités de Cigéo. De plus, (iii) l'abandon de l'utilisation d'engins de manutention propulsés par un moteur thermique et la limitation des matières combustibles dans les zones nucléaires, ainsi que (iv) le transfert de colis sur rails et la réduction du nombre de moyens de manutention possibles dans les alvéoles MAVL allaient dans le sens d'une meilleure maîtrise de la sûreté en exploitation. L'ASN considérait toutefois, s'agissant de la démarche de l'Andra pour la sélection des scénarios de

sûreté en exploitation, que le choix des scénarios retenus pour le dimensionnement de l'installation devait être justifié dans le dossier accompagnant la [DAC](#), que cette démarche devait intégrer celle d'[ECS](#) et, pour ce qui concerne les dispositions concrètes de maîtrise des risques incendie, qu'une attention particulière devait être portée à la maîtrise des risques liés à la coactivité, le désenfumage des galeries et l'intervention des secours en cas d'incendie dans les ouvrages souterrains. Par ailleurs, l'ASN rappelait que les performances attendues pour le premier système de confinement statique (constituée du colis primaire et éventuellement d'un conteneur de stockage) devaient être obtenues en priorité par le colis primaire, conformément au principe de confinement « au plus près » de la radioactivité, issu notamment du Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3]. Enfin, l'ASN soulignait la nécessité d'identifier rapidement les échéances de disponibilité des éléments de démonstration nécessaires à l'examen de la sûreté de [Cigéo](#), en demandant la liste des éléments techniques dont les performances devaient être confirmées par des résultats d'essais ou de démonstrateurs, ainsi que leur calendrier de réalisation.

Le dossier « [Etudes remises depuis 2009](#) », élaboré par l'Andra en 2012, portant notamment sur le programme industriel de gestion des déchets ([PIGD](#)) ainsi que sur le modèle de relâchement des [CU](#), a fait l'objet d'une instruction par l'IRSN présentée le 5 février 2013 devant le [GPD](#) [27], d'un avis du [GPD](#) [28] et d'un avis de l'ASN [29]. L'ASN [29] indiquait que les principes retenus par l'Andra pour établir l'inventaire présenté dans le [PIGD](#) étaient dans l'ensemble satisfaisants mais que l'inventaire devait prendre en compte l'ensemble des stratégies industrielles envisagées par les producteurs, en particulier pour ce qui concerne la durée de fonctionnement des réacteurs et leur puissance ainsi que la gestion des combustibles usés du [CEA](#) en intégrant les déchets résultant du traitement de ces combustibles et, s'il y a lieu, les combustibles qui ne seraient pas retraités. L'ASN indiquait que la prise en compte dans l'inventaire du [PIGD](#) des colis de déchets pour lesquels l'examen du « Dossier 2005 » n'avait pas fait apparaître de difficulté rédhibitoire était justifiée, sous réserve que la sûreté de stockage de ces colis ait été complètement démontrée, en particulier pour les risques d'incendie associés à la manutention et au stockage des colis de boues bitumées. Le [GPD](#) [28] émettait en outre des réserves sur les conteneurs d'entreposage sans blocage de déchets, sur le conditionnement retenu pour les déchets technologiques alpha, ainsi que sur le conditionnement en colis dit C5 des boues entreposées dans les silos de l'atelier STE2 de l'établissement AREVA NC La Hague. Concernant l'ordonnement de stockage des colis, l'ASN indiquait qu'il était important que les colis placés dans la première tranche soient aussi passifs que possible, c'est-à-dire que leurs caractéristiques soient très peu sensibles aux agressions qu'ils pourraient subir, afin de minimiser les conséquences des incidents qui pourraient survenir durant cette phase et de pouvoir retirer ces colis de manière sûre en cas de nécessité d'intervenir dans les alvéoles ; dans cette perspective, l'ASN ajoutait que les colis de déchets bitumés ne devaient pas être stockés dans cette première tranche d'exploitation. Par ailleurs, l'ASN [29] précisait que l'ordonnement de stockage des colis devait permettre d'acquérir l'expérience nécessaire pour évaluer et conforter les concepts de stockage retenus ; aussi, l'ASN jugeait essentiel, comme le fait l'Andra, qu'une phase de « montée en puissance » progressive de l'exploitation de l'installation de stockage géologique profond précède son exploitation courante, permettant ainsi d'acquérir un retour d'expérience suffisant sur le comportement géomécanique des alvéoles et d'éprouver les méthodes d'exploitation. S'agissant enfin du modèle opérationnel de relâchement des [CU](#), l'ASN indiquait que l'évolution de celui-ci ne remettait pas en cause les résultats de l'étude de faisabilité réalisée par l'Andra en 2005.

Le dossier de l'Andra « [Maîtrise des risques en exploitation](#) » transmis à l'ASN en 2014 correspondait à la fin de la phase dite d'esquisse du projet [Cigéo](#) (Jalon Jesq05), avant le démarrage des phases dites d'[APS](#) et d'[APD](#). Il a fait l'objet d'une instruction par l'IRSN présentée le 10 décembre 2014 devant le [GPD](#) et le [GPU](#) [21], d'un avis du [GPD](#) et du [GPU](#) [22] et d'un avis de l'ASN [23]. L'ASN [23] soulignait plusieurs avancées notables en terme de maîtrise des

risques en exploitation, en particulier pour ce qui concerne l'incendie, une amélioration des principes de confinement dans les alvéoles MAVL (mise en œuvre d'un confinement dynamique en complément d'un second système de confinement statique) et une architecture de l'installation souterraine facilitant la gestion des risques liés à la coactivité entre les zones nucléaires du stockage et les activités de construction. L'ASN soulevait néanmoins plusieurs points majeurs nécessitant une attention particulière comme la démarche de sélection des scénarios retenus et exclus, les objectifs de protection contre les rayonnements ionisants ou l'option de stockage direct de certains colis primaires. L'ASN mettait en outre en exergue la nécessité de présenter l'examen d'un scénario d'emballage de réactions exothermiques à l'intérieur de plusieurs colis de boues bitumées et de préciser les dispositions de maîtrise des relâchements de substances radioactives en provenance des secteurs de feu en cas d'incendie dans la partie utile ou la cellule de manutention des alvéoles MAVL. Concernant le rétablissement des diverses fonctions du stockage à la suite d'une situation accidentelle, l'ASN soulignait l'importance que le DOS s'attache à présenter les enjeux de sûreté en exploitation comme à long terme en distinguant en particulier la possibilité (i) de poursuivre les opérations de stockage, (ii) de retirer des colis, impliqués ou non dans la situation accidentelle et (iii) de mettre en œuvre les opérations de fermeture du stockage, cette démarche devant notamment intégrer l'analyse du retour d'expérience existant sur le sujet. Enfin, les GPD et GPU recommandaient [22] que les dispositions de surveillance pendant la phase d'exploitation permettent de détecter au plus tôt une montée progressive de la température afin de pouvoir gérer les risques de reprise de réactions exothermiques.

### Sûreté après fermeture

L'évaluation de la sûreté de Cigéo après sa fermeture a été documentée par l'Andra au cours de l'évolution de ce projet dans plusieurs dossiers transmis à l'ASN, dont les examens successifs sont rappelés ci-dessous.

Après le dossier de Demande d'Autorisation d'Installation et d'Exploitation d'un laboratoire souterrain dans le site de l'Est (DAIE), dont l'examen par l'IRSN a été présenté devant le groupe permanent chargé des installations destinées au stockage à long terme des déchets radioactifs le 10 mars 1997, l'Andra a transmis divers dossiers thématiques qui ont fait l'objet d'examens par l'IRSN, par le GPD ainsi que d'avis de la DGSNR (Direction Générale de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection, antérieure à la création de l'ASN). Des examens par l'IRSN ont porté en particulier sur le référentiel géologique du site de Bure et les options initiales de conception (OIC) en 2000, sur le programme de recherche de l'Andra en 2001, sur le référentiel géologique et la modélisation hydrogéologique en 2002, le « Dossier 2001 » en 2003, sur le comportement mécanique de la roche hôte ainsi que sur les phénomènes géochimiques régissant le relâchement et le transport de radionucléides en 2004.

Dans le « Dossier 2005 », qui présentait la première évaluation détaillée de la sûreté de l'installation après sa fermeture, basée sur les étapes précédentes mentionnées ci-dessus, l'Andra a retenu une « zone de transposition » (ZT) d'environ 250 km<sup>2</sup>, située au Nord du Laboratoire souterrain de MHM, sur la base des résultats de caractérisation de cette zone acquis jusqu'alors, en vue de l'implantation de l'installation de stockage. L'IRSN [13] avait conclu de son expertise de ce dossier à la faisabilité d'un stockage géologique de déchets HA-MAVL en formation argileuse dans la ZT.

Après avoir mené des investigations complémentaires en 2007-2008 dans la ZT (14 nouveaux forages profonds dont un atteignant le Trias, 11 profils sismique 2D et levés cartographiques de terrain), l'Andra a retenu une zone plus restreinte appelée « ZIRA ». Dans son avis rendu en 2009 [24] sur le choix par l'Andra de la « ZIRA, l'IRSN estimait

que les travaux de reconnaissance menés en 2007-2008 ne mettaient pas en évidence d'éléments nouveaux susceptibles de remettre en cause les conclusions émises en 2005 sur la faisabilité d'un stockage en formation argileuse dans la ZT. L'approbation du choix de la ZIRA par l'ASN a été notifiée le 5 janvier 2010 [25]. L'ASN soulignait qu'il pourrait être nécessaire d'adapter les concepts en raison d'un risque d'endommagement lié à l'excavation accru, la profondeur d'implantation du stockage dans la ZIRA dépassant celle du niveau principal du Laboratoire.

A l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » [16], l'IRSN observait que certaines options de conception étaient modifiées par rapport à celles retenues en 2005, motivées par les contraintes d'exploitation du stockage (cf. ci-dessus), mais estimait que dans l'ensemble, ces évolutions n'étaient pas de nature à modifier ses conclusions de 2005 [13] quant à la faisabilité du stockage. Toutefois, les connaissances acquises sur la compréhension de l'endommagement de la roche autour des grands ouvrages et sur la mise en œuvre des scellements n'étaient pas suffisantes [16] pour démontrer à elles seules la maîtrise de la sûreté de ces ouvrages. Aussi, l'ASN [18] estimait nécessaire la réalisation de démonstrateurs *in situ* destinés à qualifier ces ouvrages. S'agissant des démonstrateurs d'ouvrages de scellement, l'IRSN constatait qu'il n'était pas prévu de démonstrateurs *in situ* à l'échelle 1 et que les résultats de ceux envisagés ne pourraient être disponibles pour le dépôt du dossier accompagnant la DAC, et estimait que l'Andra devait présenter des concepts de référence plus simples et pour lesquels suffisamment d'éléments probants quant à la démonstration de leurs performances pourraient être réunis à l'échéance de cette DAC [18].

Dans son avis sur les commentaires de l'Andra relatifs au rapport de l'IEER transmis en 2012, l'IRSN [26] rappelait les positions prises dans ses évaluations précédentes, notamment sur l'homogénéité de la couche hôte et sa recatrisation après endommagement par l'excavation. L'IRSN soulignait également la pertinence de mener des évaluations probabilistes en complément des évaluations déterministes, en particulier pour évaluer l'impact du stockage, dans la mesure où de telles évaluations permettraient de renforcer la confiance dans la maîtrise de incertitudes associées au transfert des radionucléides depuis le stockage vers la surface. L'ASN [29] concluait que l'examen des réponses apportées par l'Andra n'était pas de nature à remettre en cause le caractère transposable à la ZIRA des observations réalisées dans le Laboratoire de Meuse/Haute-Marne et réaffirmait le besoin de démonstrateurs de grands ouvrages, *in situ* à l'échelle 1, en soulignant la nécessité d'adapter le calendrier de réalisation du projet de sorte qu'ils puissent délivrer les éléments de démonstration de sûreté attendus, préalablement à la mise en service de l'installation.

Au stade du « Dossier Jesq03 » en 2013, l'ASN [20] considérait que l'Andra devait notamment préciser les hypothèses et données qui sous-tendent le nouveau modèle hydrogéologique du site. En outre, l'IRSN notait une évolution importante des choix d'architecture générale de Cigéo (notamment la diminution de la longueur des galeries et l'emplacement des scellements). S'agissant de l'impact de ces évolutions sur la sûreté à long terme, l'ASN [20] considérait alors que l'Andra devait s'assurer qu'elles n'obèreraient pas l'objectif de minimisation des transferts de radionucléides à travers les liaisons surface-fond.

Dans son évaluation du dossier « Etudes remises depuis 2009 » [27] en 2013, s'agissant des résultats de la campagne de sismique 3D, l'IRSN relevait la bonne qualité de l'acquisition mais constatait la présence de diverses anomalies sismiques, pour lesquelles il n'était pas possible de déterminer à ce stade s'il s'agissait d'artefacts inhérents au traitement des données ou d'objets sédimentaires ou structuraux existants. Aussi, le traitement des données méritait d'être poursuivi en vue de statuer sur leur interprétation. L'ASN soulignait que même si ces incertitudes ne

mettaient pas en cause la qualité des connaissances acquises par cette campagne, qui confirmait le caractère favorable de la [ZIRA](#) pour l'implantation d'un stockage géologique, il était tout de même nécessaire de tenir compte de ces incertitudes en retenant, dans l'évaluation de sûreté, un scénario comprenant une ou plusieurs discontinuités traversant le Callovo-Oxfordien, afin d'évaluer la robustesse du stockage.

A l'issue de l'examen du dossier « [Ouvrages de fermeture](#) » ayant fait l'objet d'une instruction par l'IRSN présentée le 1<sup>er</sup> juillet 2014 devant le [GPD](#) [30], d'un avis du [GPD](#) [31] puis d'un avis de l'ASN [32], l'IRSN [30] concluait que l'objectif de perméabilité des scellements de liaisons surface-fond pouvait être atteint mais qu'un essai en vraie grandeur devrait le confirmer. L'ASN demandait que la démonstration de sûreté justifie l'architecture du stockage retenue, en présentant les avantages et inconvénients du point de vue de la sûreté et de la radioprotection de différentes options pour les différentes phases du stockage, tout en notant que cette architecture (longueur des galeries, positionnement des liaisons surface-fond...) était à même d'apporter des marges supplémentaires en cas de défaillance d'une ou plusieurs barrières ouvragées. S'agissant des scellements de galeries de liaison ou d'alvéoles [MAVL](#), l'ASN considérait que l'objectif de performance retenu n'était pas suffisamment ambitieux à ce stade du projet. A cet égard, l'IRSN estimait que l'objectif de perméabilité pourrait ne pas être suffisant en vue d'éviter l'apparition à long terme d'une concentration d'activité plus élevée à la sortie des liaisons surface-fond en cas de défaillance des scellements qui les obturent. L'IRSN observait que cet objectif de performance découlait principalement de la perméabilité de la zone endommagée en paroi des ouvrages et estimait donc que toute recherche visant à la réduire devait être menée. L'ASN demandait ainsi à l'Andra de poursuivre ses études relatives à la mise en œuvre d'un scellement de galeries avec « coupure hydraulique » en complément de son scellement de référence, afin de viser des performances hydrauliques supérieures pour ce type d'ouvrage. S'agissant des bouchons d'alvéole [HA](#), l'ASN demandait que l'Andra apporte la démonstration de la pertinence pour la phase de post-fermeture de l'option de conception avec insert retenue depuis 2009. En outre, elle soulignait la nécessité d'analyses complémentaires, prenant en considération les phases hydrauliques transitoires, notamment pour ce qui concerne la sollicitation des scellements par les gaz, et des situations dégradées de fonctionnement de l'installation. Enfin, l'ASN notait que les opérations de déconstruction des ouvrages de fermeture apparaissaient lourdes et délicates et concluait que des essais pour démontrer la faisabilité de la réouverture d'alvéoles en vue de récupérer des colis de déchets devaient être réalisés au cours de la phase pilote, si l'option d'une fermeture des alvéoles au cours de la phase d'exploitation venait à être retenue.

En outre, le potentiel géothermique du site au droit de la [ZIRA](#) a fait l'objet d'un rapport de l'IRSN en 2014 [33][34] en réponse à la demande du CLIS de Bure [33]. L'IRSN concluait que les formations géologiques sous-jacentes au Callovo-Oxfordien, notamment les grès du Trias inférieur et du Permien, ne recèlent pas d'intérêt particulier par rapport à d'autres formations ou zones du bassin de Paris.

Enfin, le « [Plan de développement des composants du projet Cigéo](#) » ([PDD](#)) [35] a fait l'objet d'un avis IRSN [36] puis d'un avis de l'ASN [37]. D'une manière générale, l'ASN soulignait que le calendrier de développement du projet [Cigéo](#) ne présentait pas de marge et ne prenait pas suffisamment en compte les incertitudes, qu'elles soient liées à la disponibilité effective des éléments nécessaires aux prises de décisions, aux aléas de chantier, ou à la durée prévisionnelle de la phase pilote. S'agissant en particulier du premier point, l'ASN notait la difficulté à apprécier le degré d'avancement de la démonstration de sûreté dans son ensemble et le caractère suffisant de celle-ci pour passer d'une étape clé de développement à une autre. L'IRSN alertait par exemple sur le risque que les éléments de démonstration que l'Andra serait en capacité de réunir pour la [DAC](#) ne soient pas suffisants pour porter un avis

conclusif sur la création de l'installation. Au-delà, l'ASN considérait que la phase industrielle pilote était destinée avant tout à l'acquisition des éléments visant à conforter la démonstration de sûreté nucléaire de l'installation. L'IRSN considérait que pour être recevable sur le plan technique, le dossier accompagnant la DAC devait (i) pour les domaines à forts enjeux de sûreté identifiés lors des précédentes instructions, présenter des éléments de démonstration de la performance des composants et des ouvrages de stockage fondés sur des essais suffisamment représentatifs, notamment en termes de dimensions et de conditions d'exploitation, (ii) présenter les essais de qualification à réaliser pendant la phase pilote qui permettraient d'atteindre le niveau de démonstration requis avec le nombre de colis strictement nécessaire et (iii) prévoir des rendez-vous d'évaluation institutionnels associés aux résultats clés qui sont attendus dans les domaines à forts enjeux de sûreté, au-delà des étapes d'autorisation prévues par le dispositif réglementaire actuel.

Ainsi, le projet Cigéo a fait l'objet de développements notables au cours de la dernière décennie et des attentes fortes ont été formulées par l'ASN, notamment sur la complétude et la robustesse de la démonstration de sûreté. Il convient d'ajouter qu'au cours de cette période, l'Andra a pris de nombreux engagements (cf. chapitre 1.1), essentiellement à l'échéance de la DAC. L'IRSN examine l'état d'avancement de ces engagements au fil du présent rapport.

## 2 DESCRIPTION DE CIGEO

Le présent chapitre est dédié à la présentation générale des composants de Cigéo, réalisée sur la base des éléments apportés par l'Andra dans le DOS et au cours de l'instruction ; exclusivement descriptif, il ne comporte pas l'analyse par l'IRSN de ces éléments mais mentionne le chapitre de ce rapport qui lui est dédié.

### 2.1 LE SITE DE MEUSE/Haute-MARNE

Le site de MHM [53], dont les principaux éléments relatifs à la géologie et à l'hydrogéologie ont été acquis lors de phases d'investigation réalisées par l'Andra (cf. Annexe T1), se situe en bordure orientale du bassin sédimentaire de Paris. Il est encadré par des failles présentant des décalages verticaux de plusieurs dizaines de mètres (failles de la Marne à l'Ouest, de Gondrecourt à l'Est, et plus éloignées, faisceau de failles de Metz au Nord et faille de Vittel au Sud). Une zone dite de « fracturation diffuse » (ZFD), associée au faisceau de failles de Poissons et située entre les failles de la Marne et de Gondrecourt (cf. Figure 1), constitue la bordure Sud-Ouest du « secteur de MHM ».

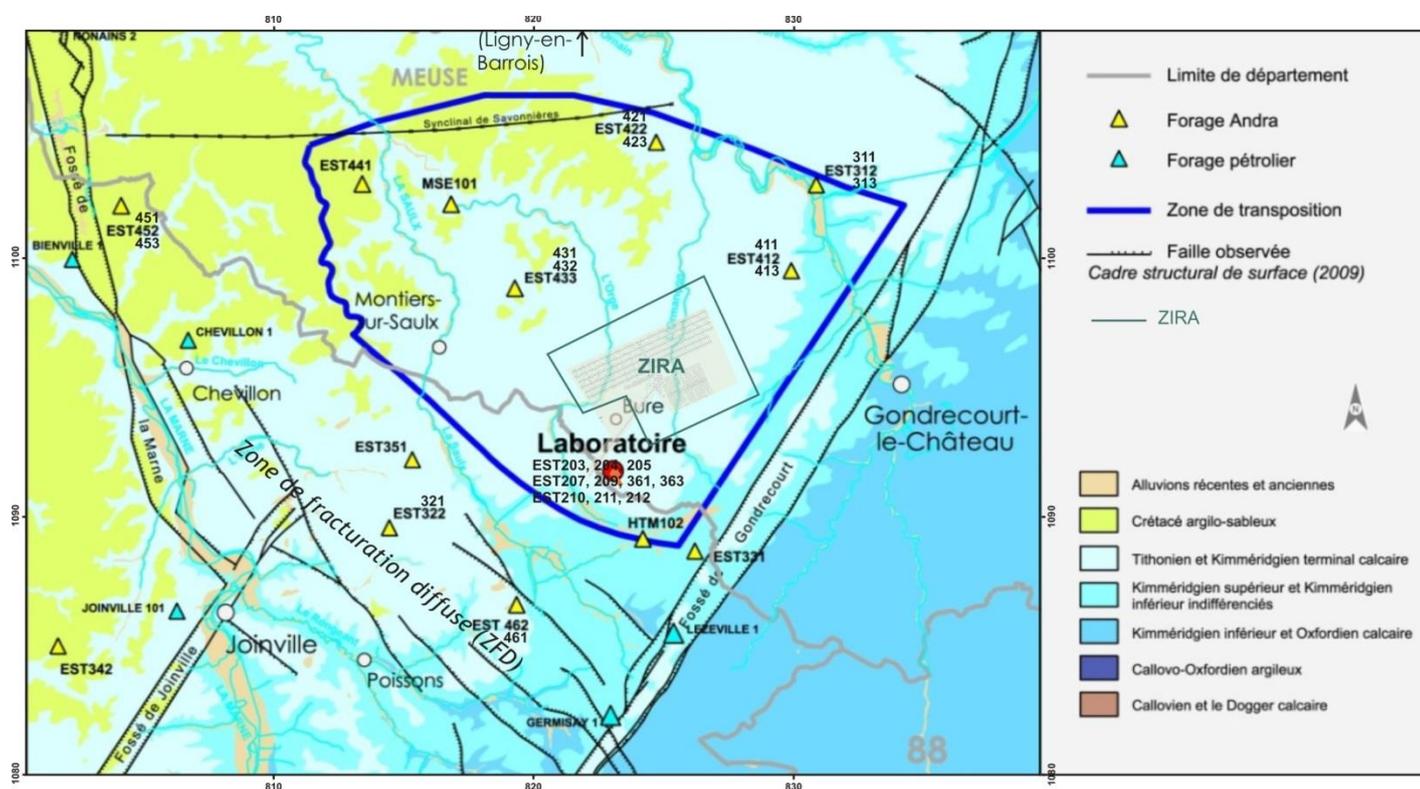


Figure 1 : Carte géologique du « secteur de MHM » et position de la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) dans la zone de transposition (ZT) (source Andra [53], modifiée)

La formation du Callovo-Oxfordien, formation hôte étudiée pour accueillir l'installation souterraine de Cigéo (cf. chapitre 2.2.3) destinée au stockage des colis de déchets (cf. chapitre 2.3), se présente sous la forme d'une couche sédimentaire essentiellement composée d'argiles et de carbonates compactés communément appelés « argilites ». Le Callovo-Oxfordien a été reconnu, dans l'environnement proche du laboratoire souterrain de MHM (Figure 1), entre 360 m et 620 m de profondeur. Dans l'emprise de la ZIRA (Figure 1), la partie médiane de cette couche, qui s'incline légèrement vers le centre du Bassin avec un pendage d'environ 1,5° vers l'Ouest-Nord-Ouest, est située à une profondeur comprise entre 420 et 600 m (-490 m au niveau du Laboratoire souterrain). Cette formation est localisée stratigraphiquement entre deux formations calcaires « encaissantes » présentant des niveaux aquifères : le Dogger en dessous, surmontant lui-même le Lias argileux, le Trias salifère et le Paléozoïque, et l'Oxfordien au-

dessus, qui est surmonté par le semi-perméable marneux du Kimméridgien et l'aquifère superficiel des calcaires du Barrois (Figure 2).

La formation du Callovo-Oxfordien est constituée de trois séquences sédimentaires [53]. Elle présente, dans l'emprise de la ZIRA, une épaisseur comprise entre 140 et 160 m. A plus grande échelle, c'est-à-dire entre les failles bordant le site de MHM (Figure 1), l'Andra considère que la formation du Callovo-Oxfordien présente une grande homogénéité lithologique, expliquée par des conditions calmes de dépôt des argilites qui la constituent. Le niveau de référence choisi par l'Andra pour implanter le futur stockage correspond au niveau médian de la couche, qui est également le plus argileux (Figure 2), situé à environ 525 m de profondeur [40]. Sur la base des données acquises en forages, l'Andra indique que les propriétés suivantes de ce niveau du Callovo-Oxfordien varient peu au sein de la ZIRA : propriétés mécaniques, propriétés de rétention des argiles, perméabilités, coefficients de diffusion et porosité.

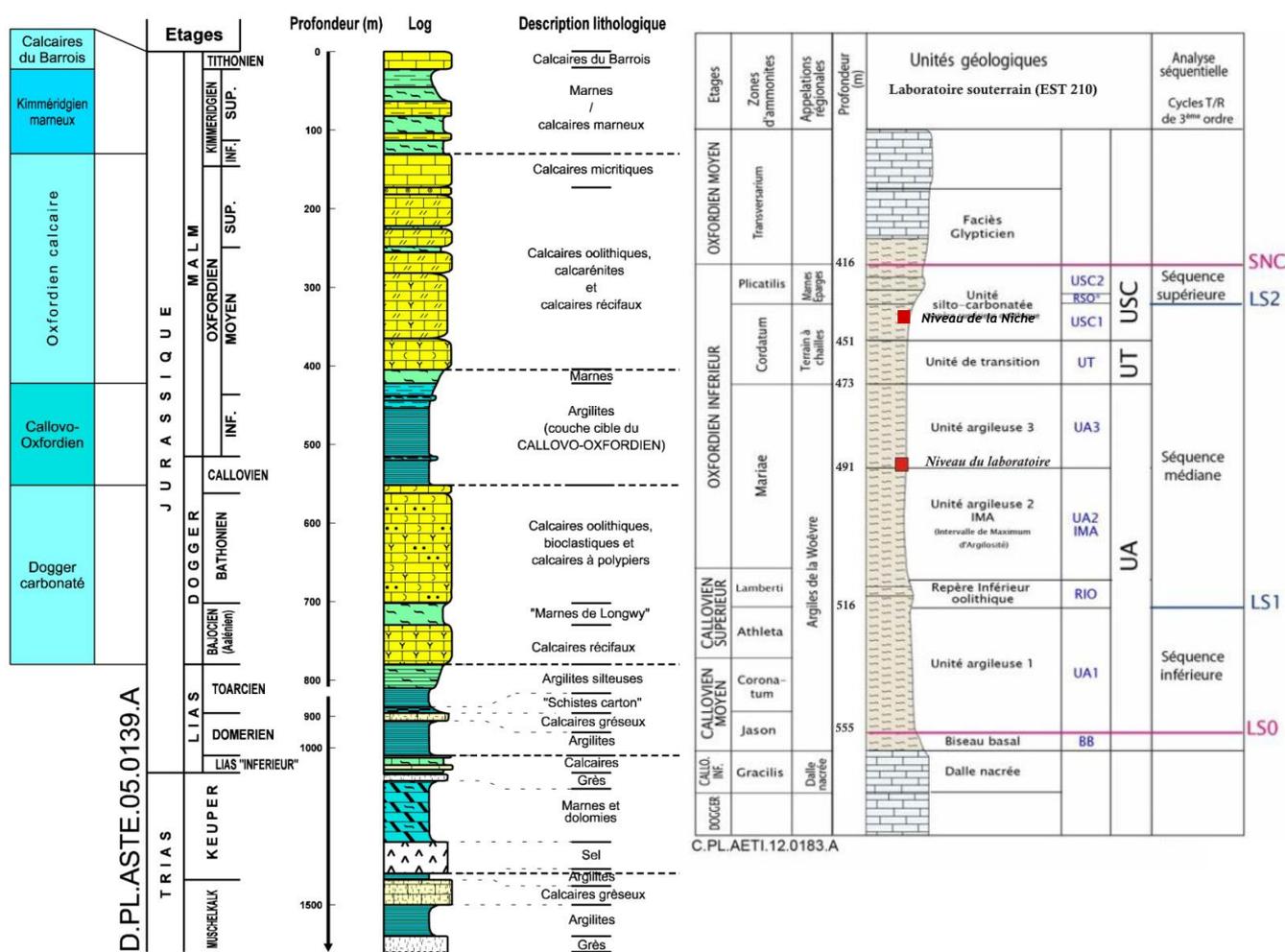


Figure 2 : Logs des principales formations géologiques du secteur de MHM. À gauche : couches du Mésozoïque. À droite : détail de la formation du Callovo-Oxfordien au niveau du Laboratoire souterrain [40]

L'aquifère à surface libre du Barrois est de type karstique lorsqu'il affleure dans le secteur de MHM ; il peut donc être localement très productif. Au sein de la ZIRA, son épaisseur peut aller jusqu'à 130 m.

L'aquifère de l'Oxfordien, d'environ 280 m d'épaisseur, a été recoupé dans le secteur de MHM par treize forages réalisés par l'Andra (cinq de plus qu'en 2005). Il présente une transmissivité globale comprise entre  $10^{-7}$  et  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s. Des transmissivités plus élevées (entre  $10^{-3}$  et  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s) sont obtenues dans la ZFD [53]

(Figure 1). Au niveau de la **ZT**, les écoulements sont orientés vers le Nord-Ouest avec un gradient hydraulique d'environ 0,5 %. Cet aquifère présente une alternance entre des niveaux peu producteurs (voire non producteurs) et plus producteurs. Ces derniers, nommés « horizons producteurs », sont numérotés de Hp1 à Hp7 de bas en haut dans la zone du laboratoire souterrain. Ainsi, bien que, à l'échelle de la **ZT**, l'Oxfordien se comporte comme un unique aquifère (les horizons producteurs sont connectés à plus ou moins grande distance, avec pour conséquence une charge hydraulique souvent unique dans tous les niveaux poreux rencontrés sur une même verticale), les charges hydrauliques mesurées sur chaque niveau réagissent individuellement en cas de perturbation rapide, comme cela est le cas au niveau du Laboratoire où le fonçage des deux puits a engendré des rabattements d'ampleurs différentes pour chaque niveau. Dans la partie Nord-Est du secteur, la nappe de l'Oxfordien est divisée par des couches marneuses appelées « Série grise » (e.g., [76]), séparant certains des horizons producteurs précités (voir chapitres 4.6.1.2 et 4.6.4.1.2).

Sous-jacent au Callovo-Oxfordien, l'aquifère calcaire du Dogger, d'environ 250 m d'épaisseur, est recoupé par onze forages réalisés par l'Andra (cinq de plus qu'en 2005). Le Bathonien constitue le principal ensemble producteur dans le Dogger et surmonte le Bajocien, constitué de la couche des Marnes de Longwy au-dessus d'un niveau très faiblement producteur [53] (cf. Figure 2). La transmissivité globale du Dogger est comprise entre  $10^{-9}$  et  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s (entre  $10^{-6}$  et  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s dans la **ZFD**) [53]. Il présente des écoulements également orientés vers le Nord-Ouest avec un gradient plus faible que dans l'Oxfordien (environ 0,1 %).

Le gradient hydraulique vertical à travers le Callovo-Oxfordien, résultant des différences de charge entre l'Oxfordien carbonaté et le Dogger, varie [81] entre une valeur légèrement négative au Sud-est de la **ZIRA** (gradient descendant) et environ 0,12 m/m (ascendant) au Nord-Ouest de cette zone. L'Andra estime un accroissement de ce gradient vertical avec le temps pouvant aller à un doublement en 500 000 ans en fonction des modifications géodynamiques liées à l'érosion. Les mesures de charges hydrauliques dans le Callovo-Oxfordien révèlent cependant l'existence d'une surcharge par rapport à la différence de charges entre l'Oxfordien et le Dogger. Cette surcharge, dont l'origine et les conséquences sont examinées au chapitre 4.5.2 du présent rapport, atteint une valeur maximale d'environ 50 m [53] (à comparer aux valeurs de charges dans le Dogger et l'Oxfordien carbonaté respectivement de l'ordre de 290 m et 305 m NGF au niveau du Laboratoire souterrain).

L'analyse des caractéristiques géologiques, des ressources naturelles, de la géodynamique et des caractéristiques géotechniques de surface, est présentée respectivement aux chapitres 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4 du présent rapport. La roche hôte fait l'objet du chapitre 4.5. Les modèles hydrogéologiques conceptuel et numérique sont examinés aux chapitres 4.6 et 4.6.3.

## 2.2 L'ARCHITECTURE DU STOCKAGE

À ce stade, le **DOS** prévoit [39] que les installations de **Cigéo** constituent une unique **INB** comprenant (Figure 3) :

- les installations de surface de la zone puits,
- les installations de surface de la zone descenderie,
- l'installation souterraine composée des liaisons surface-fond, des zones de soutien logistique (**ZSL**) et les quartiers de stockage **MAVL** et **HA**.

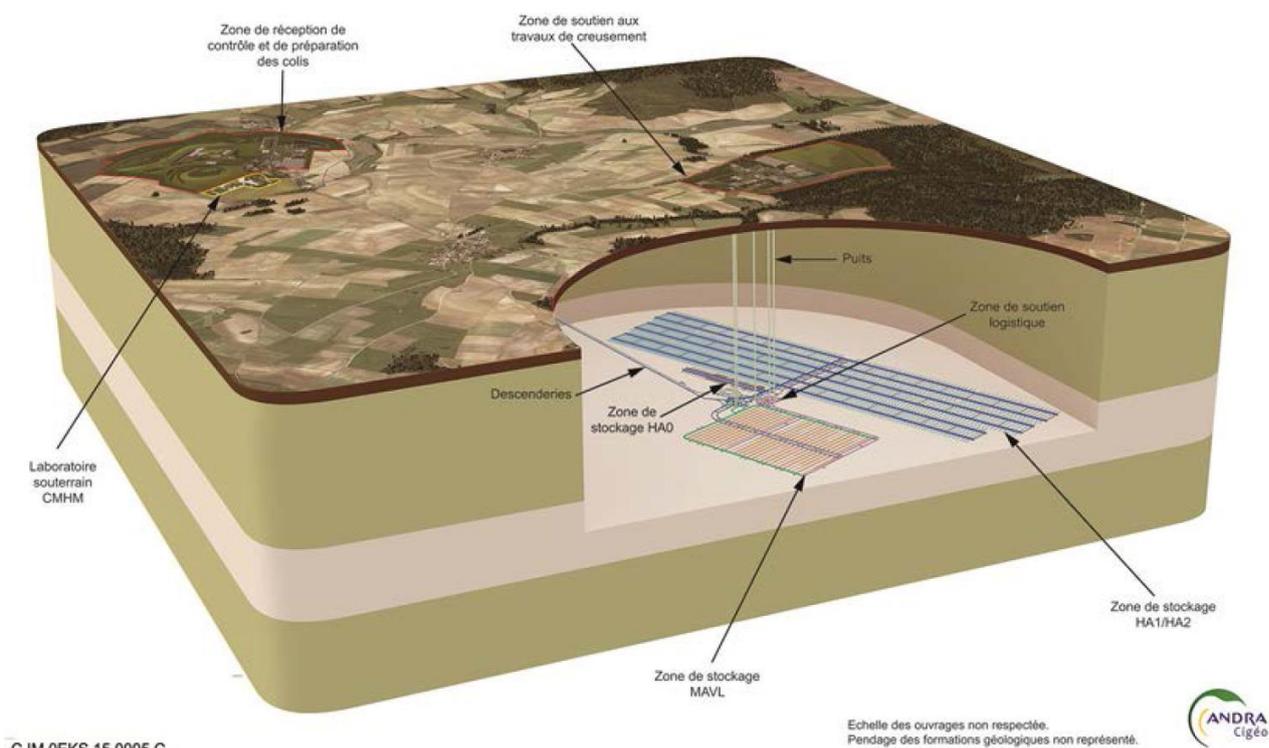


Figure 3 : Schéma de l'installation Cigéo comprenant les installations de surface et souterraine [39]

Les risques liés à l'exploitation (incluant les opérations de mise en stockage et de retrait des colis) sont analysés dans le chapitre 7 pour les installations de surface, les liaisons surface-fond et l'installation souterraine. Les chapitres 8.1 et 8.2 sont consacrés aux risques et à l'évaluation de sûreté après fermeture ; en particulier, les études de sensibilité à l'architecture du stockage font l'objet du chapitre 8.2.4.

### 2.2.1 INSTALLATIONS DE SURFACE

Les installations de surface de Cigéo sont prévues d'être implantées sur le plateau calcaire entaillé par la vallée de l'Orge (affluent de la Saulx) et la vallée de l'Ormançon (affluent de l'Ornain) qui s'écoulent globalement vers le Nord (cf. Figure 1). Elles comportent :

- une zone « descenderie » d'environ 200 ha implantée sur le niveau constituant la base des calcaires du Barrois (calcaires sublithographiques), en limite du Laboratoire souterrain de l'Andra. L'altitude de ces terrains agricoles varie de 365 m au Sud à 345 m NGF vers le Nord avec une pente assez régulière vers la vallée de l'Orge et son affluent local (la Bureau) ;
- une zone « puits » d'environ 250 ha, située à 4 km au Nord-Est de la zone descenderie, implantée sur le niveau médian des calcaires du Barrois (calcaires de Dommartin). Localisée dans une zone boisée dont l'altitude est comprise entre 340 et 360 m NGF, elle domine la vallée de l'Ormançon.

En lien avec l'environnement naturel de ces installations, la caractérisation géotechnique de ces deux zones est examinée au chapitre 4.4, et les risques en exploitation liés au séisme, à l'inondation externe, aux aléas météorologiques et à l'environnement industriel sont examinés au chapitre 7.3.

### 2.2.1.1 Installations de surface de la zone puits

À ce stade, le **DOS** prévoit que les installations de surface de la zone puits comprennent les moyens et bâtiments liés, d'une part à l'exploitation nucléaire souterraine, d'autre part aux travaux de construction et d'extension des ouvrages souterrains (Figure 4).



Figure 4 : Schéma des périmètres des installations de la zone puits [39]

Au centre du site, la zone « travaux » (en vert sur la Figure 4), dédiée aux travaux souterrains, comprend l'émergence des différents puits travaux décrits dans le chapitre suivant (2.2.2), ainsi que les bâtiments associés aux travaux d'extension de l'installation souterraine et les installations support pour les travaux (centrales à béton, entreposage des matériels tels que les voussoirs, ateliers de maintenance et magasins associés). Au Nord de celle-ci se trouvent les verses, réceptionnant la roche extraite (« marin ») lors du creusement de l'installation souterraine.

La zone « exploitation » au SE du site (« **ZEXP** », en bleu sur la Figure 4) regroupera les ateliers de maintenance et l'émergence des différents puits d'exploitation (cf. chapitre 2.2.2). En particulier, cette zone nucléaire comprend les ouvrages dédiés à l'accueil et au transfert du personnel d'exploitation vers le fond et les unités de ventilation dédiées respectivement à l'apport d'air frais et à l'extraction d'air vicié de la zone exploitation de l'installation souterraine.

La zone SW du site (en orange sur la Figure 4) est dédiée aux équipements nécessaires au fonctionnement des installations, tels que les postes électriques et les bassins de récupération et de traitement des eaux.

À ce stade, le **DOS** ne fournit pas de description plus détaillée des installations de surface situées dans la zone puits.

### 2.2.1.2 Installations de surface de la zone descendrie

À ce stade, le **DOS** [39] prévoit trois installations de surface présentant une activité nucléaire au niveau de la descendrie : le bâtiment « tête de descendrie » ainsi que **EP1** et **EP2**, construites de part et d'autre de celui-ci. L'Andra précise que l'installation **EP2** est prévue d'être mise en service à l'horizon 2070 pour le conditionnement des colis de déchets **HA** et n'est donc pas décrite dans le **DOS**.

L'Andra retient, pour l'installation EP1, une architecture composée de bâtiments semi-enterrés dont les parties émergentes sont entourés de merlons<sup>2</sup>. EP1 est ainsi constitué de trois bâtiments (Figure 5) à savoir (i) les bâtiments « hall de déchargement » du terminal ferroviaire (en violet sur la Figure 5) et « ET-H » (en gris sur la Figure 5), destinés au déchargement des convois des emballages de transport verticaux et horizontaux respectivement, (ii) le bâtiment principal qui abrite l'ensemble du procédé allant du déchargement des emballages de transport à la mise en hotte des colis de stockage (en bleu sur la Figure 5) et (iii) un bâtiment de contrôles par prélèvement, de gestion des écarts et de gestion des déchets et effluents radioactifs induits (en rouge sur la Figure 5).

La « tête de descenderie », raccordée au bâtiment principal abrite, entre autres, la gare haute du « transfert incliné » (cf. chapitre 2.2.2 (en vert sur la Figure 5)).



C.IM.AMSI.16.0003.A



Figure 5 : Bâtiments de l'installation EP1 [39]

Dans la partie conventionnelle, les installations sont essentiellement liées à l'extraction de la roche (« marin ») issus des travaux de creusement des descenderies et des premières galeries (verses), ainsi qu'aux fonctions de la galerie de service (ventilation, alimentation électrique, exhaure...). Elles sont accolées à la zone du Laboratoire souterrain et à proximité de l'écothèque, celles-ci restant toutefois en dehors du périmètre de la descenderie.

Le DOS prévoit [39] des adaptations de l'installation de surface aux besoins fonctionnels et capacitaires liés à la chronique de livraison des colis de déchets. Ainsi l'installation de surface comprendra, au démarrage de Cigéo, des

<sup>2</sup> Ouvrage de protection constitué généralement d'un talus de terre entourant une installation pour la protéger de l'extérieur

lignes de conditionnement adaptées aux colis HA et MAVL puis, après le stockage des colis de déchets HAO, la ligne de conditionnement HA sera reconfigurée en ligne MAVL.

## 2.2.2 LIAISONS SURFACE-FOND

### 2.2.2.1 Descenderies

L'Andra [39] retient, comme dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », une « descenderie colis » dédiée au transfert des colis de stockage depuis l'installation de surface EP1 dans l'installation souterraine et une « descenderie service » dédiée aux fonctions d'exploitation telles que l'évacuation, l'intervention des secours, la maintenance, l'acheminement de matériaux et/ou d'équipements.

Les deux descenderies, partant en surface de la zone descenderie (chapitre 2.2.2.1), distantes d'une cinquantaine de mètres, ont une pente de 10 à 15 % et un diamètre utile de l'ordre de 8,4 m. Elles sont composées de trois parties, à savoir la tête de descenderie qui est reliée à l'installation EP1, le corps de la descenderie et le pied de descenderie qui est relié à l'installation souterraine (Figure 6).

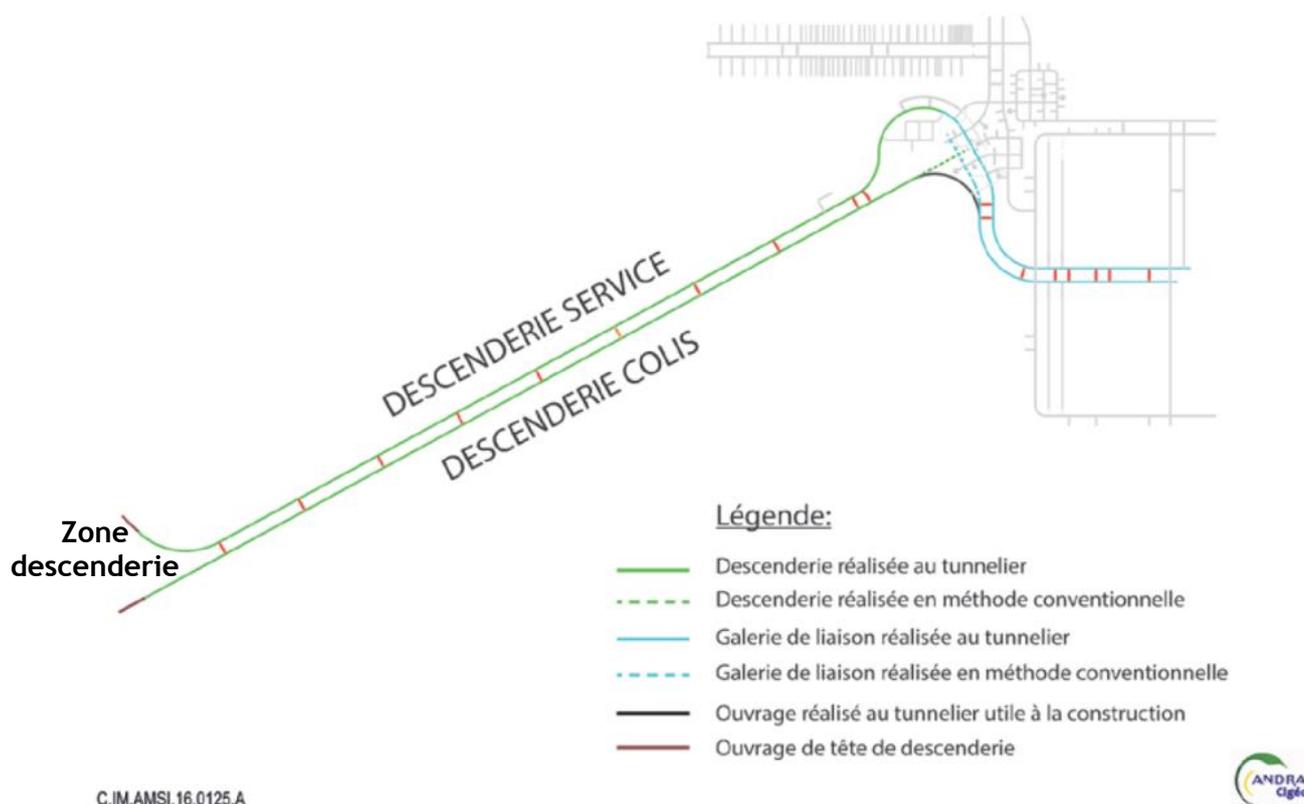


Figure 6 : Descenderies [39]

L'Andra [39] prévoit un creusement des descenderies au tunnelier « pleine face ». L'Andra précise qu'une étanchéité sera assurée au pied des calcaires du Barrois et à la base des calcaires de l'Oxfordien (c'est-à-dire au toit des argilites). Le revêtement sera constitué de voussoirs en béton et de « voussoirs bicouches compressibles » dans les argilites, ces derniers comprenant, en plus du béton, une couche de matériau compressible à leur extrados qui permet une convergence partielle de la roche et ainsi une limitation des efforts supportés. L'Andra précise [39] que différents matériaux compressibles, actuellement à l'étude, seront testés dans le Laboratoire souterrain en 2017.

L'Andra prévoit des recoupes tous les 400 m entre ces deux descenderies afin de permettre l'intervention des secours et/ou l'évacuation.

### 2.2.2.2 Puits

L'Andra [39] retient, comme dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », cinq puits partant en surface de la zone puits (chapitre 2.2.2.2), répartis entre la zone nucléaire et la zone « travaux », avec des diamètres utiles de 6 à 8 m (cf. Figure 7). En zone « exploitation », deux puits sont dédiés (i) au transfert du personnel et à l'apport d'air frais et (ii) au retour d'air vicié de la zone « exploitation ». En zone « travaux », trois puits sont dédiés (i) au transfert du personnel et à l'apport d'air frais, (ii) à l'apport et l'évacuation des matériels et matériaux de construction et (iii) au retour d'air vicié de la zone « travaux ».

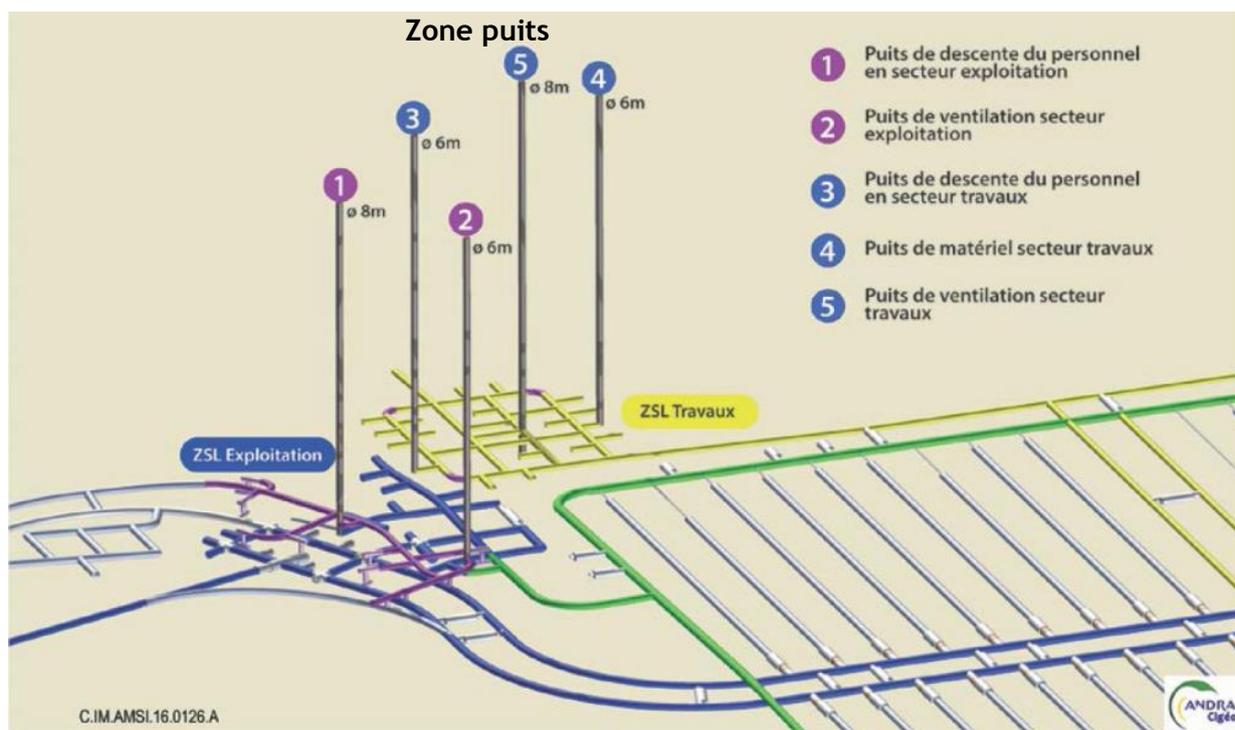


Figure 7 : Localisation des puits dans l'installation souterraine [39]

L'Andra prévoit [39] un creusement des puits à l'explosif après le passage des premiers mètres de terrain en surface mais précise que d'autres méthodes sont toutefois étudiées. Ceci est analysé dans le chapitre 4.5.4 du présent rapport. Dans les formations de couverture et le Callovo-Oxfordien, le revêtement sera en béton avec, pour le Kimméridgien et les calcaires de l'Oxfordien, une résistance à la pression hydrostatique. L'Andra envisage la mise en place, dans le Callovo-Oxfordien, d'un matériau compressible (non déterminé à ce stade) entre les revêtements en béton et le terrain. A l'exception du puits d'extraction d'air vicié de la zone exploitation, conçu étanche sur toute sa hauteur afin de réduire sa maintenance au strict minimum, à l'instar des descenderies, les puits seront conçus étanches au passage de l'aquifère du Barrois et deux bulbes d'étanchéité seront réalisés, l'un au pied des calcaires du Barrois et l'autre au pied des calcaires de l'Oxfordien (cf. chapitre 7.3.2).

### 2.2.3 INSTALLATION SOUTERRAINE, CONCEPTS DE STOCKAGE

L'architecture générale de l'installation souterraine retenue au stade du DOS [39] [40] (Figure 8) est proche de celle présentée dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation ». Cette architecture laisse des emplacements de la ZIRA vacants de 200 ha au-delà du quartier MAVL (bordure ENE de la ZIRA) et de 300 ha au-delà des quartiers HA (bordure NNW de la ZIRA).

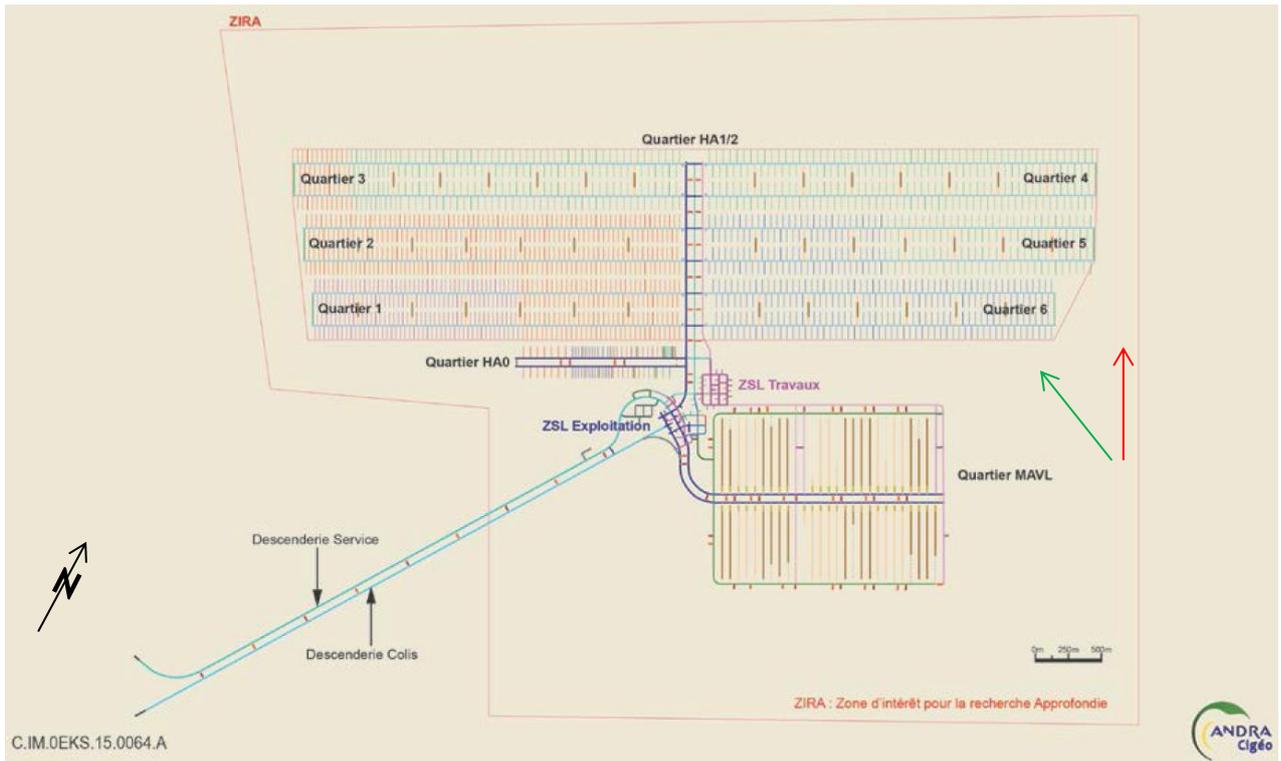


Figure 8 : Architecture à terminaison de l'installation souterraine [40]. Flèche rouge : direction de la contrainte principale (Nord-Nord-Ouest); flèche verte : direction du pendage des couches (Ouest-Nord-Ouest)

L'Andra retient le principe de deux zones de soutien logistique (ZSL), l'une étant dédiée à la zone nucléaire (ZSL Exploitation, cf. Figure 9) et l'autre à la zone de travaux (ZSL Travaux).

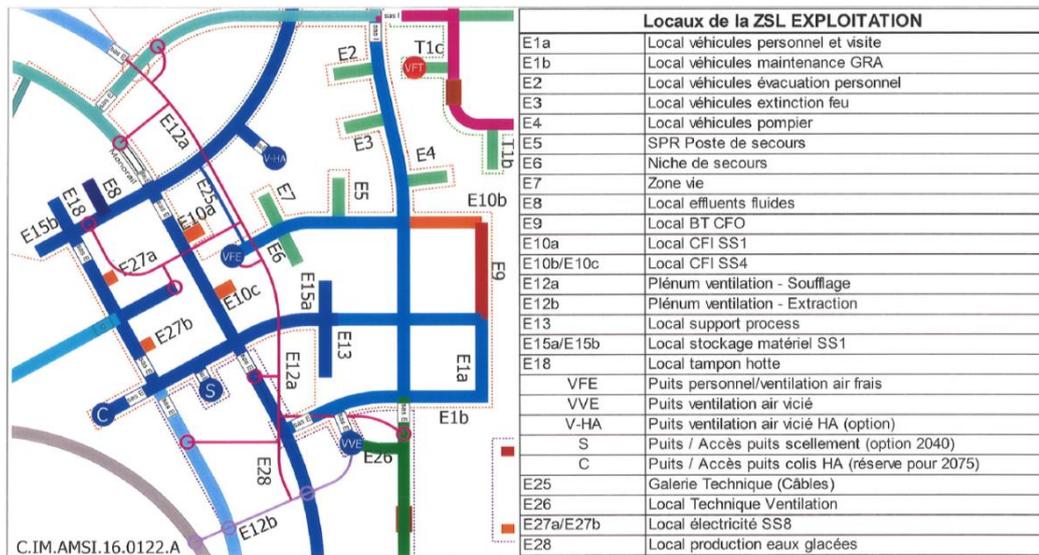


Figure 9 : Schéma de la zone de soutien logistique Exploitation [39]

La ZSL Exploitation dessert les différentes zones de stockage via des galeries de liaison, à savoir une zone de stockage MAVL, une zone de stockage HA0 dédiée aux colis de déchets vitrifiés moyennement exothermiques et une zone de stockage HA constituée de six quartiers pour les colis de déchets vitrifiés fortement exothermiques.

La galerie de liaison située dans le prolongement de la descenterie de service sera creusée au tunnelier alors que toutes les autres galeries seront creusées à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle (« MAP »).

Comme dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'Andra [39] prévoit des galeries de recoupe au niveau des galeries de liaison (pour les zones de stockage MAVL et HA présentées ci-dessous) et des galeries d'accès (pour la zone de stockage HA). Ces galeries de recoupe peuvent avoir des fonctions techniques (sous-stations électriques, locaux techniques...), d'évacuation et/ou d'intervention des secours. En outre, l'Andra retient le compartimentage des galeries de liaison et d'accès en situation d'incendie afin de cantonner un incendie dans la zone concernée. Les risques liés à l'incendie sont examinés au chapitre 7.2.1 du présent rapport.

La profondeur moyenne d'implantation de l'installation souterraine est de 525 m. Ainsi que précisé au cours de l'instruction, le niveau d'implantation présente une légère pente qui tend à suivre le pendage du Callovo-Oxfordien ( $1,5^\circ$  vers l'Ouest-Sud-Ouest). Ainsi, dans la direction Nord-Nord-Ouest, la galerie de liaison HA a une pente d'environ 2,5 % et les galeries de liaison MAVL ont une pente inférieure à 1 %. Dans la direction Est-Nord-Est, les galeries d'accès aux alvéoles HA ainsi que celles du quartier MAVL ont une pente quasiment nulle.

L'Andra prévoit quatre zones de « galeries superposées », où les galeries de ventilation passent au-dessus et perpendiculairement à des galeries de liaison ou d'accès. Trois d'entre elles sont situées dans les ZSL, et une à l'entrée de la zone de stockage MAVL.

### 2.2.3.1 Zone de stockage et alvéoles MAVL

S'agissant de la zone de stockage MAVL, l'Andra [39] retient le principe de deux galeries de liaison desservant l'ensemble des alvéoles MAVL, chaque alvéole possédant une galerie d'accès (Figure 10). Le quartier de stockage MAVL comportera, à terminaison, environ 50 alvéoles. Celles-ci sont orientées selon la contrainte horizontale majeure ( $N155^\circ$ , voir flèche rouge sur la Figure 8) afin de limiter l'endommagement de la roche lors du creusement (cf. chapitre 4.5.4).

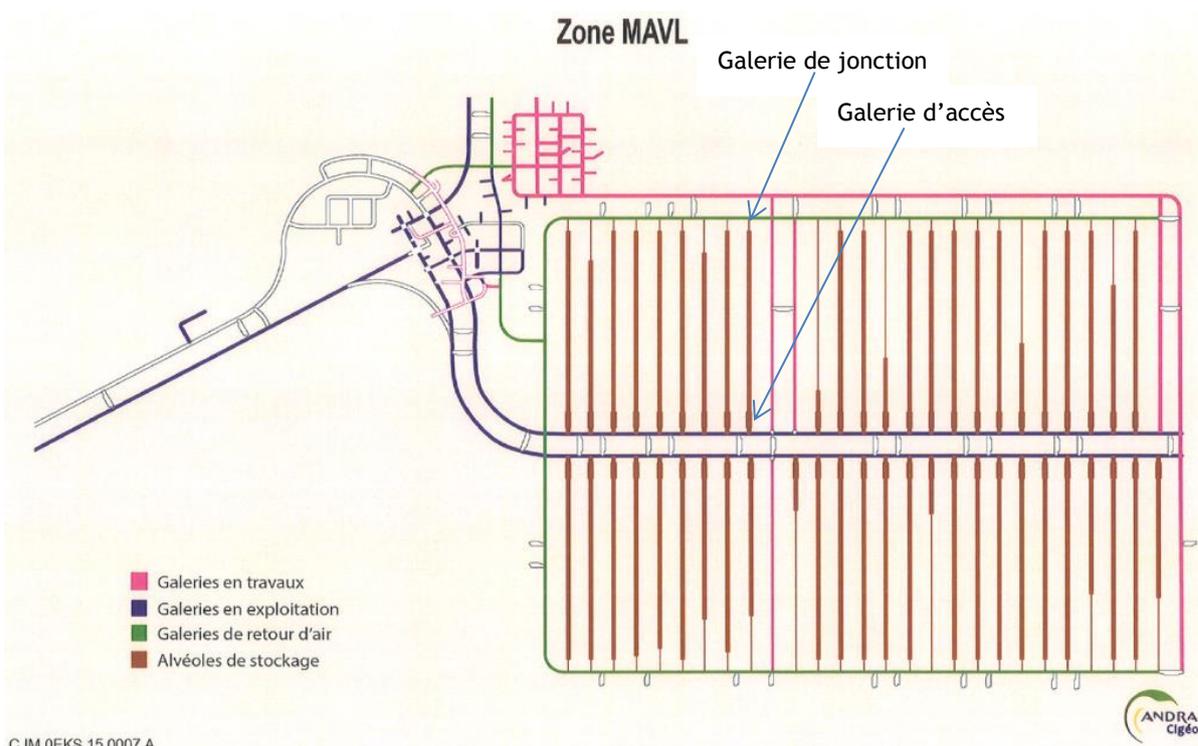


Figure 10 : Schéma de la zone de stockage MAVL en fin de remplissage du quartier [39]

Au stade du DOS, les alvéoles MAVL sont espacées de 5 diamètres [55]. Elles ont un diamètre utile d'environ 7 m pour les colis de type CS1 à CS5 (excavé 9 m) et 3 m (excavé 4 m) pour les CS6 et CS7 (conteneurs en acier, cf.

chapitre 2.3.2), et correspondent à des « tunnels » reliés d'un côté à une galerie d'accès menant à la galerie de liaison, et de l'autre à une galerie de jonction (environ 30m) menant à une galerie de retour d'air (Figure 11). Les colis de stockage sont placés dans la partie utile des alvéoles de 500 m de long sur un, deux ou trois niveaux et rangées en fonction du type de colis de stockage (2 rangées de 3 niveaux pour les CS1 et CS4 ; 3 rangées de 2 niveaux pour les CS2, CS3 et CS5 ; une rangée d'un seul niveau pour les CS6 et CS7).

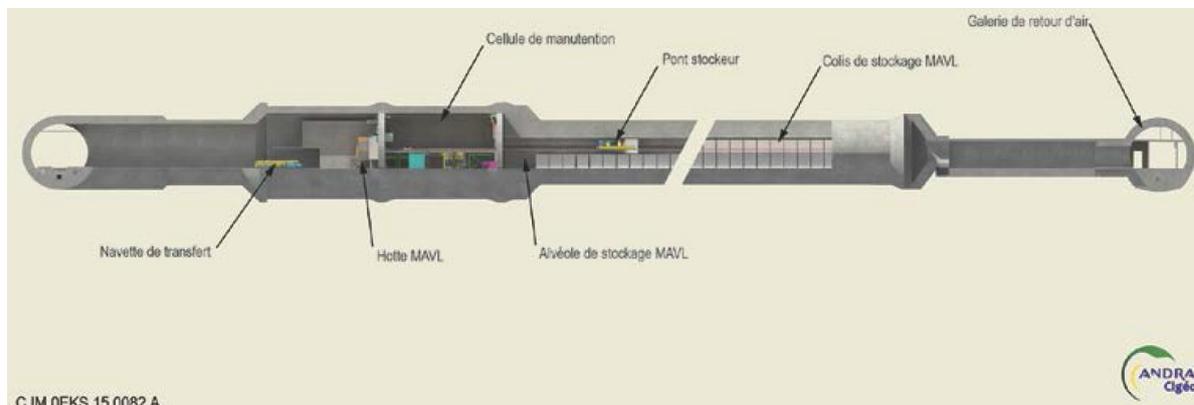


Figure 11 : Schéma d'un alvéole MAVL [39]

A l'intérieur de ces ouvrages, une cellule de manutention (longueur environ 30 m, diamètre utile d'environ 11 m et excavé 14 m) est connectée à la galerie d'accès d'un côté et à la partie utile de l'alvéole dédiée au stockage des colis de l'autre.

Le DOS envisage [39] un creusement des alvéoles MAVL à la machine à attaque ponctuelle, car cette technique permet de limiter l'endommagement des argilites et permet les variations de diamètre entre la galerie d'accès, la cellule de manutention et la partie utile. L'Andra prévoit la mise en place de soutènements souples (béton projeté, cales compressibles et boulons à ancrage répartis), recouverts d'un revêtement rigide, puis d'un béton de remplissage éventuellement préfabriqué, permettant de limiter les taux de vide en adaptant la géométrie interne de l'alvéole à celle des colis (cf. Figure 12).

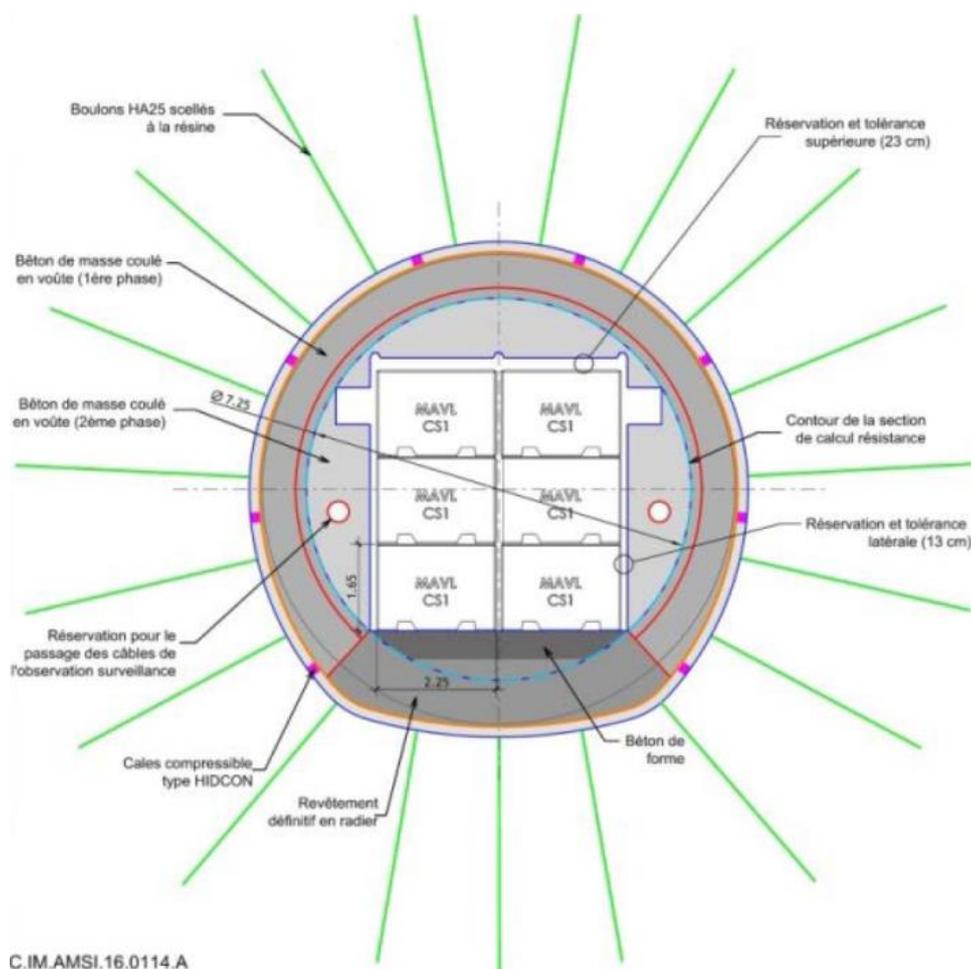


Figure 12 : Section type d'alvéole MAVL CS1, avec soutènement, revêtement et béton de remplissage.

### 2.2.3.2 Zones de stockage et alvéoles HA0 et HA1/HA2

S'agissant des zones de stockage HA (HA0 et HA1/HA2), l'Andra envisage des galeries de liaison desservant les galeries d'accès, qui à leur tour desservent 72 alvéoles (Figure 13).

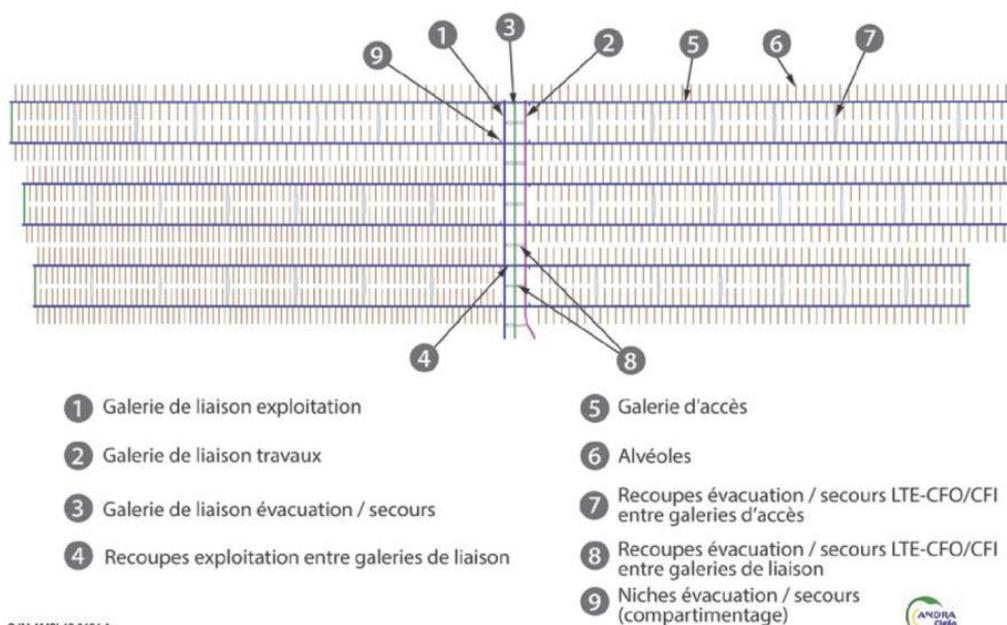


Figure 13 : Schéma de la zone de stockage HA1/HA2 à terminaison [39]

Les six quartiers de la zone HA contiennent chacun environ 250 alvéoles (1465 en tout). De même que pour les alvéoles MAVL, les alvéoles HA sont orientées selon la contrainte horizontale majeure afin de limiter l'endommagement de la roche lors du creusement.

A l'instar de ce qu'elle présentait dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'Andra retient un concept d'alvéole HA basé sur un micro-tunnel borgne d'une longueur de 80 m pour les alvéoles HA0 et 100 m pour les HA1/HA2 (Figure 14). Deux diamètres d'alvéole HA sont retenus à ce stade :

- un diamètre interne de 610 mm (excavé 800 mm) pour les alvéoles destinés à recevoir des colis de stockage de diamètre égal ou inférieur à celui d'un colis contenant un colis primaire de type R7/T7 (570 mm) ;
- un diamètre interne de 712 mm (excavé 900 mm) pour les alvéoles destinés à recevoir des colis de stockage contenant 2 colis primaires de type AVM (635 mm).

Les colis sont positionnés les uns derrière les autres, éventuellement séparés pour les plus chauds par des intercalaires.

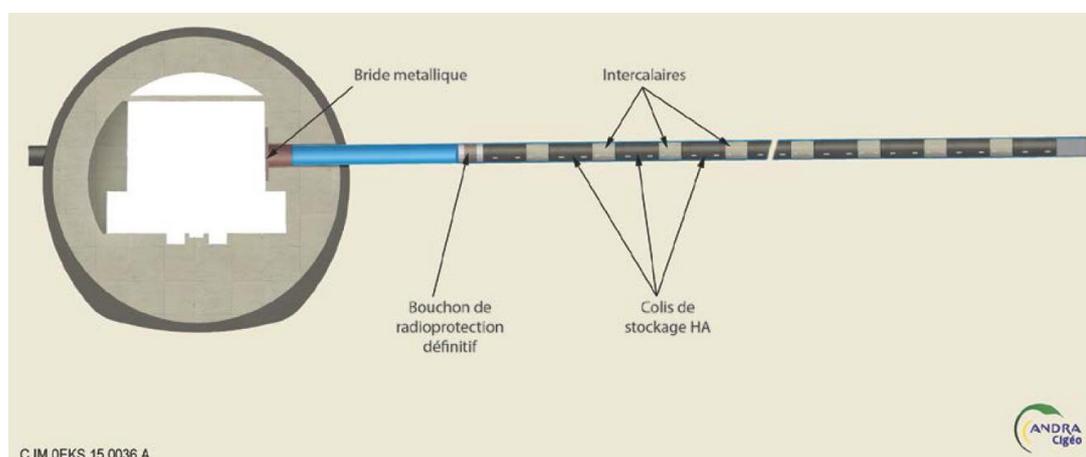


Figure 14 : Schéma d'un alvéole HA [39]

L'alvéole est légèrement inclinée ( $2\% \pm 1\%$ ) afin de permettre l'écoulement d'éventuels effluents vers la galerie d'accès. Chaque alvéole comprend une partie utile destinée à recevoir les colis, chemisée sur toute sa longueur par des tronçons de tubes cylindriques épais d'au moins 25 mm en acier à bas carbone, un insert en acier en tête d'alvéole, de diamètre supérieur à celui du chemisage pour permettre sa dilatation thermique et ancré au revêtement définitif de la galerie d'accès et au massif d'accostage, ainsi qu'un bouchon d'exploitation assurant la protection radiologique en dehors des périodes d'insertion de colis dans l'alvéole (Figure 16). L'espace annulaire entre le chemisage et la roche est rempli par un matériau de remplissage qui n'est pas encore défini. L'Andra précise [40] que ce matériau doit avoir une charge alcaline suffisante pour neutraliser le transitoire acide et constituer un environnement favorable à la passivation des aciers du chemisage et des conteneurs tout en respectant les exigences vis-à-vis des déchets, à savoir conduire à un pH inférieur à 10 lors de l'arrivée de l'eau au contact du verre nucléaire. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que le matériau, actuellement étudié, est un mélange de ciment et de bentonite.

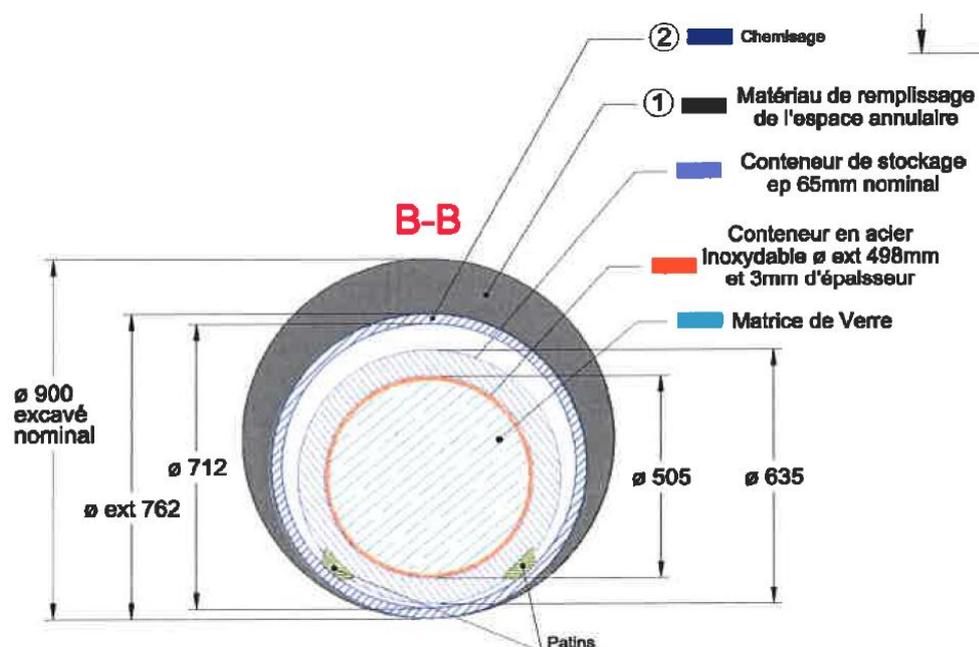


Figure 15 : Coupe d'alvéole HA de type « AVM » chargée

Le creusement des alvéoles HA est réalisé par un micro-tunnelier qui est retiré en fin de creusement, à l'exception de sa jupe en acier noir. Le chemisage définitif est ensuite poussé jusqu'au fond de l'alvéole. Le premier élément de chemisage poussé dans l'alvéole est un sabot, équipé d'un réceptacle pour collecter et pousser les débris de roche au fond de l'alvéole et d'une plaque de fond équipée de piquages permettant d'injecter le coulis par le fond et de purger l'air. Les différents tronçons de chemisage sont emboîtés (voire vissés) et sont équipés de joints d'étanchéité dont l'efficacité n'est requise que pendant l'injection du coulis.

Un bouchon d'exploitation (Figure 16) positionné en tête d'alvéole permet d'assurer la protection radiologique lorsqu'il n'y a pas de manutention de colis. Avant et après chargement complet de l'alvéole, une bride métallique (plaque boulonnée et instrumentée) est placée en entrée d'alvéole ; elle recouvre une plaque d'accostage ancrée dans le massif d'accostage en béton. La bride limite les échanges d'air entre l'alvéole et la galerie d'accès (cf. chapitre 5.2.1) et permet de réaliser des prélèvements de gaz (dispositif d'évacuation par soupape) et de liquide (extraction gravitaire de l'eau et des produits de corrosion) dans l'alvéole. Elle permet également de mesurer la pression et la teneur en gaz ( $O_2$ ,...) dans l'alvéole (cf. chapitre 7.2.2.3), puis d'injecter le matériau de remplissage en tête d'alvéole lors de l'obturation.

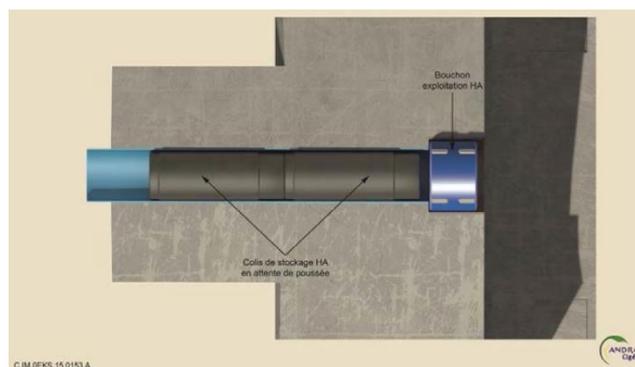


Figure 16 : Bouchon d'exploitation HA [39]

## 2.3 LES COLIS

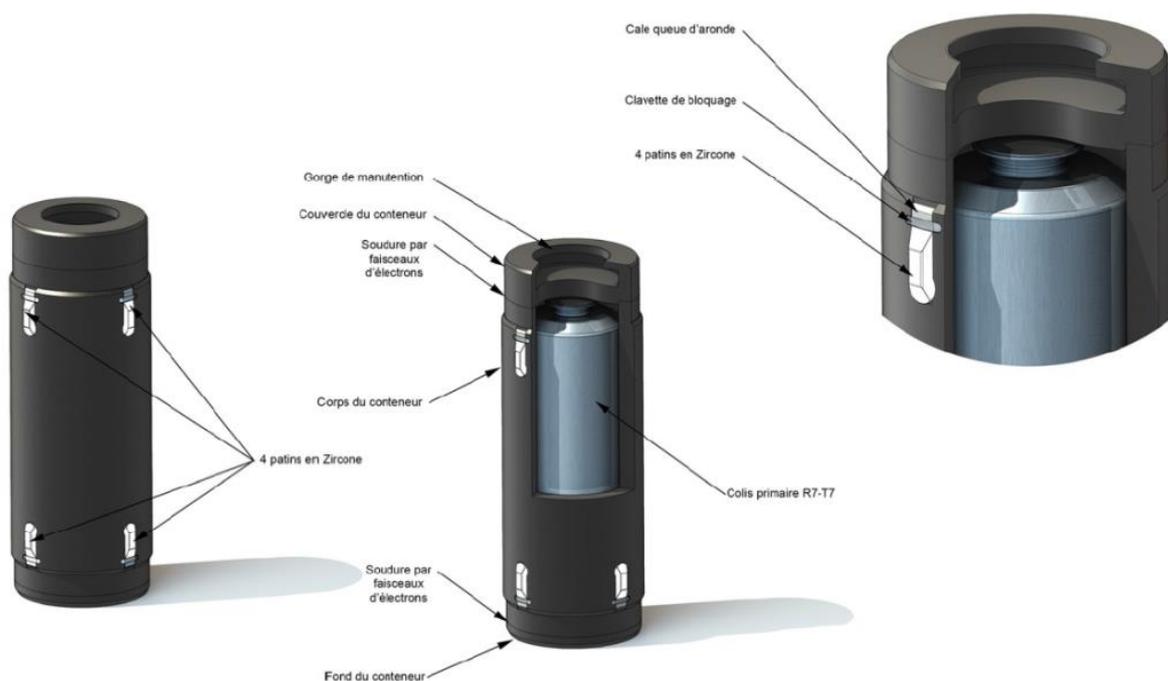
Le colis de stockage (CS), destiné à être transféré dans l'installation souterraine de Cigéo, correspond à l'ensemble formé par le ou les colis primaire(s) (CP) et le conteneur de stockage (CtS). Les différentes typologies de colis primaires produits, en cours de production ou à produire, qui constituent les principaux éléments d'inventaire des déchets à stocker, sont analysées au chapitre 3.1. Pour ce qui concerne les conteneurs de stockage, l'Andra indique que le choix d'en minimiser la variété permet de rendre les opérations de manutention des colis aussi simples que possible et facilite l'automatisation du processus de mise en stockage [39]. Les familles de colis de déchets HA et MAVL sont donc regroupées dans un nombre limité de types de CtS, conçus en fonction des caractéristiques des CP et notamment de leur géométrie et de leur masse. A cet égard, les familles de colis dont le conditionnement n'est pas défini à ce stade devront respecter le « plan spécificateur<sup>3</sup> » du CtS (non élaboré au stade du DOS) auquel elles seront associées.

### 2.3.1 LES COLIS DE DECHETS HA

Le DOS indique [39] que les conteneurs de stockage HA sont de forme cylindrique ; ils se composent d'un corps en acier forgé non allié constitué d'une virole d'épaisseur comprise entre 53 et 65 mm<sup>4</sup>, d'un fond soudé d'une épaisseur adaptée à celle de la virole et d'un couvercle de forme convexe (limitant la surface de contact entre les colis de stockage en alvéoles) réalisés dans la même nuance d'acier. En outre, quatre patins en céramique évitant un contact direct acier/acier entre le colis de stockage et le chemisage des alvéoles de stockage sont prévus sur le corps du conteneur. Ils facilitent le glissement du colis de stockage lors de sa mise en place et de son éventuel retrait. Du fait de sa nature non sensible à la corrosion, le patin porte l'identification du colis (gravure). Enfin une gorge de manutention est prévue. La Figure 17 ci-après illustre la conception du conteneur de stockage HA adapté à un colis primaire de déchets vitrifiés de type R7T7.

<sup>3</sup> Plan spécificateur : notamment, définition des caractéristiques géométriques internes et externes des conteneurs.

<sup>4</sup> L'Andra indique [39] que ces épaisseurs pourront encore être optimisées d'ici la DAC.



Extrait de: C.IM.AIMC.15.0131.A

Figure 17 : Illustration d'un conteneur de stockage HA pour colis primaire de déchets vitrifiés de type R7T7 [39]

Les conteneurs de stockage HA sont dimensionnés pour accueillir un ou deux colis primaires, voire trois pour les CP les plus courts. Les colis de stockage ont pour dimensions maximales environ 2,3 m de longueur, 64 cm de diamètre et pour masse maximale environ 3,2 tonnes. La Figure 18 ci-après présente les différents colis de stockage HA retenus à ce stade par l'Andra.

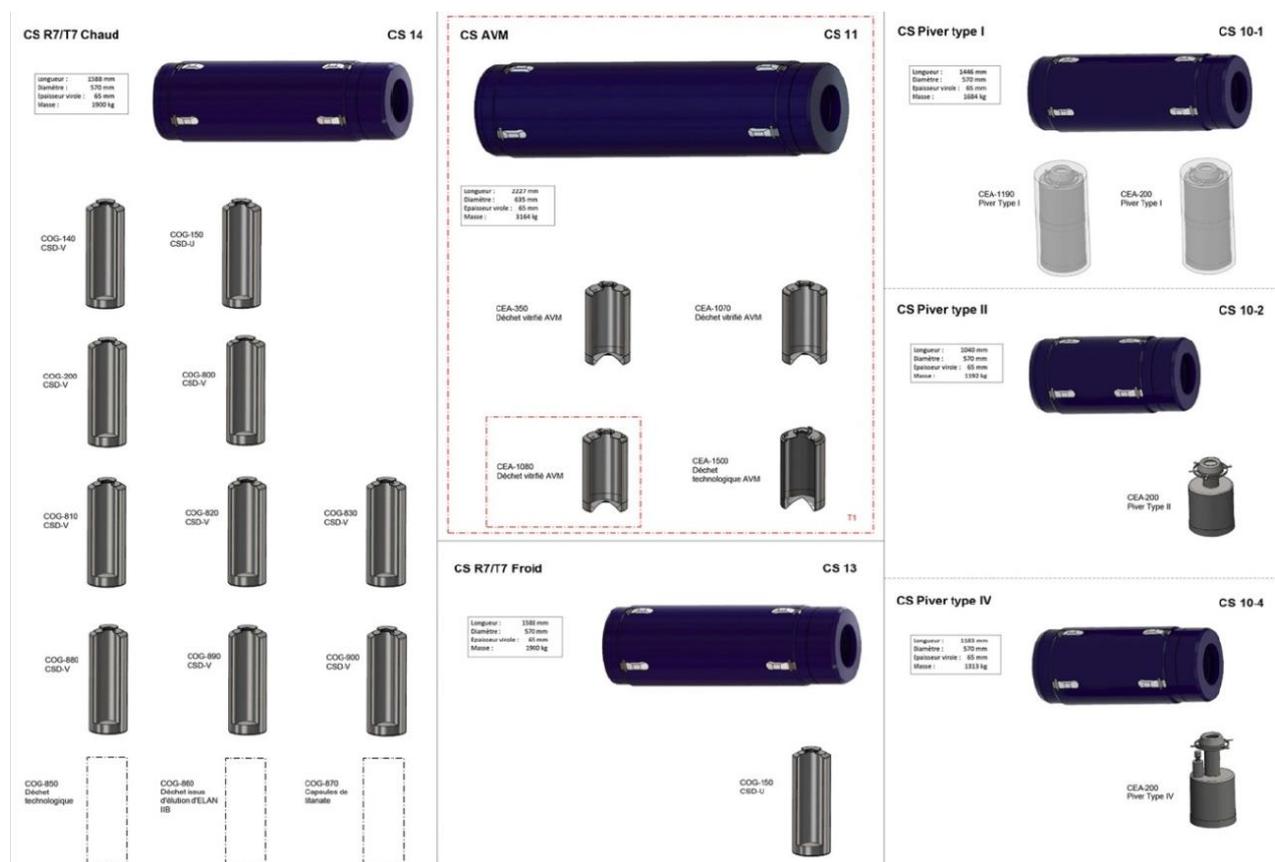


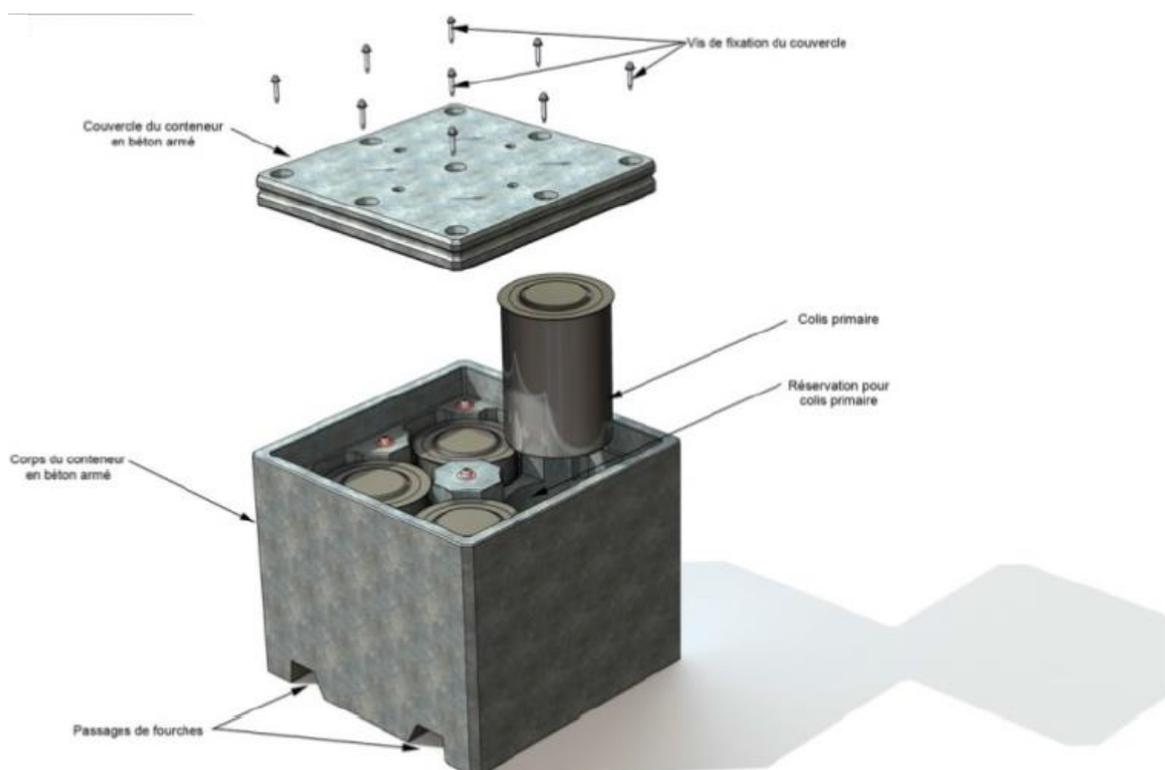
Figure 18 : Modèles de colis de stockage HA [39]

### 2.3.2 LES COLIS DE DECHETS MAVL

Les conteneurs de stockage MAVL retenus par l'Andra [39] sont de forme parallélépipédique en béton pour la majorité des familles de colis (cas des conteneurs de stockage CS1 à CS5) et en acier pour quelques familles de colis (cas des conteneurs de stockage CS6 et CS7). S'agissant en particulier des conteneurs en béton, la solution technique retenue est l'utilisation d'éléments préfabriqués en béton armé constitués d'un corps et d'un couvercle. Pour la majorité des colis primaires, le couvercle est vissé. Pour certaines familles de colis primaires déjà produits pour lesquels la garantie du maintien du confinement sur la durée d'exploitation n'est pas assurée, il est envisagé la mise en place d'un liant de clavage<sup>5</sup> dans l'interstice résiduel entre le corps du conteneur et le couvercle pour renforcer le confinement statique. Des passages de fourches sont prévus sur la face inférieure pour assurer la manutention. Enfin, l'identification du conteneur est marquée à la peinture sur les quatre faces de côté. La Figure 19 ci-après permet d'illustrer la conception d'un conteneur de stockage MAVL à couvercle vissé.

Les conteneurs de stockage MAVL sont dimensionnés pour accueillir un à quatre colis primaires. Les colis de stockage MAVL ont des dimensions de 1,28 à 2,25 m de côté et une masse maximale de 17 tonnes (Figure 20) [39].

<sup>5</sup> Clavage : jonction de deux parties d'ouvrage construites indépendamment, ici réalisée par l'injection d'un matériau de type mortier entre le conteneur et son couvercle



C.IM.AIMC.15.0138.A

Figure 19 : Illustration d'un conteneur de stockage MAVL en béton (CS4) à couvercle vissé accueillant quatre colis primaires [39]

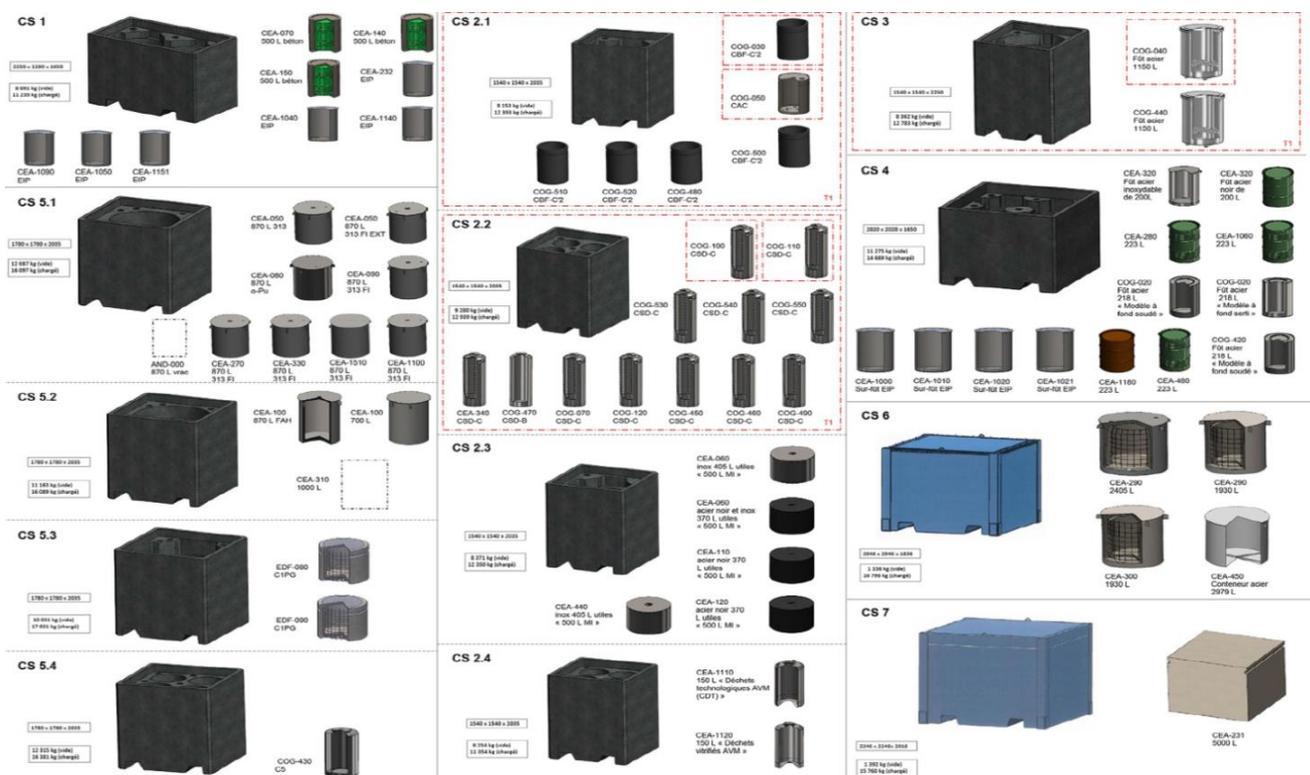


Figure 20: Modèles de colis de stockage MAVL [39]

Trois solutions de stockage sont proposées par l'Andra [39] selon les colis primaires de déchets MAVL. La solution n°1 consiste à placer le colis primaire dans un conteneur de stockage dit « de référence ». La solution n°2 prévoit que le colis primaire soit placé dans un conteneur de stockage dit « renforcé vis-à-vis du confinement ». Elle

est destinée aux colis primaires pour lesquels existent des incertitudes sur le maintien du confinement sur toute la durée de l'exploitation du stockage. Comme mentionné *supra*, le clavage du couvercle est la solution technique actuellement retenue. Enfin, la solution n°3 consiste à stocker directement le colis primaire, sans mise en conteneur de stockage. Ces solutions de stockage sont examinées par l'IRSN au chapitre 3.4.1.

## 2.4 CALENDRIER DE CIGEO

L'Andra prévoit de déposer une demande d'autorisation de création en 2018 avec l'objectif d'obtenir un décret d'autorisation de création en 2020, date à laquelle pourraient démarrer les travaux de construction. Sous réserve de l'obtention des autorisations nécessaires, le PDE [41] retient le calendrier prévisionnel suivant :

- vers 2025 : démarrage de la « phase industrielle pilote » par des essais « en inactif »
- vers 2029 : mise en service avec passage aux essais « en actif »
- vers 2030 : réception des premiers colis de déchets MAVL et HA0 ;
- vers 2035 : bilan de la phase pilote et passage en exploitation courante ;
- vers 2070 : réception des premiers colis de déchets HA1/HA2 (après construction de l'installation EP1 et des ouvrages de stockage) ;
- vers 2150 : opérations de fermeture partielle (cf. chapitre 2.5.1), puis fermeture définitive de Cigéo.

### 2.4.1 CONSTRUCTION INITIALE

L'Andra dénomme « construction initiale » de Cigéo [41] la période pendant laquelle une première partie, ou première « tranche » (« T1 » selon la dénomination Andra), de l'installation est réalisée. Elle porte principalement sur la construction des bâtiments liés à l'exploitation de l'installation nucléaire de surface, les liaisons surface-fond, ainsi que les ouvrages souterrains permettant de recevoir les premiers colis de déchets.

Les ouvrages souterrains réalisés lors de la construction initiale sont présentés schématiquement en Figure 21. Ils incluent les 77 alvéoles HA0 et 4 alvéoles MAVL, qui seront exploitées durant la phase pilote « en actif », après autorisation de mise en service (chapitre suivant).

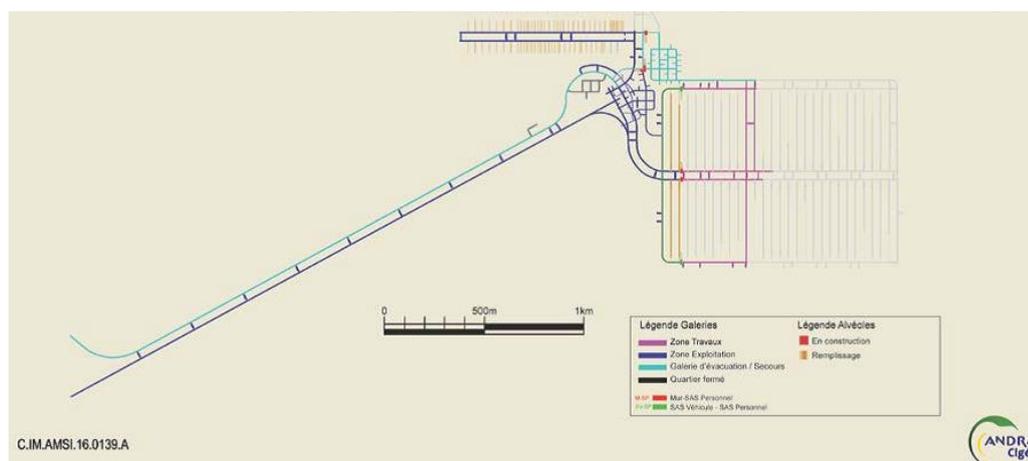


Figure 21 : Représentation des ouvrages souterrains de la tranche T1 [41]

### 2.4.2 PHASE PILOTE

L'Andra [41] indique que la phase pilote vise à conforter, en conditions réelles et en complément des essais réalisés dans le Laboratoire souterrain :

- la maîtrise des risques dans les conditions d'exploitation ;
- les performances des équipements industriels ;
- la capacité à retirer des colis de déchets de leur alvéole de stockage ;
- la capacité à surveiller les ouvrages de stockage ;
- la capacité à obturer et à sceller les alvéoles et galeries ;
- les pistes d'optimisation technico-économique.

La phase pilote comprend la construction initiale (chapitre précédent), une phase d'essais « à froid », puis après autorisation de mise en service, une phase d'essais en actifs. D'après le PDE [41], la construction des ouvrages de la phase T2 (6 alvéoles MAVL) est prévue dès la fin de la construction initiale en 2032, soit en parallèle des essais en actif. L'Andra précise que durant la phase d'essais en actif, une fois les essais de mise en service réalisés et jugés concluants, commencera la montée en régime progressive de l'exploitation, permettant de porter le flux de mise en stockage de quelques centaines à quelques milliers de colis primaires par an [41].

Il convient de rappeler en outre que la [loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016](#) [11] prévoit que le bilan de la phase pilote soit « transmis à l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, qui l'évalue et rend compte de ses travaux aux commissions compétentes de l'Assemblée nationale et du Sénat » en vue d'une autorisation de passage en exploitation courante et précise aussi que « l'autorisation de mise en service mentionnée à l'article L. 593-11 [i.e. celle délivrée par l'ASN] est limitée à la phase industrielle pilote ».

### 2.4.3 EXPLOITATION COURANTE

Après le passage en exploitation courante, que l'Andra envisage en 2035, les zones de stockage sont progressivement étendues au fur et à mesure des besoins de stockage. La première extension, correspondant à la deuxième tranche (T2) dont le creusement aura débuté en phase industrielle pilote (cf. chapitre précédent), concerne six alvéoles du quartier MAVL, pour lesquelles la mise en service est prévue en 2040.

Par la suite, pendant la centaine d'années prévue pour l'exploitation de Cigéo, l'installation souterraine se développe régulièrement pour permettre la réception de la totalité des colis de déchets. Dix nouvelles tranches (de T3 à T12) sont ainsi construites et mises en service successivement jusqu'à terminaison, c'est-à-dire jusqu'à la réalisation des ouvrages permettant de stocker l'ensemble de l'inventaire de Cigéo.

## 2.5 FERMETURE DU STOCKAGE

### 2.5.1 OPERATIONS DE FERMETURE

Conformément à l'arrêté du 7 février 2012 [4], après l'exploitation, l'installation sera fermée et placée en phase de surveillance. Cigéo est destiné, une fois fermé, à assurer de manière passive les fonctions de sûreté après fermeture.

L'Andra prévoit que des opérations de fermeture progressives soient engagées pendant la période d'exploitation : ces opérations consistent en un démontage des équipements d'exploitation (« démantèlement ») et à la construction d'ouvrages de fermeture.

Pour l'installation souterraine, les équipements fixés dans les bétons ainsi que ceux des parties utiles des alvéoles de stockage sont laissés en place. Chaque quartier est fermé en une seule et même opération regroupant la

construction des ouvrages d'obturation de tous les alvéoles et le remblaiement et le scellement des galeries nécessaires à sa fermeture. À terme, hormis pour les alvéoles de stockage, toutes les cavités de Cigéo seront comblées (remblayées, scellées ou remplies de béton).

Le démantèlement des bâtiments de surface consiste en une déconstruction d'ouvrages de génie civil et de second œuvre, des réseaux d'alimentation et de la ventilation nucléaire, ainsi qu'un assainissement des structures en béton éventuellement activées ou contaminées dans les locaux par lesquels des colis de déchets ont transité.

Les opérations de fermeture sont décrites dans le chapitre suivant (2.5). L'Andra indique [41] que Cigéo est conçu pour que les opérations de fermeture partielle puissent être engagées par l'exploitant sur toute la période d'exploitation de Cigéo. Au stade du DOS, le schéma de « *fermeture optimum* » retenu par l'Andra est :

- vers 2070 pour le quartier HAO (après, selon les alvéoles, 30 à 40 ans de surveillance et de récupérabilité) ;
- vers 2100 pour le quartier MAVL, à l'issue de son remplissage (environ 70 ans après) ;
- vers 2145 pour les quartiers HA1/HA2, à l'issue de leur remplissage (en fonction des quartiers jusqu'à environ 60 ans après).

En surface, la principale opération de démantèlement prévue avant la fermeture définitive concerne l'installation EP1, vers 2100, en lien avec la fin du remplissage et la fermeture du quartier MAVL.

Dans le calendrier actuel, la fermeture définitive de Cigéo est prévue vers 2150. Le démantèlement des installations de surface se poursuivra quelques années après la fermeture définitive de l'installation souterraine de Cigéo.

## 2.5.2 OUVRAGES DE FERMETURE

Les opérations de fermeture partielle consistent à obturer des alvéoles de stockage et à remblayer et sceller des galeries. La fermeture définitive de Cigéo consiste à remblayer les dernières galeries de la zone de soutien logistique ainsi qu'à sceller et remblayer les puits et descenderies.

Les scellements de puits et descenderies sont des ouvrages constitués de noyaux à base d'argile gonflante placés dans la partie supérieure du Callovo-Oxfordien (« toit » de la formation hôte).

Le remblaiement des galeries est prévu par réutilisation des déblais argileux excavés au moment du creusement et entreposés sur les verses en surface. Les ouvrages d'obturation des alvéoles de stockage, puis de scellement de galeries et enfin de scellement de liaisons surface-fond sont présentés ci-après.

### 2.5.2.1 Bouchons d'alvéole HA

L'Andra indique [39] que préalablement à la fermeture d'un alvéole HA, un bouchon de radioprotection « de fermeture » ou « définitif », d'un aspect similaire à celui d'un conteneur de stockage (cylindre métallique muni de patins, manutentionné de la même façon que les conteneurs), est placé dès la fin du remplissage d'un alvéole, à l'intérieur du chemisage de l'alvéole au plus près des colis stockés (à environ 7 m de la galerie d'accès) ; le dispositif de drainage gravitaire de l'eau provenant éventuellement du terrain demeure opérationnel. Ce bouchon de radioprotection est conçu pour être retiré aisément en cas de retrait de colis.

Après la mise en place du bouchon de radioprotection définitif, un matériau de remplissage à base d'argile (appelé « bouchon ») est placé à l'intérieur du chemisage laissé en place. La longueur du bouchon est aussi grande que possible et au minimum de 2 mètres. La composition du matériau argileux n'est pas fixée à ce stade. Après la mise

en place des bouchons d'argile, la ventilation nominale de la galerie d'accès est arrêtée et son remblaiement est mis en œuvre.

### 2.5.2.2 Fermeture des alvéoles MAVL

L'Andra indique [39] que le choix des équipements non fixés laissés en place sera précisé pour la DAC en regard des évaluations d'impact notamment sur la perturbation du Callovo-Oxfordien et plus particulièrement sur les fonctions de sûreté après fermeture.

L'obturation de chaque alvéole MAVL (Figure 22) débute côté galerie d'accès par la mise en place d'un mur en béton, qui obture le voile de l'ancienne porte de radioprotection. Un mur en béton est également réalisé de l'autre côté de la partie utile de l'alvéole, à l'extrémité de la galerie de jonction avec la galerie de retour d'air (cf. chapitre 2.2.3.1), et la ventilation à l'intérieur de l'alvéole MAVL est arrêtée ; le mur d'obturation côté galerie d'accès est conçu de manière à pouvoir être équipé d'un dispositif de contrôle de l'atmosphère. Le tronçon entre le mur d'obturation et la galerie de liaison est ensuite comblé de différents matériaux. La cellule de manutention et la zone d'accostage sont intégralement bétonnées. Enfin, la galerie à l'entrée de l'alvéole est comblée d'un matériau argileux. Au stade de l'APS, l'Andra n'a pas d'option de référence pour la nature du matériau argileux comblant la galerie à l'entrée de l'alvéole et la galerie de jonction de retour d'air ; les deux options étudiées sont un scellement à noyau en argile gonflante sur le même principe que les scellements horizontaux (cf. ci-dessous) ou la mise en place d'un remblai à base d'argilites excavées.

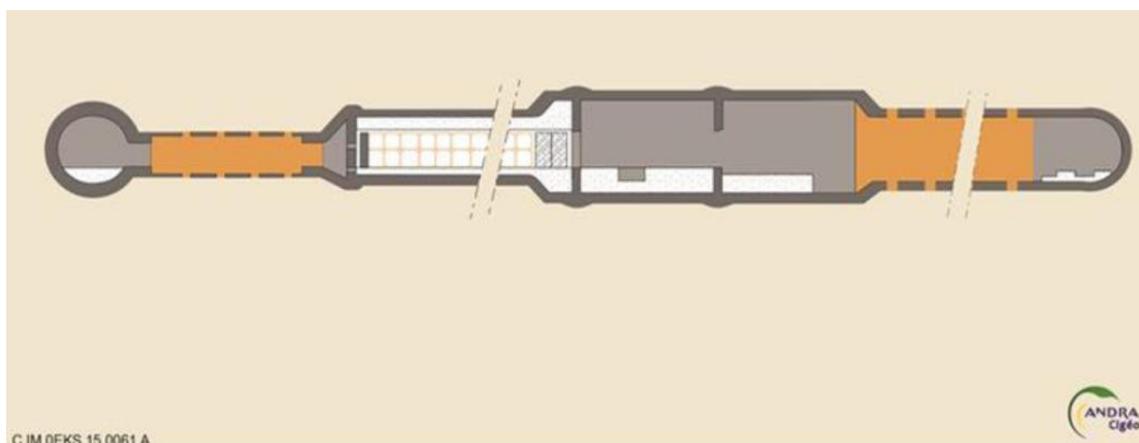


Figure 22 : Schéma de fermeture de l'alvéole MAVL : illustration des scellements, au stade de fin d'APS [39]. Lors de l'exploitation : radiers et bétons de coffrage en blanc, béton de revêtement en gris foncé. Lors de la fermeture : béton de remplissage en gris clair, matériau argileux de scellement en orange.

### 2.5.2.3 Scellements de galeries horizontales

L'Andra [39] indique que les « scellements horizontaux » (ou « scellements de fond ») sont implantés dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien, dans les galeries de liaison reliant les quartiers de stockage (quartier HA1/HA2 et quartier MAVL) aux liaisons surface-fond. Les tronçons de galerie destinés à recevoir des scellements horizontaux sont orientés parallèlement à la contrainte principale majeure afin de limiter la zone endommagée induite par l'excavation. Afin de maintenir ouverte à ce stade la possibilité de prendre en compte ou non le phénomène d'auto-colmatage de la zone endommagée (cf. chapitre 4.5.4), lié au gonflement des minéraux inter-stratifiés illite/smectite des argilites, l'Andra étudie deux options (Figure 23) en parallèle :

- en référence, le revêtement de la galerie est retiré totalement ou par portions au droit du noyau de manière à ce que celui-ci soit en contact direct avec les argilites sur une longueur cumulée d'au moins quelques mètres ; une pression de gonflement du noyau, jusque 4 MPa, vise la fermeture mécanique des fissures ;
- en variante, 3 à 5 coupures hydrauliques radiales, venant interrompre la continuité de la « zone fracturée connectée » (ZFC) et la continuité du revêtement laissé en place, sont réalisées à la scie. Ces coupures consistent en des saignées d'épaisseur 30 cm et d'une profondeur de l'ordre de 0,8 fois le rayon excavé, remplies par un matériau à base d'argile gonflante, réalisées à intervalles réguliers en complément du noyau en argile. Le revêtement est laissé en place en dehors de ces coupures hydrauliques.

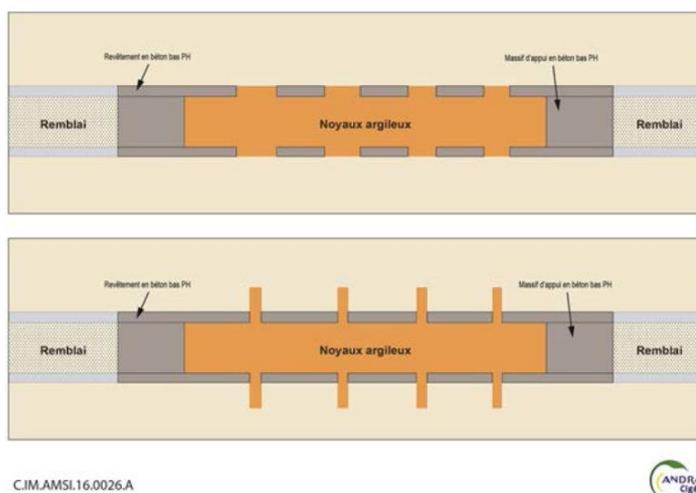


Figure 23 : Schémas de principe des deux options de scellements horizontaux [39]

Au stade du **DOS**, une localisation possible des scellements horizontaux est présentée sur la Figure 24. Néanmoins, leur localisation précise n'est pas encore fixée [39]. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que le positionnement « sera ajusté en lien avec l'évolution de l'architecture rendue possible par son développement incrémental et sa conception modulaire de manière à prendre en compte les progrès scientifiques et techniques qui interviendront à cet horizon ».

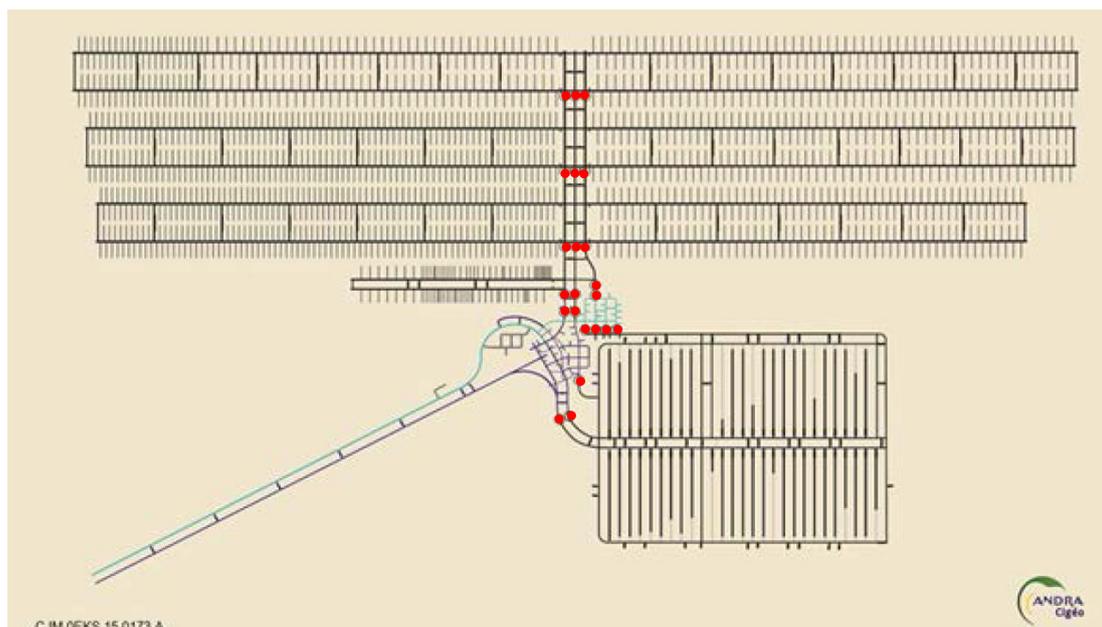


Figure 24 : Localisation des scellements dans l'installation souterraine (cercles rouges) [39]

L'Andra retient un objectif de performance pour les scellements horizontaux exprimé en termes de perméabilité en grand (incluant tous les composants, y compris l'interface noyau-argilites) inférieure à  $10^{-9}$  m/s. La longueur minimale du noyau est de deux fois le diamètre excavé de l'ouvrage, soit une vingtaine de mètres. Des massifs d'appui en béton de type « bas pH » seraient construits de part et d'autre pour confiner mécaniquement le noyau, en fonction de la pression de gonflement visée. Afin de limiter la perturbation chimique, les portions de revêtement laissées en place au droit des scellements seront de type béton « bas pH » (pH du béton sain [après prise]  $\leq 11$ ) jusqu'à une distance au moins égale à un diamètre de l'ouvrage de part et d'autre du noyau (cf. chapitre 5.3). Selon l'Andra, « la question de la mise en place des revêtements en béton bas pH au droit des futurs scellements dès la phase de construction ou de manière différée lors de la mise en place de ces scellements reste ouverte ».

#### 2.5.2.4 Scellements de liaisons surface-fond

Les scellements de liaisons surface-fond [39] sont verticaux pour les puits et inclinés pour les descendries (cf. Figure 25). Ils sont placés dans les unités silto-carbonaté (USC) et de transition (UT) du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 2) pour les puits, et dans l'USC pour les descendries. Des scellements de séparation des formations aquifères sont prévus au droit du Kimméridgien, conformément au Code de l'environnement.

L'Andra retient un objectif de perméabilité en grand du noyau à saturation de l'ordre de  $10^{-11}$  m/s et une pression de gonflement (pression effective) comprise entre quelques méga-pascals et 4 MPa. La longueur du noyau est la plus grande possible soit, compte tenu de l'épaisseur de l'USC, de 40 m dans les puits et d'au moins 100 m dans les descendries. Le noyau est confiné mécaniquement par des massifs d'appui en béton qui doivent lui permettre de développer sa pression de gonflement. Afin de limiter la perturbation chimique liée aux bétons, l'emploi de formulations de type « bas pH » (cf. chapitre 5.3) est retenu à la fois pour les massifs et pour les tronçons de revêtements qui pourraient rester en place (en particulier au droit des massifs jusqu'à une distance au moins égale à un diamètre de l'ouvrage de part et d'autre du noyau), à l'instar de l'option retenue pour les scellements de fond.

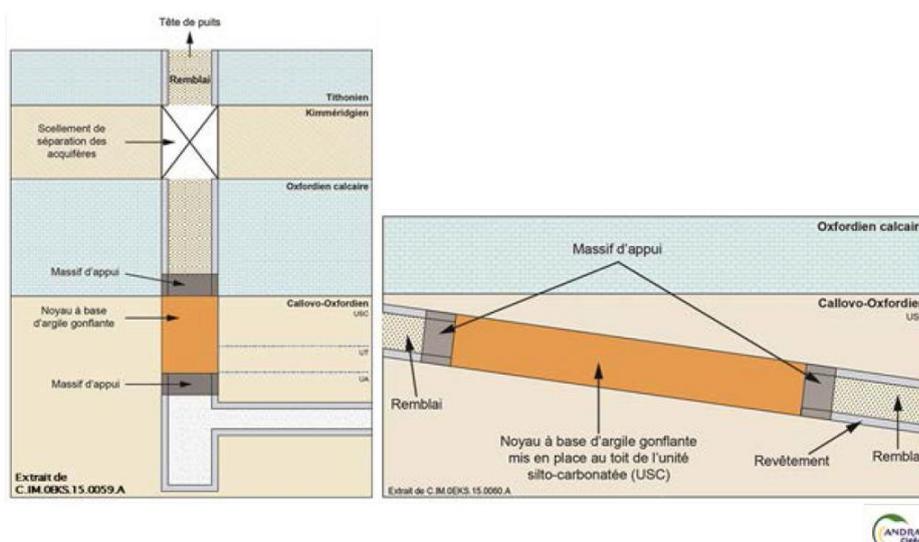


Figure 25 : Schémas de principe des scellements verticaux et inclinés des liaisons surface-fond [39]

## 2.6 PROCÉDES MIS EN OEUVRE DANS LES INSTALLATIONS

### 2.6.1 PROCÉDES DANS L'INSTALLATION NUCLEAIRE DE SURFACE EP1

#### 2.6.1.1 Description du procédé

Les emballages de transport (ET) arrivent sur le site par convois routiers ou ferroviaires [39]. Après un contrôle administratif (contrôle « C1 ») à l'arrivée du convoi, ils sont déchargés avec un pont portique, dans le hall de chargement / déchargement des convois, sur un châssis configurable. Après contrôle externe de la contamination (contrôle « C2 »), les ET sont transférés dans le hall de déchargement des ET et les capots de protection sont retirés avec un pont roulant. Après contrôle du débit de dose et de la contamination externe (contrôle « C3 »), les ET verticaux sont redressés et les deux types d'ET sont disposés sur un chariot de transfert (Figure 26).

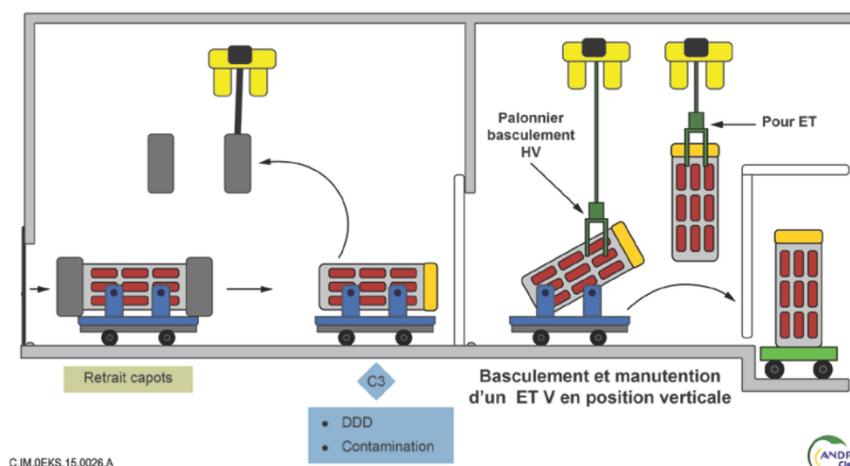


Figure 26 : Schéma de principe de réception, de contrôle « C3 » et de basculement des emballages de transport verticaux [39]. (DDD : débit de dose)

Le déchargement des colis primaires des ET s'effectue au niveau du hall de déchargement des ET. Ils sont déchargés sur une table de transfert ou une table tournante (en fonction du type d'ET). Après déchargement des colis primaires, la cavité interne des ET vides est contrôlée (contrôle « C4 »).

En fonctionnement normal, les colis primaires sont acheminés vers l'un des deux postes de contrôle « C5 » pour réaliser les contrôles à réception (cf. Figure 27 et Figure 28), en alternance et en flux tendu. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que dans le cas d'un dysfonctionnement d'un des postes C5, un entreposage tampon de 24 colis est disponible. A ce stade, les contrôles « C5 » envisagés sont :

- des visuels de l'aspect extérieur des colis primaires et identification du numéro du colis,
- des contrôles dimensionnels et de pesée,
- des contrôles de non contamination,
- des contrôles de mesure du débit de dose.

Les colis primaires sont ensuite mis en zone tampon « CS non confectionnés » (30 emplacements) (ou si nécessaire en zone tampon « CP non conformes » de 12 emplacements) puis placés dans un conteneur de stockage et, dans le cas des colis MAVL, le couvercle du conteneur est également apposé.

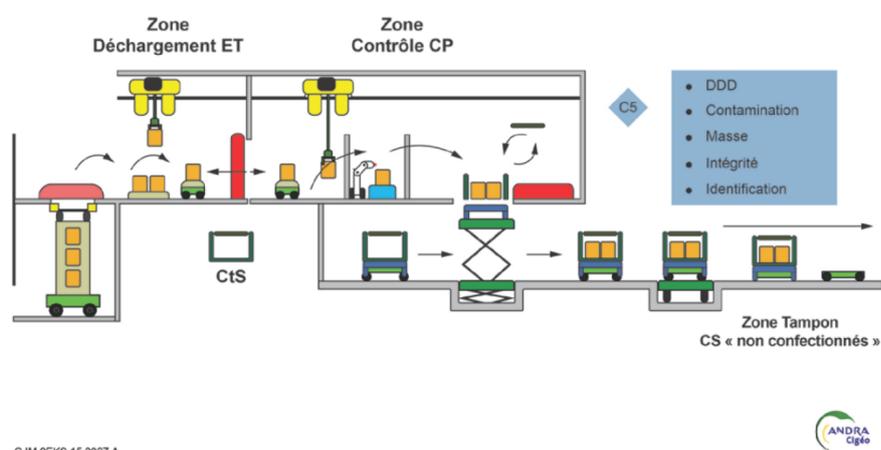


Figure 27 : Schéma de principe de déchargement des emballages de transport verticaux et contrôle « C5 » [39]

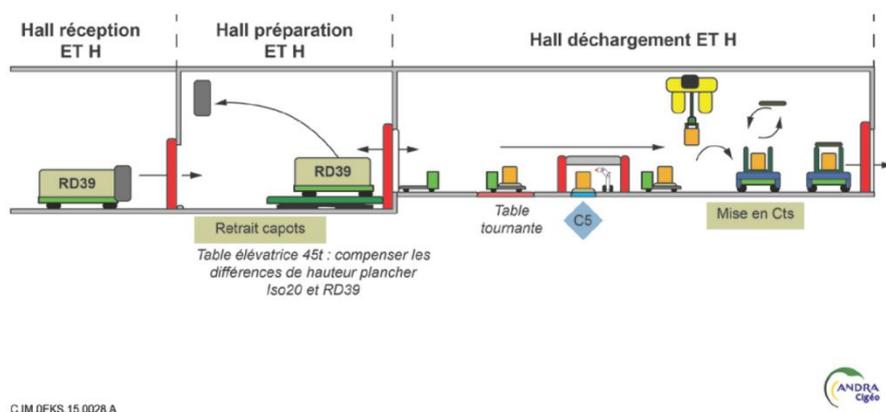


Figure 28 : Schéma de principe de déchargement des emballages de transport horizontaux et contrôle « C5 » [39]

### Conditionnement des colis de stockage MAVL

Le transfert des colis de stockage lors du conditionnement se fait sur un chariot. La séquence de conditionnement retenue consiste en (i) la réception d'un colis de stockage par le chariot de transfert, (ii) la dépose du couvercle, (iii) l'injection d'un « liant granulométrique » autour du colis primaire (matériau de type sable), (iv) la repose du couvercle, (v) la mise en place des vis de serrage du couvercle, (vi) le clavage éventuel (cf. chapitre 2.3.2) du couvercle et (vii) le contrôle du colis de stockage (contrôle « C6 ») qui consiste en des contrôles visuels et

dimensionnels. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que la solution d'injection d'un liant granulométrique était abandonnée.

#### Conditionnement des colis de stockage HA

Les conteneurs de stockage non fermés et les couvercles sont acheminés vers la cellule de conditionnement où ils sont manutentionnés sur des chariots. La séquence retenue dans la cellule de conditionnement consiste en (i) poser le couvercle sur le conteneur de stockage, (ii) souder le couvercle sur le corps du conteneur, (iii) détentionner le colis de stockage, (iv) usiner et raboter le cordon de soudure, (v) broser la zone soudée et (vi) transférer le colis de stockage pour un contrôle de la soudure par ultrasons puis vers le poste de contrôle « C6 » pour des contrôles visuels et dimensionnels du colis de stockage HA (Figure 29).

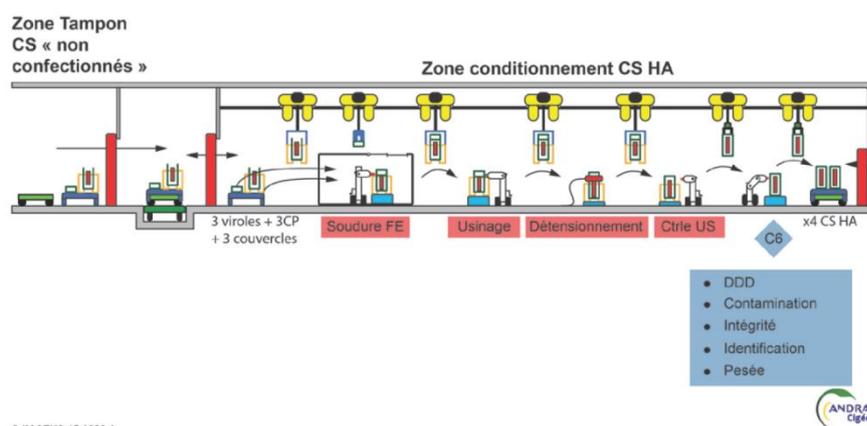
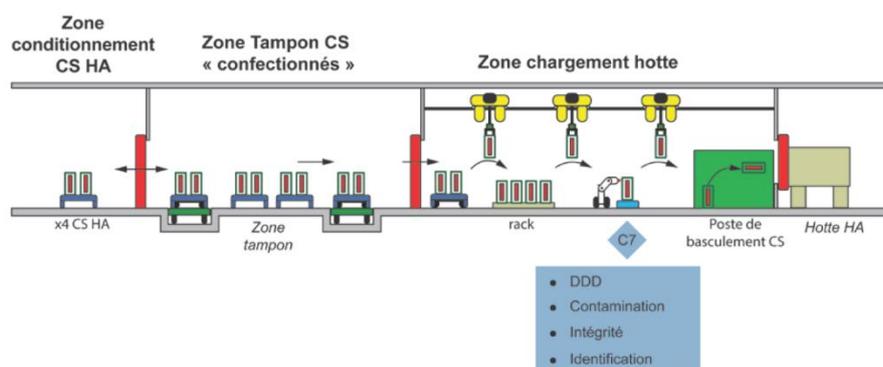


Figure 29 : Schéma de principe de conditionnement de colis de stockage HA [39]

#### Mise en hotte

A leur sortie de la cellule de conditionnement, les colis de stockage HA ou MAVL sont positionnés dans une zone tampon « CS confectionnés » (70 emplacements) en attente de transfert vers l'installation souterraine (ou si besoin en zone tampon « CS non conformes » (12 emplacements). Il est à noter que les colis de stockage MAVL ayant été clavés sont entreposés dans la zone tampon « CS confectionnés » en attente de mûrissement du liant de clavage avant leur mise en hotte de transfert.

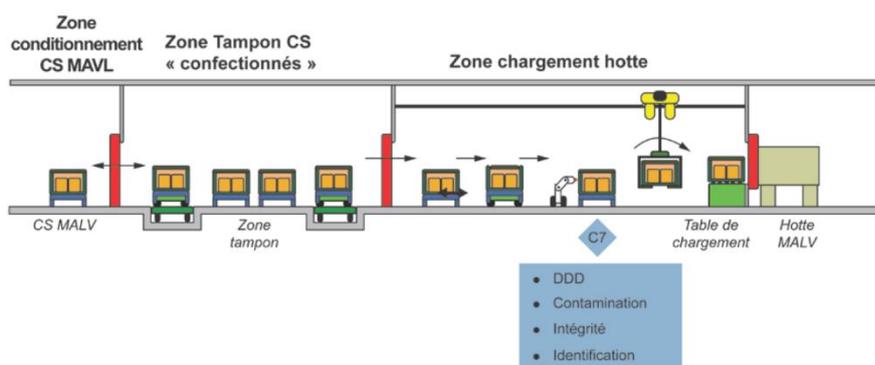
Les colis de stockage sont ensuite transférés vers le poste de contrôle « C7 » (contrôles de débit de dose, de contamination surfacique, d'intégrité et identification du colis de stockage) puis mis soit sur un basculeur pour les colis de stockage HA soit sur une table de chargement pour les colis de stockage MAVL avant d'être placés dans la hotte, décrite ci-après (cf. Figure 30 et Figure 31).



C.IM.OEKS.15.0032.A



Figure 30 : Schéma de principe de mise en hotte de colis de stockage HA [39]



C.IM.OEKS.15.0031.A



Figure 31 : Schéma de principe de mise en hotte de colis de stockage MAVL [39]. En jaune, Machine à Levage Limité, qui soulève les hottes et les translate au ras du sol.

### Hottes des colis de stockage MAVL

Les hottes MAVL sont constituées d'une enceinte de confinement, d'une enceinte blindée munie de deux orifices en partie basse pour permettre un balayage de l'atmosphère intérieure (évacuation du dihydrogène produit par radiolyse ; cf. chapitre 7.2.2) et d'une porte, le tout reposant sur des pieds équipés de deux demi-caissons assurant une protection thermique et mécanique (Figure 32 gauche). Il existe trois types de hottes, selon le colis de stockage : de type 1 pour les CS2 et CS3, de type 2 pour les CS1, CS4, CS6 et CS7, de type 3 pour les CS5. Leur masse en charge maximale est de 74 à 87 t et leur hauteur de 4,21 à 4,49 m. Une fonction de confinement et de radioprotection est assignée à ces hottes ; le blindage en acier est conçu pour un débit d'équivalent de dose (DED) inférieur à 25  $\mu\text{Sv/h}$  à 1 mètre des parois extérieures des hottes.

### Hottes des colis de stockage HA

Il existe deux types de hottes de colis HA selon le diamètre de ces derniers (voir chapitre 2.3.1), de même conception : elles renferment deux logements parallèles, un pour l'extraction du bouchon de radioprotection, l'autre contenant le colis HA. Les protections radiologiques des hottes de transfert des colis HA, constituées d'une alternance de matériaux acier-neutrophage-acier, ont un l'objectif de DED inférieur à 25  $\mu\text{Sv/h}$  à 1 mètre des parois extérieures. Leur masse en charge maximale est de 79,9 à 81,2 t. Elles n'ont pas de fonction de confinement, qui est assurée par le colis.

Les hottes sont placées sur une table motorisée permettant de réaliser les opérations d'accostage, de retrait (ou de remise en place) du bouchon d'exploitation et de mise en place (ou de récupération) du colis de stockage HA dans l'alvéole (Figure 32 droite). La hotte contenant un colis de stockage est ensuite transférée vers le bâtiment « tête de descenderie colis ».

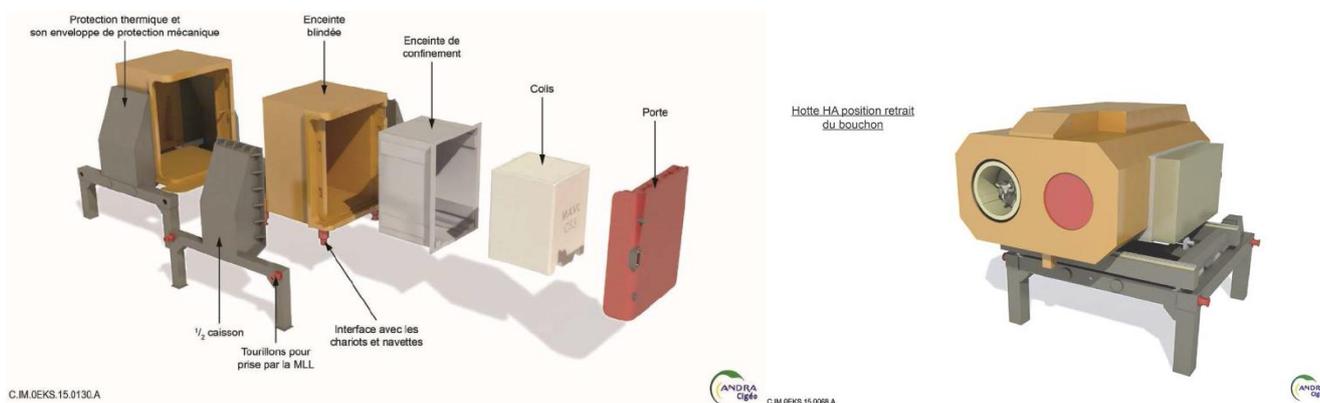


Figure 32 : À gauche, hotte MAVL (type 1) en vue éclatée. À droite, hotte HA en position de retrait du bouchon [39]. MLL : Machine à Levage Limité.

### 2.6.1.2 Ventilation

Au stade du DOS [39], l'Andra prévoit un dimensionnement de la ventilation conforme à la norme ISO 17873. Selon les risques de dissémination en fonctionnement normal et accidentel, les locaux de surface ont une ventilation nucléaire avec un ou deux étages de filtration Très Haute Efficacité (THE).

L'Andra retient:

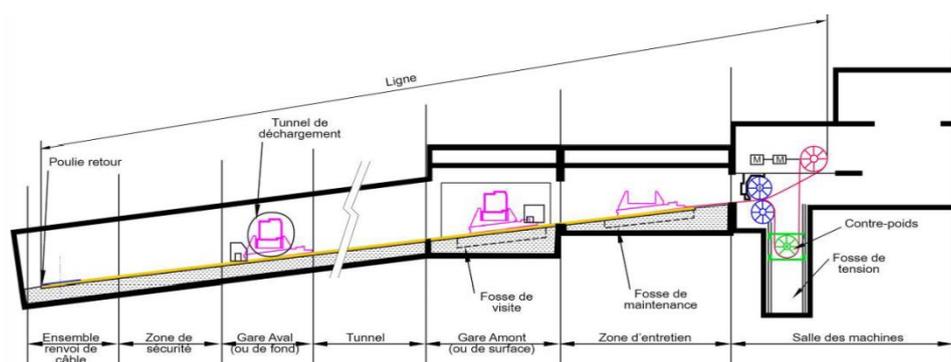
- un réseau conventionnel pour les locaux hors zone contrôlée,
- un classement C1-I pour les locaux en zone contrôlée qui sont exempts de substances radioactives ou dans lesquels les substances radioactives sont conditionnées dans des conteneurs robustes vis-à-vis des agressions, ne conduisant alors pas à des risques de dissémination en situations incidentelle ou accidentelle,
- un classement C2-IIA pour les locaux exempts de substances radioactives mais présentant des points de communication avec les cellules de conditionnement ; au stade du DOS l'Andra retient notamment les zones avant de ces cellules,
- un classement C3-IIB ou C4\*\*-IIB pour les locaux où les substances radioactives sont conditionnées et pour lesquelles les agressions pourraient conduire, en situations incidentelle ou accidentelle, à des risques de dissémination ; au stade du DOS l'Andra retient la cellule de déchargement des colis primaires des emballages de transport, du contrôle C5<sup>6</sup> et de la mise en conteneur de stockage.

Le dimensionnement de la ventilation vis-à-vis des risques de dissémination est analysé par l'IRSN dans le chapitre 7.1.2 et la conduite de la ventilation en situation d'incendie est examinée dans le chapitre 7.2.1.

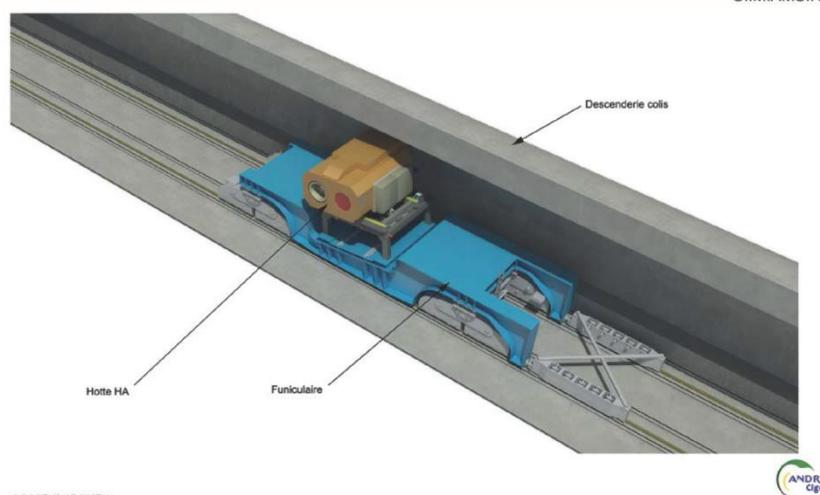
<sup>6</sup> le poste de « contrôle C5 » correspond au 5<sup>ème</sup> niveau de contrôle et n'a aucun rapport avec les colis C5

## 2.6.2 PROCÉDES DANS LA DESCENDERIE COLIS

Au stade du DOS, l'Andra retient [39] un système de transport par câble avec un « transfert incliné » sur une pente d'environ 12 %, également appelé « funiculaire » sur rails, pour le transfert des hottes dans l'installation souterraine à travers la descenderie colis, composé d'un châssis muni de 8 roues de guidage sur le premier rail ainsi que de 8 autres roues porteuses situées sur le second rail. L'entraînement de ce véhicule se fait avec une boucle mouflée, c'est-à-dire par la rotation simultanée en sens inverse de deux poulies motrices, la tension étant assurée par deux poulies de tension disposées symétriquement au niveau de la gare amont (Figure 33), à une vitesse normale d'environ 9 km/h. La descenderie colis est équipée d'une voie rectiligne entre la gare amont et la gare aval. Le funiculaire a un poids total de 80t à vide et de 210 t au maximum chargé.



C.IM.AMSI.15.0048.A



C.IM.OEKS.15.0167.A



Figure 33 : Schéma de principe du transfert incliné (haut) et illustration du funiculaire (bas) [39]

La ventilation des descenderies est ascendante et en pleine section. Le soufflage se fait depuis le plénum de ventilation en ZSL Exploitation.

## 2.6.3 PROCÉDES DANS L'INSTALLATION SOUTERRAINE

L'ensemble des procédés dans la descenderie colis et l'installations souterraine est actionné par électricité transmise par les rails.

### Transferts dans la ZSL Exploitation et dans les galeries

L'Andra indique [39] qu'au niveau de la gare basse de la descenderie, la hotte est reprise par un chariot de transfert qui l'achemine jusqu'à l'entrée des galeries d'accès aux alvéoles MAVL ou HA (Figure 34).

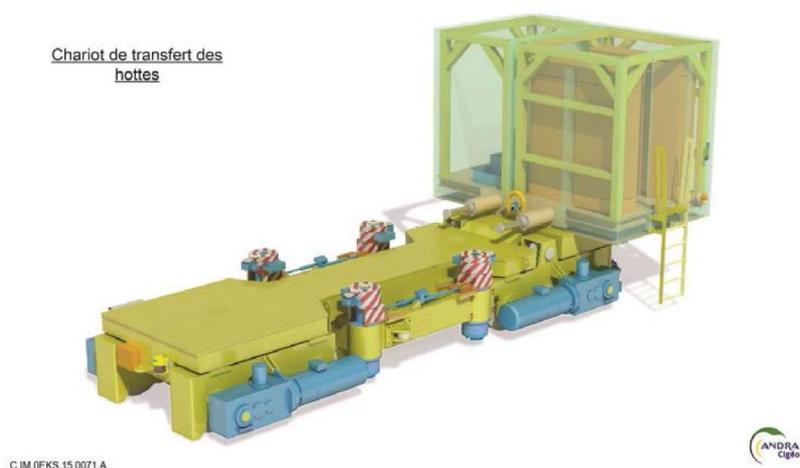


Figure 34 : Chariot de transfert des hottes [39]

Dans la ZSL Exploitation et aux intersections entre galerie de liaison et galerie d'accès, des tables tournantes de rails (Figure 35) permettent soit le passage du chariot de transfert des hottes soit la reprise des hottes par une navette après dépose de la hotte sur la table.

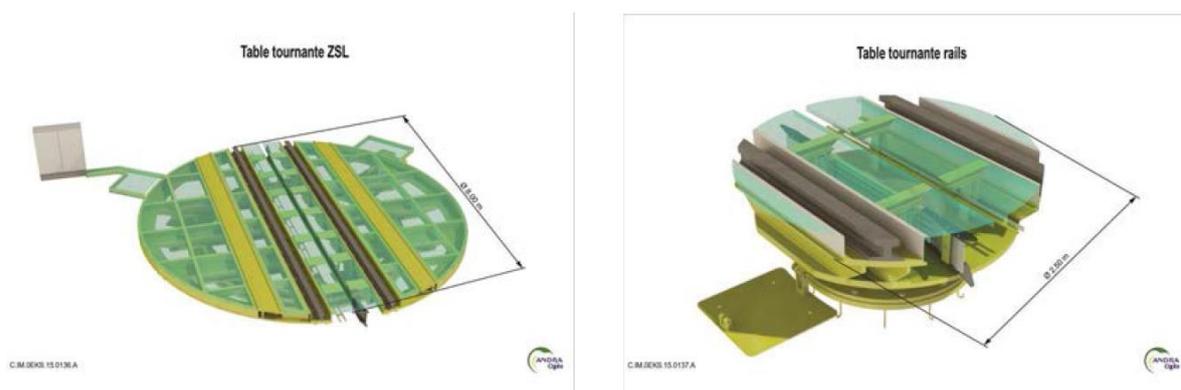
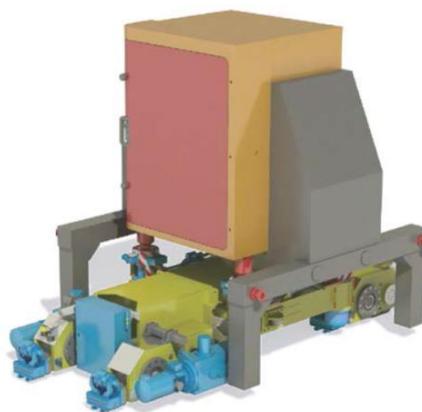


Figure 35 : Tables tournantes [39]

### Mise en stockage MAVL

La hotte est prise en charge au niveau de la table tournante par une navette d'accostage (Figure 36) qui la transfère jusqu'à la façade d'accostage de l'alvéole MAVL où elle est déposée sur une table d'accostage (Figure 37).

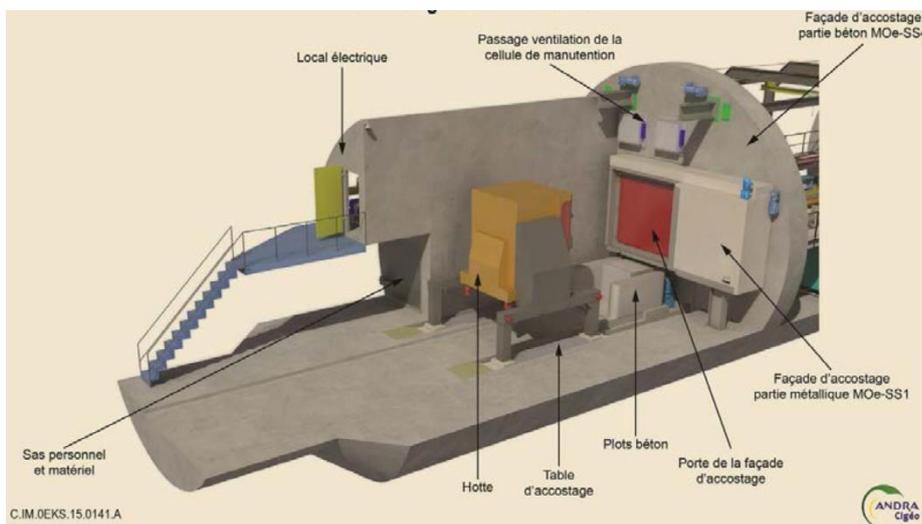
Navette d'accostage  
MAVL avec hotte



C.IM.0EKS.15.0074.A



Figure 36 : Navette d'accostage MAVL [39]



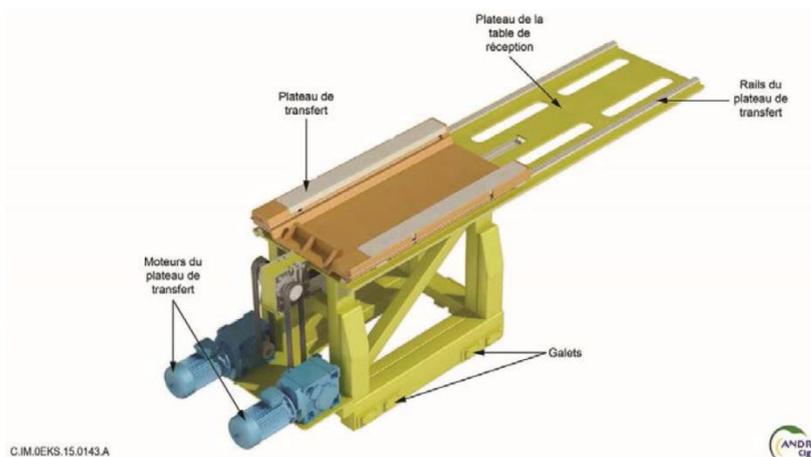
C.IM.0EKS.15.0141.A



Figure 37 : Table et façade d'accostage d'un alvéole MAVL [39]

Lors de l'accostage de la hotte à la porte de la façade d'accostage, des joints permettent le maintien du confinement statique de l'alvéole MAVL (ce point est traité dans les chapitres 7.1.2 et 7.2.1.6).

Les colis sont déchargés de la hotte par une table de réception équipée d'un plateau de transfert (Figure 38) et amenés sur une table élévatrice.



C.IM.0EKS.15.0143.A



Figure 38 : Table de réception de colis de stockage MAVL [39]

Le colis de stockage est ensuite repris soit par un pont stockeur (Figure 39) pour les colis en conteneurs de stockage CS1 à CS5, soit par un chariot stockeur (Figure 40) pour les colis en conteneurs de stockage CS6 ou CS7 pour être transféré dans la partie utile de l'alvéole. Une porte de radioprotection sépare la cellule de manutention de la partie utile de l'alvéole. Celle-ci est maintenue en position fermée et ne s'ouvre que pour le passage d'un colis vers sa position de stockage.

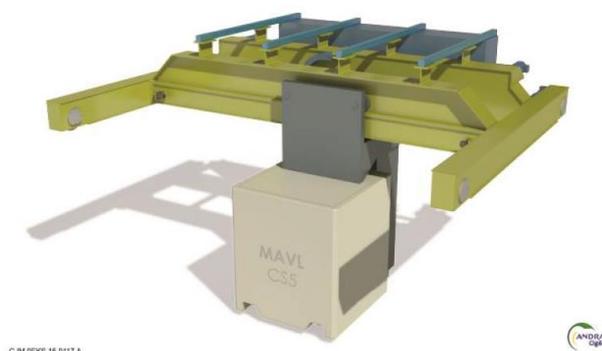


Figure 39 : Pont stockeur avec colis (position premier niveau) [39]

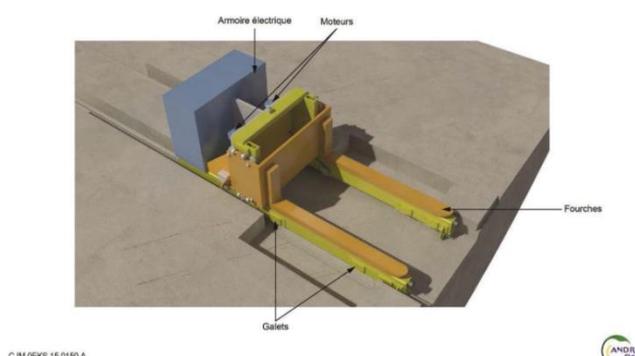


Figure 40 : Chariot stockeur [39]

Les alvéoles accueillant les colis en conteneur CS1 à CS5 sont remplies depuis le fond, par rangée puis par niveau, c'est-à-dire que le remplissage au second niveau n'est commencé que lorsque le premier est terminé. Pour ces alvéoles, un mur constitué de blocs en béton de même dimensions que les colis et manutentionnés comme des colis est construit à l'avancement du remplissage de chaque niveau afin de limiter d'une part la hauteur de chute entre la cellule de manutention et la partie utile et d'autre part isoler radiologiquement la cellule de manutention de la partie utile. Dans les alvéoles accueillant les colis en conteneur CS6 ou CS7, ce mur en béton est construit lorsque l'alvéole est plein.

L'Andra précise que le retrait des colis sera réalisé avec les mêmes équipements que ceux qui ont servi à leur mise en place, ces équipements étant complétés par un système de contrôle de la contamination et un système de fixation de cette contamination en cellule de manutention. Le retrait des colis est examiné au chapitre 7.2.4.

#### Mise en stockage HA

Au stade du dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'Andra retenait une seule hotte qui avait pour fonctions (i) le transfert des colis de stockage HA depuis la surface vers l'alvéole et (ii) la mise en place du colis de stockage dans son alvéole. Au stade du DOS, l'Andra retient différents types de hottes :

- les hottes de transfert des colis HA, qui sont décrites au chapitre 2.6.1.1,

- une hotte spécifique pour le robot pousseur HA (Figure 41),
- une hotte spécifique pour le robot de retrait HA ou « robot tracteur » (Figure 42).

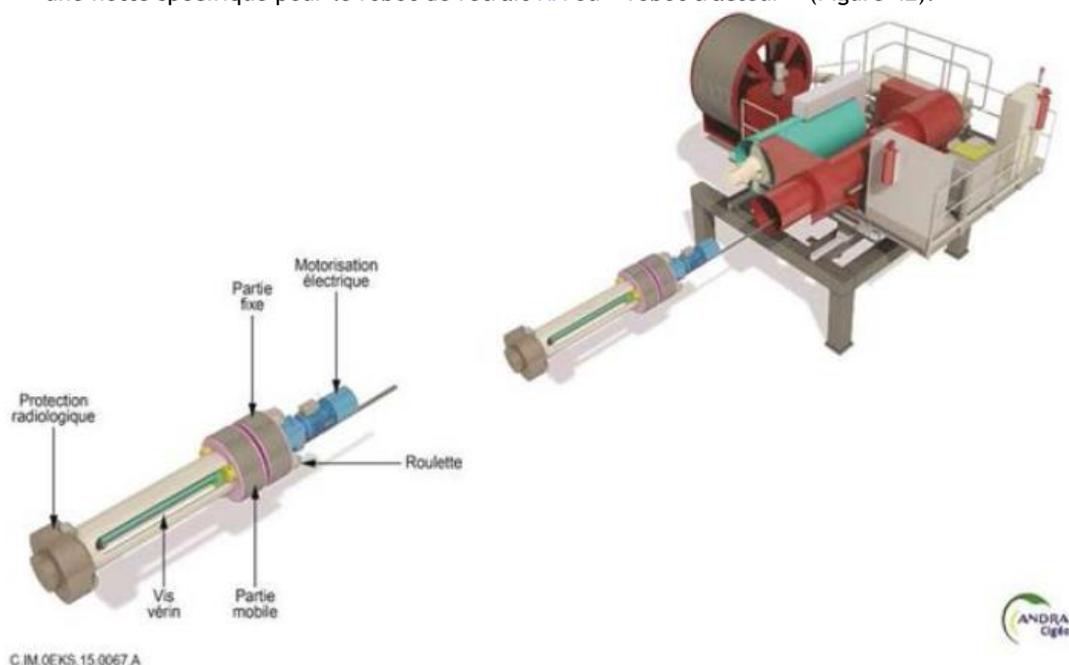


Figure 41 : Robot pousseur HA et sa hotte [39]

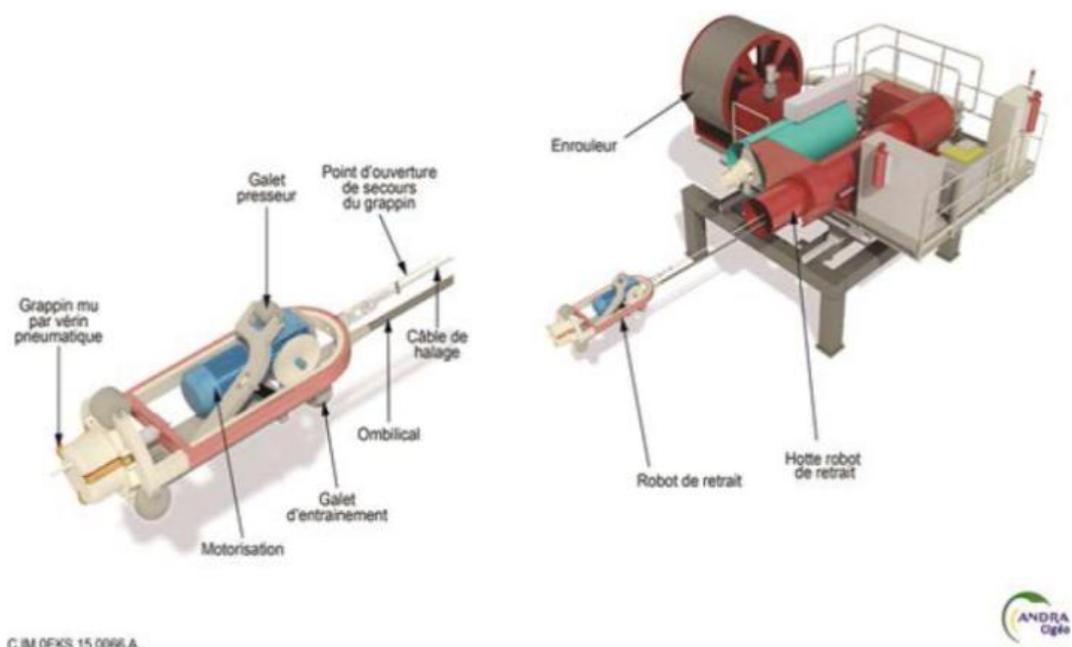


Figure 42 : Robot de retrait HA et sa hotte [39][42]

Ainsi, la hotte de transfert HA est prise en charge par une navette au niveau de la table tournante entre la galerie de liaison et la galerie d'accès, qui achemine la hotte jusqu'à la façade d'accostage de l'alvéole. Après retrait du bouchon d'exploitation par la hotte de transfert HA, le colis de stockage est introduit au début de l'alvéole. Le bouchon d'exploitation est alors remis en place, et la hotte de transfert vide est évacuée pour positionner la hotte spécifique du robot pousseur. La hotte robot pousseur retire alors le bouchon d'exploitation afin de pousser le colis de stockage dans l'alvéole. Le bouchon d'exploitation est enfin remis en place.

Pour le retrait de colis de stockage, examiné au chapitre 7.2.4, l'Andra prévoit [39][42] un robot de retrait, transporté dans la hotte, tous deux présentés en Figure 42.

### Flux d'air dans l'installation souterraine

Le principe de la ventilation de l'installation souterraine n'a pas évolué depuis le dossier « Maîtrise des risques en exploitation » (Figure 43). L'Andra précise [55] cependant que l'air sera contrôlé de manière à maintenir une hygrométrie inférieure à 60 % (jusqu'à 70 % dans les alvéoles MAVL).

L'alimentation en air frais de l'installation souterraine se fait *via* un plénum<sup>7</sup> situé au niveau du puits de transfert du personnel en zone d'exploitation puis l'air est réparti dans les différentes zones de l'installation.

L'air frais arrive en pleine section dans les galeries de liaison et d'accès. Des trappes aux extrémités des galeries permettent d'évacuer l'air vicié *via* un carneau<sup>8</sup> situé en partie supérieure des galeries. Cet air est ensuite dirigé vers le puits de retour d'air.

Dans la zone de stockage MAVL, l'air traverse les alvéoles MAVL et est dirigé vers un étage de filtration THE avant d'être évacué dans une gaine dédiée au sein de la galerie de retour d'air et dirigé vers le puits de retour d'air.

Le dimensionnement de la ventilation de l'installation souterraine vis-à-vis des risques de dissémination de substances radioactives est présenté au chapitre 7.1.2, la conduite de la ventilation en situation d'incendie est quant à elle examinée au chapitre 7.2.1.

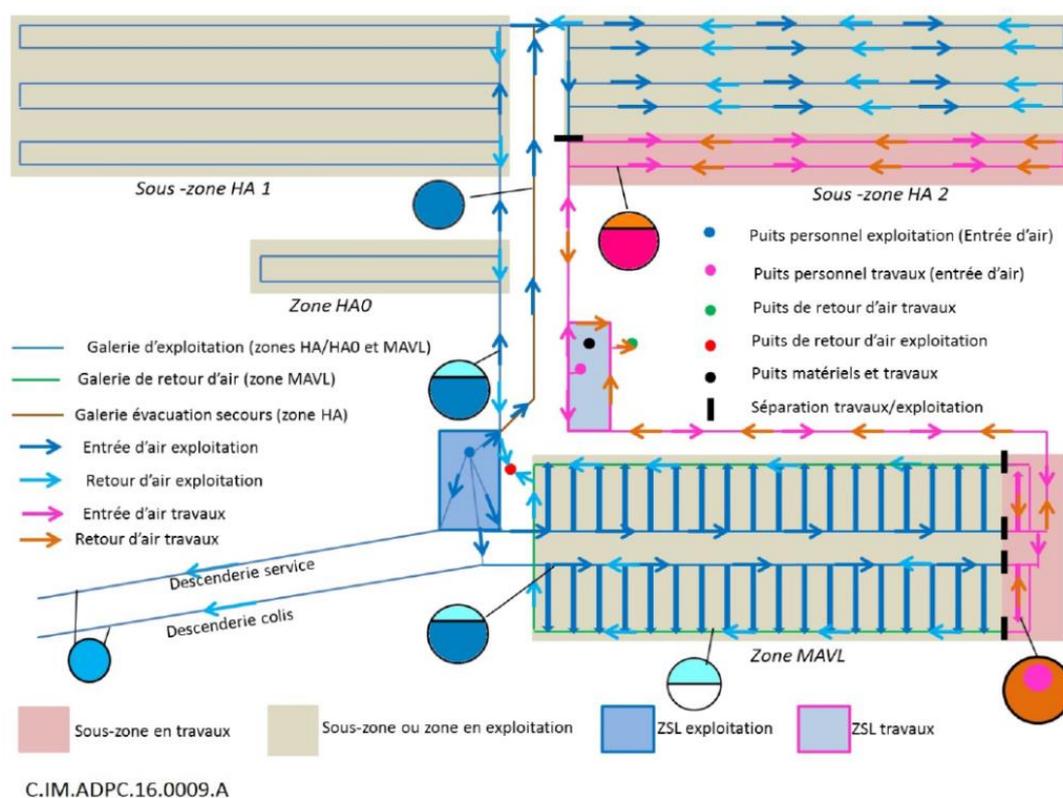


Figure 43 : Schéma de principe de la ventilation de l'installation souterraine [39]

<sup>7</sup> Plénum : gaine en béton permettant le soufflage d'air

<sup>8</sup> Carneau : gaine en béton permettant l'extraction d'air

### 2.6.4 SEPARATION DES PROCÉDES « EXPLOITATION » ET « TRAVAUX »

Au stade du DOS, l'Andra retient [39], comme dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », le principe de séparation physique entre les zones d'exploitation de l'installation souterraine (transfert des colis, mise en stockage...) et de travaux (creusement, construction des alvéoles...). L'Andra retient toujours différentes phases de développement de l'installation souterraine (Figure 44).

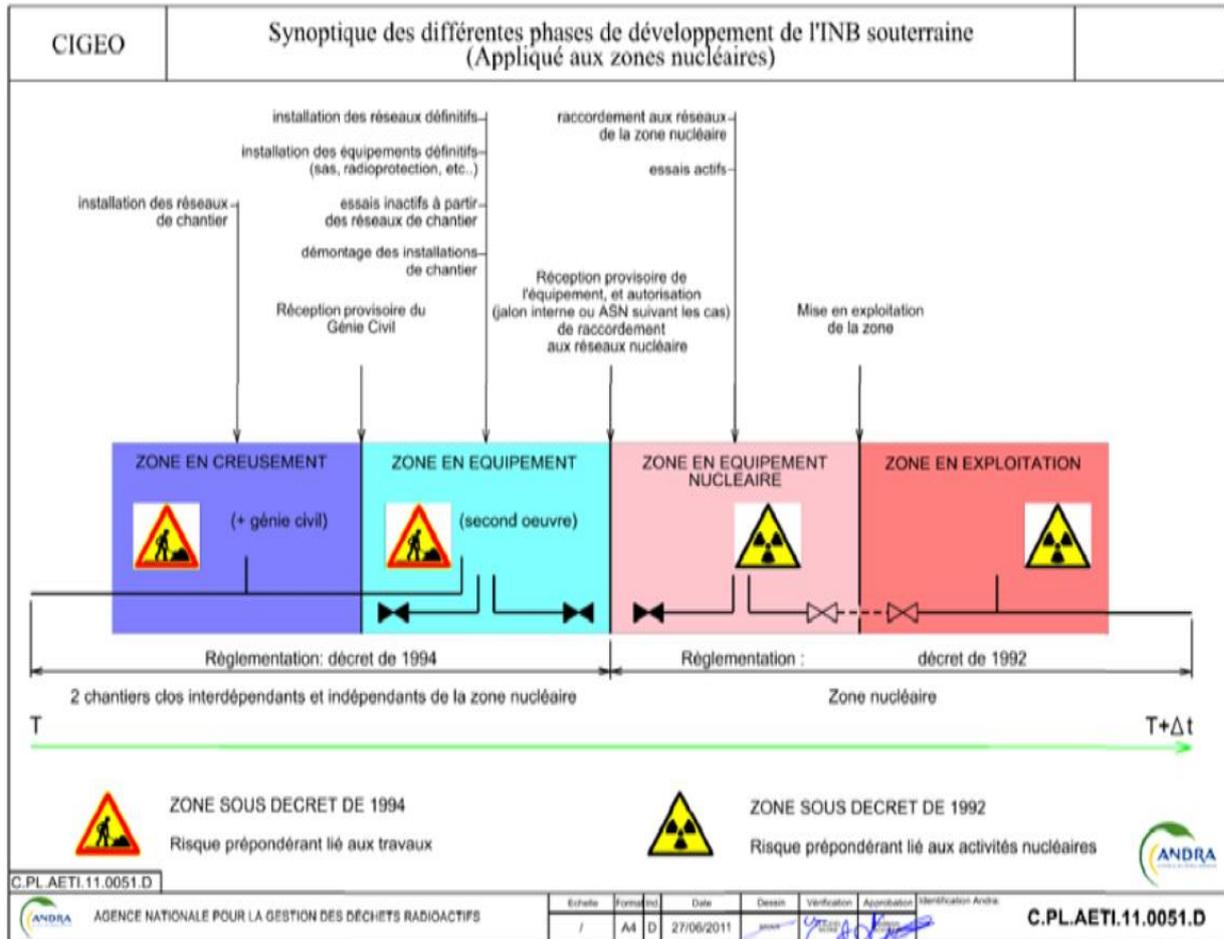


Figure 44 : Principe de développement de l'installation souterraine [98]

Dans la zone travaux, une fois le creusement et le génie civil terminés (zone en creusement), les équipements sont installés (zone en équipement). La portion d'installation passe alors dans la zone nucléaire où l'Andra prévoit le raccordement aux réseaux de la zone nucléaire puis les essais en actifs (zone en équipement nucléaire) avant que la portion passe en « zone en exploitation ».

Ainsi, dans le quartier de stockage MAVL, l'Andra retient [39] le principe d'un déploiement « chassant ». Les alvéoles sont construits puis exploités en s'éloignant de la ZSL Exploitation (Figure 45).

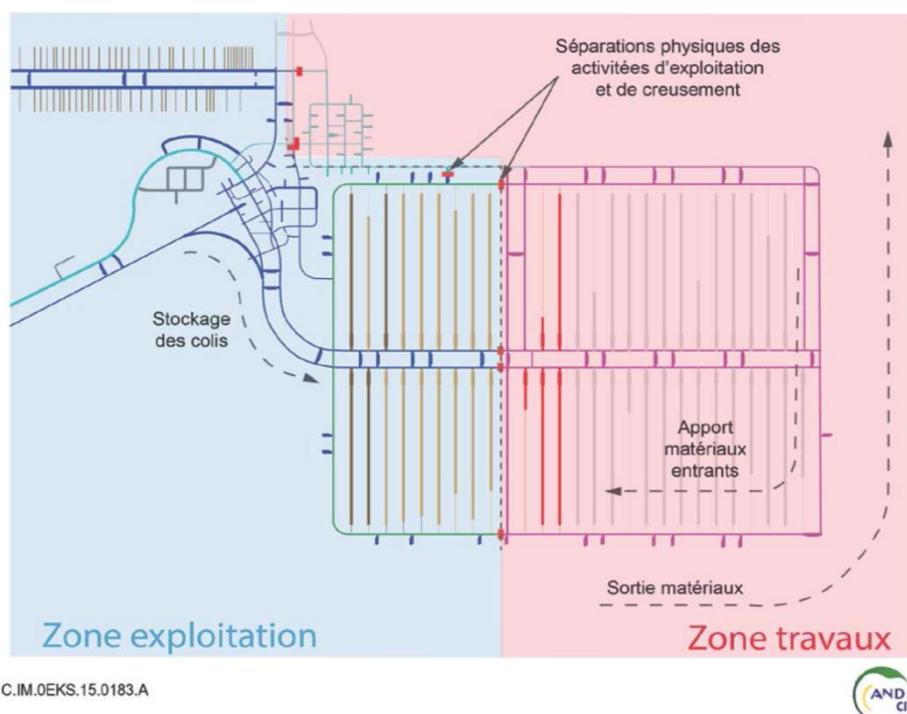


Figure 45 : Principe de séparation des activités dans le quartier de stockage MAVL [39]

Dans la zone de stockage HA, l'Andra retient également un déploiement de type « chassant » (c'est-à-dire en s'éloignant des ZSL, vers le Nord) pour les trois premiers quartiers situés côté Ouest puis « rabattant » pour les trois derniers (c'est-à-dire en revenant vers les ZSL).

Pour les galeries en configuration bitube (galeries de liaison MAVL, HA0, HA1/HA2, galeries d'accès HA0 et HA1/HA2), les séparations exploitation/travaux présentent également un sas pour le personnel par lequel, « seuls les services de secours sont en mesure d'accéder aux galeries d'exploitation depuis une galerie en zone travaux ou d'évacuation de secours » (cf. haut de la Figure 46).

Pour les galeries en configuration monotube (galeries de retour d'air Sud et Nord du quartier de stockage MAVL), l'interface exploitation/travaux est matérialisée par un sas d'accès personnel par lequel un véhicule de secours peut accéder à la zone d'exploitation depuis la zone travaux (cf. bas de la Figure 46).

Ces sas ne sont donc empruntés que par les services de secours en situation accidentelle ; le matériel et le personnel pour la zone travaux sont acheminés par les puits travaux dédiés (respectivement « 4 » et « 3 » sur la Figure 7) ; le matériel et le personnel pour la zone exploitation par le puits dédié (« 1 » sur la Figure 7) et la descendrie service (Figure 6).

Les risques de coactivité sont examinés au chapitre 7.2.7.

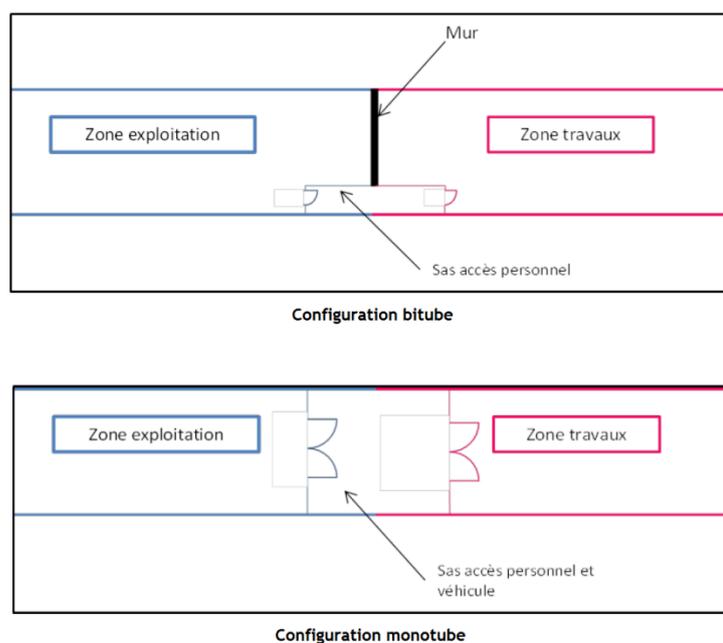


Figure 46 : Principe de séparation physique dans les galeries [39]. Les sas ne sont empruntés que par les services de secours en situation accidentelle, uniquement en cas de besoin.

## 2.7 ADAPTABILITE DE CIGEO A UNE EVOLUTION DE L'INVENTAIRE (RESERVES ET COMBUSTIBLES USES)

Conformément à la demande de l'ASN, l'Andra a adjoint au DOS des éléments relatifs à l'adaptabilité de Cigéo à une évolution de l'inventaire des déchets. Celle-ci prend en compte d'une part un inventaire dit « en réserve », d'autre part la possibilité de stocker directement des CU, sans retraitement.

### 2.7.1 COLIS DE STOCKAGE DES DECHETS EN RESERVES ET DES COMBUSTIBLES USES

#### 2.7.1.1 Déchets en réserves

Le PIGD prévoyait en 2012 un inventaire de déchets dits « en réserve » composé de [48] :

- déchets de faible activité à vie longue (FAVL), à savoir (i) les déchets de graphite issus principalement du fonctionnement et du démantèlement des réacteurs de première génération (UNGG) d'Electricité De France (EDF) et du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives (CEA), (ii) les déchets issus du retraitement des combustibles UNGG, (iii) les résines échangeuses d'ions qui pourraient être produites par le démantèlement sous eau de certains de ces réacteurs, (iv) les enrobés bitumineux entreposés sur le site de Marcoule que le CEA considère comme relevant de la catégorie FAVL et (v) les déchets particuliers de « petits producteurs » (i.e. autres qu'AREVA, EDF et le CEA) et du « nucléaire diffus »<sup>9</sup>,
- déchets HA et MAVL qui seraient issus d'un réacteur à eau pressurisée (REP) supplémentaire (autre que Flammanville) de type EPR.

<sup>9</sup> tels que des sources de détecteurs ioniques, des paratonnerres compactés et des déchets de la Défense nationale.

Cet inventaire est détaillé et examiné par l'IRSN au chapitre 3.5.

Les conteneurs de stockage considérés pour les déchets **FAVL** (de type CS4, CS2-1, CS5.3 et CS5 utilisés pour les déchets **MAVL** de l'inventaire de référence), sont fonction du type de déchet envisagé [48]. Pour le cas particulier des déchets de graphite, l'Andra retient des conteneurs de stockage de type CS4 dans lesquels les déchets seraient placés directement, sans conteneur primaire, à l'aide d'un panier (cf. Figure 47),

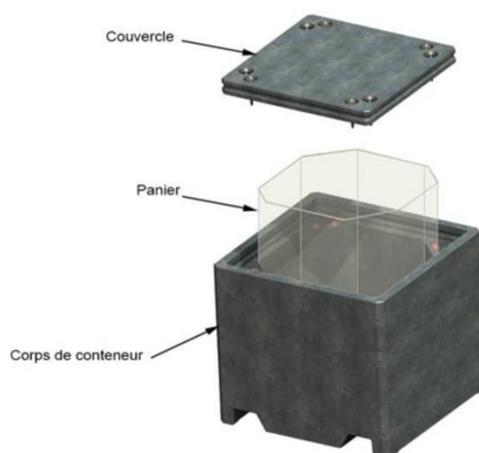


Figure 47 : Conteneur de stockage CS4 retenu pour les déchets de graphite [48]

S'agissant des déchets **HA** et **MAVL** qui seraient issus d'un réacteur supplémentaire de type **EPR**, l'Andra indique [48] que les déchets de structure **MAVL** et les déchets **HA** seraient conditionnés dans des conteneurs de stockage tels que prévus pour les CSD-C et les colis **HA** de l'inventaire de référence de **Cigéo**. Les déchets activés et de démantèlement **MAVL**, à l'instar des résines échangeuses d'ions **FAVL**, seraient conditionnés en C1PG et placés dans des conteneurs de stockage de type CS5.3.

### 2.7.1.2 Combustibles usés

Les combustibles usés pris en compte dans l'étude de l'adaptabilité de **Cigéo** [47] sont issus des **REP** et du réacteur à neutrons rapides (**RNR**) d'**EDF**. Il s'agit de combustibles à base d'oxyde d'uranium (**UOX**), d'oxydes d'uranium issus du retraitement (**URE**) ou d'oxydes mixtes d'uranium et de plutonium (**MOX**). Ces combustibles présentent des variabilités en termes (i) d'enrichissement en  $^{235}\text{U}$  (enrichissements initiaux entre 3,7 % et 4,5 %), (ii) de taux de combustion suivant leur historique d'irradiation (entre 25 GWj/tML<sup>10</sup> et 55 GMj/tML en moyenne) et (iii) de dimensions des assemblages.

Les inventaires possibles de ces combustibles usés sont présentés et examinés par l'IRSN au chapitre 3.6.

L'Andra envisageait, au stade du « Dossier 2005 », la possibilité de recevoir les assemblages de combustibles usés nus sur le site de stockage. Au stade du **DOS**, l'Andra indique [47] qu'elle n'a pas reconduit cette option et considère que les assemblages combustibles arriveraient conditionnés dans des étuis métalliques cylindriques à raison d'un assemblage par étui, l'ensemble « étui + assemblage » constituant le colis primaire de combustible usé. Les colis primaires seraient placés, comme le conteneur de stockage **HA**, dans des conteneurs de stockage étanches en acier forgé non allié, d'épaisseur comprise entre 53 et 65 mm (cf. chapitre 2.3.1).

<sup>10</sup> GWj/tML : Gigawatt jour par tonne de métal lourd

L'Andra retient [47] deux options de conception pour les conteneurs de stockage :

- un conteneur de stockage mono-assemblage destiné à recevoir un seul colis primaire, avec un diamètre hors tout de 470 mm ou 350 mm selon l'assemblage considéré et une longueur hors tout de 4 475 mm pour les assemblages courts et de 5 225 mm pour les assemblages longs ainsi qu'une masse de 3 à 5 t,
- un conteneur de stockage multi-assemblages permettant de regrouper quatre colis primaires, avec un diamètre de 1 165 mm et une longueur hors tout de 4 500 mm pour les assemblages courts et de 5 250 mm pour les assemblages longs ainsi qu'une masse de 27 à 32 t.

Elle précise [47] que les deux options sont retenues pour les combustibles **UOX** et **URE** 100 % irradiés mais que seul le conteneur de stockage mono-assemblage est retenu pour les combustibles **MOX** et les combustibles **UOX** et **URE** sous-irradiés.

## 2.7.2 ADAPTABILITE DE L'ARCHITECTURE DE CIGEO AUX DECHETS EN RESERVES

### Installations de surface

L'Andra indique [48] que les déchets en réserves seraient pour une grande part livrés sous la forme de colis primaires dont les principales caractéristiques (géométrie, masse, débit maximal d'équivalent de dose) seraient identiques à celles d'autres colis de déchets. Aussi, l'Andra estime que l'adaptation de l'installation de surface de la zone descendrière consisterait essentiellement en la mise en place d'équipements mécaniques adaptés à la réception des colis de stockage des déchets issus du retraitement de combustibles **UNGG**, en particulier pour le déchargement des emballages de transport. L'Andra précise que le stockage des colis de déchets en réserves serait réalisé sans accroissement notable des flux.

S'agissant de l'installation de surface de la zone puits, l'Andra [48] identifie une légère augmentation du volume des verses à déblais, conséquence du creusement d'alvéoles de stockage supplémentaires (cf. ci-dessous).

### Transfert des colis de stockage depuis la surface jusqu'aux alvéoles

L'Andra indique [48] que les caractéristiques des colis de stockage des déchets en réserves sont compatibles avec celles prises en compte pour dimensionner **Cigéo**, aussi, la prise en charge de ces colis par les équipements de transfert ne nécessite pas d'adaptation.

### Installation souterraine

L'Andra indique [48] que les déchets en réserves seraient stockés dans des alvéoles de stockage identiques à ceux prévus pour les déchets de l'inventaire de **Cigéo**. Elle précise que l'accueil de ces colis de stockage se ferait en priorité en augmentant la capacité des alvéoles de mêmes caractéristiques dont la longueur utile ne serait pas totalement utilisée puis en créant de nouvelles alvéoles, tout en respectant les règles fixées en terme de compatibilité physico-chimique des colis de déchets co-stockés. L'Andra envisage ainsi la création de 9 alvéoles **MAVL** et 36 alvéoles **HA** supplémentaires. Elle précise que ceci s'accompagnerait d'un allongement des galeries d'accès et, dans le cas du quartier de stockage **MAVL**, des galeries de retour d'air (Figure 48).

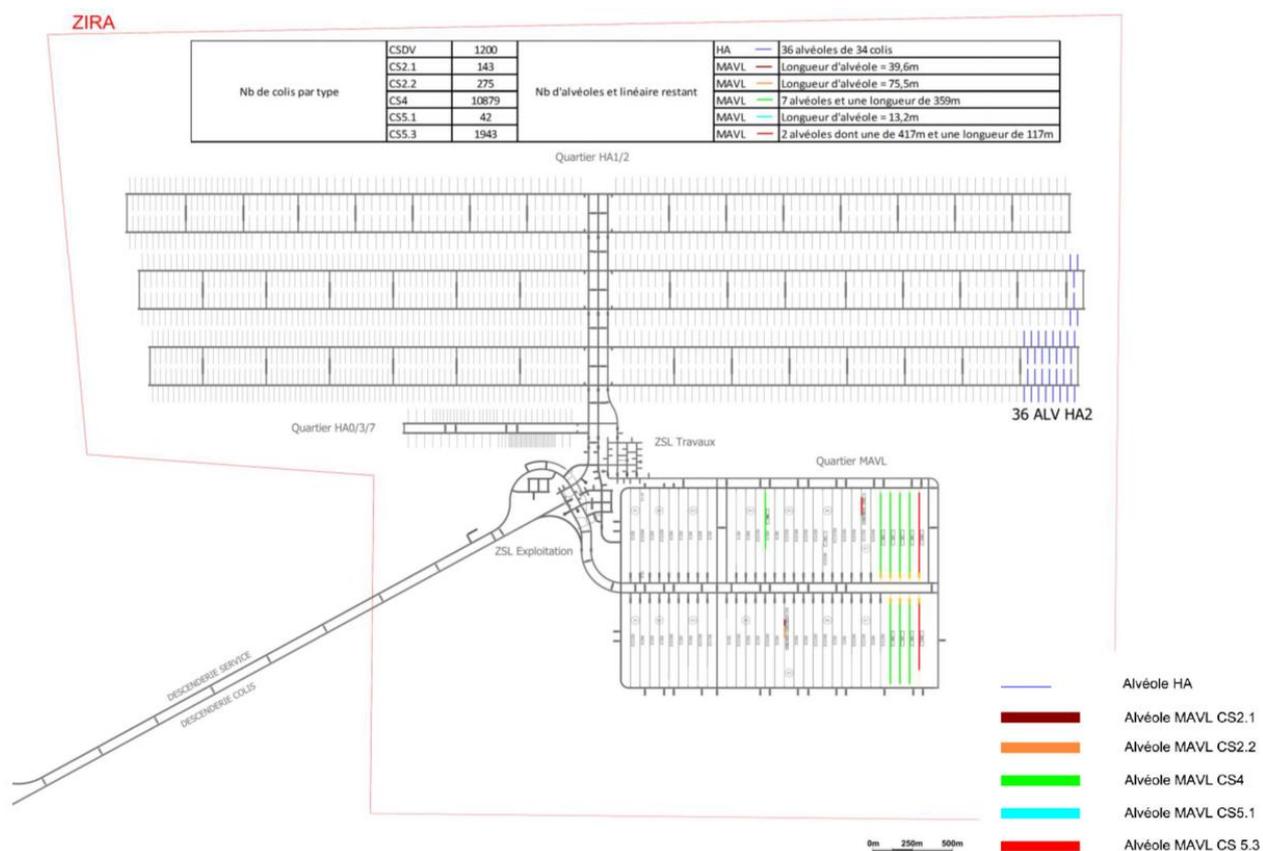


Figure 48 : Installation souterraine avec stockage des déchets en réserves [48]

### 2.7.3 ADAPTABILITE DE L'ARCHITECTURE DE CIGEO AUX COMBUSTIBLES USES

#### Installations de surface

L'Andra indique [47] que les colis primaires de combustibles usés seraient reçus sur l'installation de surface EP2, prévue à partir d'environ 2070 (cf. chapitre 2.2.1.2). L'Andra décrit les procédés qui seraient alors mis en œuvre dans cette installation dans le cas où elle accueillerait des combustibles usés.

S'agissant de l'installation de surface de la zone puits, l'Andra [47] identifie, tout comme pour les déchets « en réserve », une augmentation du volume des verses à déblais, conséquence du creusement d'alvéoles de stockage supplémentaires.

#### Transfert des colis de stockage jusqu'à leurs alvéoles

L'Andra indique [47] qu'elle a retenu deux hottes de transfert, une pour les colis de stockage multi-assemblages et l'autre pour les colis de stockage mono-assemblage. Ces hottes comporteraient un système d'adaptation interne pour compenser d'une part, pour les deux hottes, les différences de longueur des colis de stockage et d'autre part, pour la hotte de transfert des colis de stockage mono-assemblage, les différences de diamètre des colis. L'Andra retient, pour l'évaluation de l'adaptabilité de Cigéo au stockage des combustibles usés, la hotte de transfert de colis de stockage multi-assemblages, celle-ci présentant les dimensions les plus importantes et donc les plus contraignantes (Figure 49) et, notamment une longueur de près de 7,90 m.

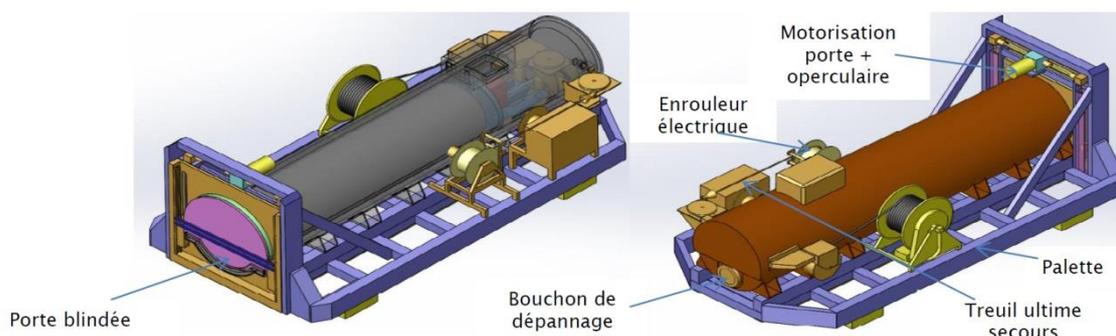


Figure 49 : Hotte blindée de transfert de colis de stockage multi-assemblages [47]

L'Andra indique [47] que le gabarit des hottes de transfert des combustibles est compatible avec le dimensionnement de la descenderie colis actuellement retenu (Figure 50). L'Andra précise que la masse des hottes de transfert des colis de stockage, de 64 tonnes à vide, est compatible avec la charge utile du funiculaire actuellement à l'étude (cf. chapitre 2.6.2) ; néanmoins elle identifie que les dimensions de ces hottes pourraient générer une répartition d'efforts différente sur la structure du véhicule du funiculaire et indique que le dimensionnement du véhicule sera vérifié afin d'identifier, le cas échéant, les compléments à apporter « dans une phase ultérieure ».

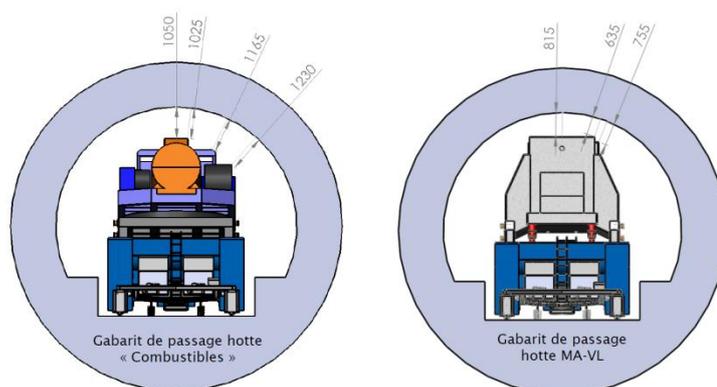


Figure 50 : Coupe transversale des gabarits de passage des hottes de transfert combustibles et MAVL dans la descenderie [47]

Pour ce qui concerne la gare basse de la descenderie colis et les intersections au niveau de la ZSL Exploitation, l'Andra indique [47] qu'au stade du DOS, les dimensions importantes de la hotte de transfert nécessiteraient un chariot adéquat, de longueur 9 200 mm, en tout état de cause de dimensions supérieures à celles prises en compte pour le dimensionnement de l'installation. Elle précise que garder le même processus de transfert que celui des colis HA pour les changements de direction (*i.e.* faire tourner le chariot et la hotte) nécessiterait « la réalisation de carrefours de dimensions très importantes, voire non réalisables ». Néanmoins, l'Andra précise que le pivotement de la hotte seule (sans chariot) est compatible avec les dimensions actuellement retenues et que cette option nécessiterait d'adapter le processus de transfert des colis prévu pour les colis HA. Les dimensions des galeries de liaison de la ZSL Exploitation et des quartiers de stockage sont également compatibles avec le transfert de telles hottes (marge de 50 cm environ).

En revanche, l'Andra indique [47] que les hottes devraient circuler dans les galeries d'accès aux alvéoles pour venir se positionner face aux alvéoles sans rotation, ce qui nécessite une adaptation du diamètre de ces galeries en portant sa valeur utile à près de 11,3 mètres (14 m excavés). A titre de comparaison, les galeries HA telles que prévues (cf. chapitre 2.2.3.2) ont un diamètre utile de l'ordre de 8 mètres.

### Architecture de l'installation souterraine

L'Andra indique [47] que plusieurs schémas possibles d'architecture souterraine (dont un présenté en Figure 51) comportant des quartiers de stockage de combustibles ont été élaborés en faisant varier différents paramètres, comme le type de colis de stockage, la longueur des alvéoles de stockage et les hypothèses de dimensionnement thermo-hydrromécanique (THM).

L'Andra indique [47] que le stockage des combustibles usés diminuerait le nombre d'alvéoles MAVL de 2 à 3 unités et ferait passer le nombre de quartiers de stockage des déchets HA1/HA2 de 6 quartiers à 3,5 ou 1,5 en fonction du scénario considéré (le volume de déchets MAVL et HA1/HA2 issus du traitement des combustibles usés étant alors nécessairement inférieur).

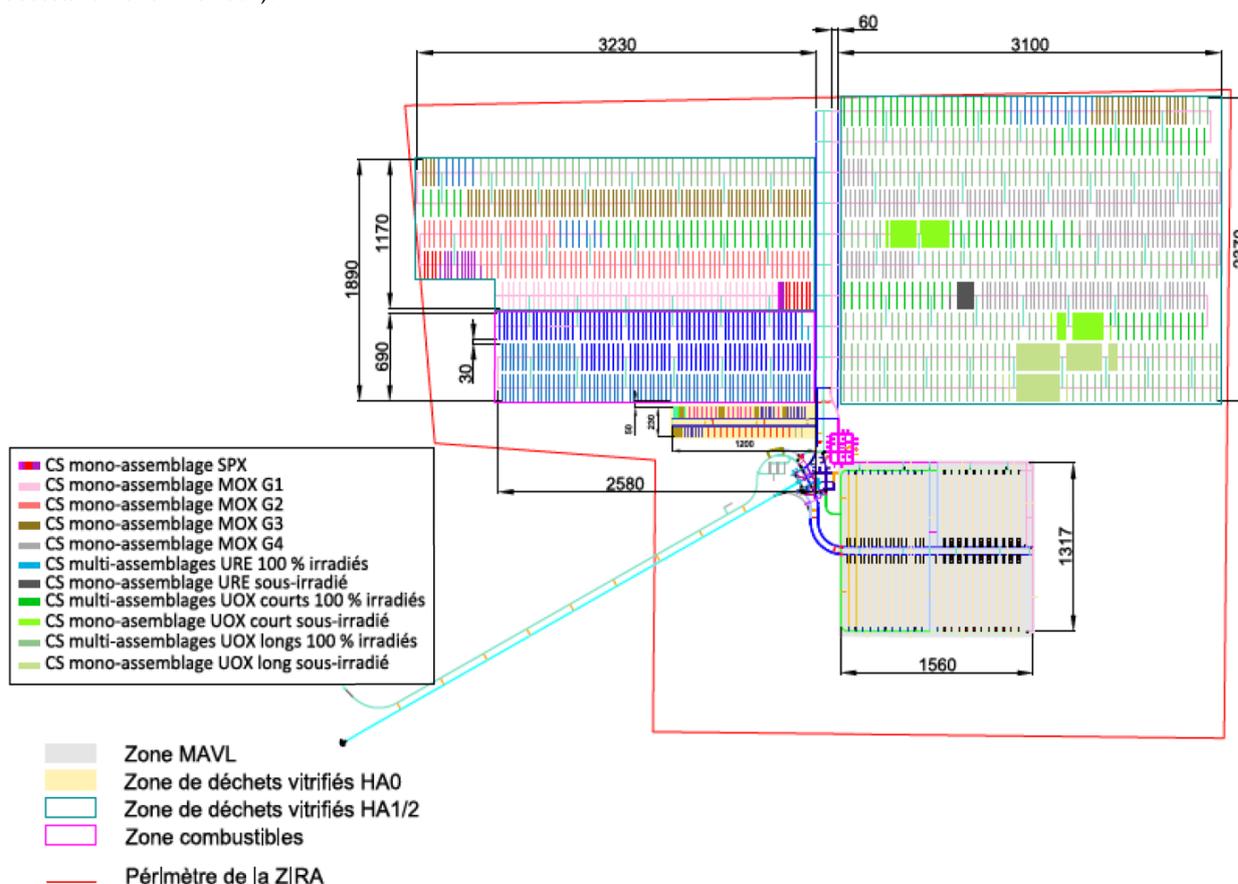


Figure 51 : Exemple d'architecture de l'installation souterraine avec stockage des combustibles usés [47]

Dans le « Dossier 2005 » l'Andra envisageait des alvéoles de stockage des combustibles usés de 40 m de long avec un tampon chimique et mécanique épais, appelé « barrière ouvragée », en argile gonflante, situé entre le colis de stockage et le milieu géologique. Au stade du DOS, l'Andra ne retient plus cette option et considère maintenant un concept d'alvéole similaire à celui des déchets HA (cf. chapitre 2.2.3.2), de diamètre adapté pour correspondre aux diamètres des colis de stockage.

## 2.8 FONCTIONS DE SURETE

Les objectifs, les principes et la démarche de sûreté présentés dans le [DOS](#) sont similaires à ceux présentés dans les « Dossier 2005 » et « Dossier 2009 ».

L'Andra indique [39] que les principaux objectifs de sûreté qui doivent orienter la conception de l'installation de stockage sont fournis par le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3] : *« la protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Elle doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques. Après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée ».*

Le principe retenu par l'Andra [39] est la mise en oeuvre dès la conception de Cigéo d'un processus et d'une démarche de sûreté qui prennent en compte la spécificité suivante des installations de stockage :

- une installation souterraine située à environ 500 m de profondeur avec des longueurs de galeries de liaisons importantes qui imposent des conditions d'exploitation, d'intervention et d'évacuation particulières ;
- une exploitation sur une durée séculaire avec un déploiement du stockage par tranches successives qui implique la prise en compte du risque lié à la coactivité de travaux souterrains et d'exploitation nucléaire ;
- une approche coordonnée entre sûreté en exploitation et sûreté après fermeture, permettant d'intégrer des évolutions de conception, notamment liées à la mise en oeuvre des pistes d'optimisations envisagées pour Cigéo, du retour d'expérience de l'exploitation, des évolutions de la réglementation et des pratiques nationales, tout en garantissant la sûreté après fermeture. Cette approche est examinée par l'IRSN au chapitre 6.1.6 du présent rapport.

L'Andra indique [98] que *« la démarche de sûreté suit un processus itératif dans lequel les analyses de risques constituent les outils assurant un traitement des données relatives à la sûreté liées à la configuration de l'installation et de son environnement pour restituer les informations indispensables à une prise de décision concernant l'acceptabilité des choix de conception et d'exploitation vis-à-vis des exigences fonctionnelles définies pour le projet Cigéo et des objectifs de sûreté fixés ».*

Les analyses de risques (examinées par l'IRSN aux chapitres 7 et 8) permettent :

- d'évaluer le caractère sûr des choix de conception retenus. Les situations incidentelles et accidentelles les plus pénalisantes sont identifiées et fournissent les critères de dimensionnement des barrières de protection à retenir au titre de la défense en profondeur,
- d'évaluer le cas échéant, au travers du processus itératif de la démarche de sûreté le « bénéfique sûreté » des dispositions de prévention et de surveillance mises en place.

L'Andra applique le concept de défense en profondeur à Cigéo conformément à l'arrêté [INB](#) du 7 février 2012 [4], en interposant entre la source de danger internes et externes à l'installation et le public, les travailleurs ou l'environnement un nombre suffisant de dispositions techniques et organisationnelles éliminant ou limitant jusqu'à un niveau acceptable les nuisances possibles liées à cette source, et en proportionnant ces dispositions à

l'importance des risques ou inconvénients présentés par l'installation. Ce concept de défense en profondeur s'applique selon les niveaux indiqués dans l'arrêté INB [4] (prévenir, détecter, maîtriser les accidents et gérer les situations post-accidentelles) et s'appuie notamment sur :

- l'identification des fonctions nécessaires à la démonstration de sûreté nucléaire (cf. chapitre suivant),
- une démarche de conception de Cigéo intégrant des marges de dimensionnement et recourant, en tant que de besoin à une redondance, une diversification et une séparation physique ou géographique adéquates des éléments importants pour la protection qui assurent des fonctions nécessaires à la démonstration de sûreté nucléaire, afin d'obtenir un haut niveau de fiabilité et garantir ces fonctions.

### 2.8.1 PHASE D'EXPLOITATION

L'Andra indique [98] que pendant la période d'exploitation et de réversibilité, la protection des personnes (travailleurs et public) et de l'environnement vis-à-vis des risques induits par la radioactivité des déchets est assurée par des fonctions de sûreté nucléaire en exploitation, applicables à Cigéo pendant toute la durée d'exploitation, dans toutes les situations incidentelles ou accidentelles d'origine interne ou externe, ou *a minima* rétablies dans des délais compatibles avec les objectifs de protection des personnes et de l'environnement retenus pour Cigéo.

Pour la phase d'exploitation, l'Andra [39] retient cinq fonctions de sûreté identiques aux dossiers précédents :

- confiner les substances radioactives, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion de ces substances ;
- protéger les personnes contre l'exposition aux rayonnements ionisants ;
- maîtriser la sûreté vis-à-vis du risque de criticité ;
- évacuer la puissance thermique des déchets ;
- évacuer les gaz formés par radiolyse afin de gérer les risques d'explosion.

Le respect de ces fonctions a un impact sur les choix de conception. Par exemple, pour respecter la fonction précitée relative au confinement, les principes suivants sont retenus :

- en fonctionnement normal, la conception des colis, des installations et des procédés d'exploitation permet de maintenir un niveau de contamination aussi faible que possible dans les installations et de limiter les rejets de substances radioactives à l'extérieur de l'installation ;
- en situations incidentelles ou accidentelles, la conception vise à limiter les conséquences radiologiques pour le personnel, le public et l'environnement en évitant le contact avec des substances et particules radioactives non confinées ; au-delà des mesures prises pour prévenir tout accident, en cas de dissémination de substances radioactives, les dispositions à retenir en termes de mitigation des conséquences consistent à confiner l'activité potentiellement relâchée au plus près de la source d'émission, de manière à contenir ou à défaut de canaliser et filtrer les éventuels rejets radioactifs.

Le respect de ces principes se traduit par des options de sûreté pour Cigéo, telles que :

- la mise en place de deux barrières de confinement indépendantes pour les situations normales de fonctionnement ;

- le maintien d'au moins une barrière de confinement pour les situations incidentelles et accidentelles de fonctionnement.

**Fonctions de sûreté des colis primaires et colis de stockage pour la phase d'exploitation**

Les fonctions de sûreté des colis primaires et des conteneurs de stockage MAVL en phase d'exploitation, selon la solution de stockage retenue (n°1 : en colis de stockage de référence, n°2 : en colis de stockage renforcé vis-à-vis du confinement, n°3 : direct, cf. chapitre 2.3.2 du présent rapport), sont rassemblées dans le Tableau 1 [39].

	Solutions de stockage n°1 et n°2		Solution de stockage n°3
	Fonctions du CP	Fonctions du CtS	Fonctions du CP
Exploitation en situation normale	Permettre la manutention lors des opérations en surface	Permettre la manutention lors des opérations de mise en stockage ou d'éventuel retrait	Permettre la manutention lors des opérations en surface, de mise en stockage ou d'éventuel retrait
	Limiter la contamination surfacique		Limiter la contamination surfacique
	Assurer le confinement des substances radioactives non gazeuses (première barrière de confinement)	Solution n°1 : sans objet Solution n°2 : assurer le confinement des substances radioactives non gazeuses (deuxième barrière de confinement)	Assurer le confinement des substances radioactives non gazeuses
	Assurer la maîtrise du risque de criticité	Assurer la maîtrise du risque de criticité	Assurer la maîtrise du risque de criticité
	Limiter la production de gaz de radiolyse	Permettre l'évacuation des gaz émis par le colis primaire	Limiter la production de gaz de radiolyse
	Limiter la puissance thermique		Limiter la puissance thermique
	Limiter le débit de dose		Limiter le débit de dose
	Permettre l'identification du colis primaire	Permettre l'identification du colis de stockage	Permettre l'identification du colis de stockage
En situation incidentelle et accidentelle d'incendie et de choc	Permettre l'identification du colis primaire	Permettre le gerbage des colis de stockage	Permettre le gerbage des colis de stockage
	Protéger le colis primaire des sollicitations thermiques et mécaniques. Atténuer la dispersion des particules et aérosols le cas échéant.		Protéger le colis primaire des sollicitations thermiques et mécaniques. Atténuer la dispersion des particules et aérosols le cas échéant.
	Protéger le colis primaire des sollicitations thermiques et mécaniques. Atténuer la dispersion des particules et aérosols le cas échéant.	Préserver la fonction de manutention	Préserver la fonction de manutention
	Préserver la fonction maîtrise du risque de criticité	Préserver la fonction maîtrise du risque de criticité	Préserver la fonction maîtrise du risque de criticité

Tableau 1 : Fonctions du colis de stockage MAVL en phase d'exploitation [39]

Les fonctions des colis primaires et des conteneurs de stockage HA en phase d'exploitation [39] sont rassemblées dans le Tableau 2.

	Fonctions du CP	Fonctions du CtS
En situation normale	Permettre la manutention lors des opérations en surface	Permettre la manutention lors des opérations de mise en stockage ou d'éventuel retrait
	limiter la contamination surfacique	
	Assurer le confinement des substances radioactives (première barrière de confinement)	Assurer le confinement des substances radioactives (deuxième barrière de confinement)
	Assurer la maîtrise du risque de criticité	Assurer la maîtrise du risque de criticité
	limiter la puissance thermique	
	limiter le débit de dose	limiter le débit de dose
	Assurer l'étanchéité aux gaz	Assurer l'étanchéité aux gaz
		Protéger le verre d'une augmentation de température pendant la constitution du colis de stockage
	Permettre l'identification du colis primaire	Permettre l'identification du colis de stockage
En situation incidentelle et accidentelle d'incendie et de choc	limiter la dispersion des substances radioactives	limiter la dispersion des substances radioactives en cas de perte de la première barrière de confinement
		Préserver la fonction de manutention
	Préserver la fonction maîtrise du risque de criticité	Préserver la fonction maîtrise du risque de criticité

Tableau 2 : Fonctions du colis de stockage HA en phase d'exploitation [39]

## 2.8.2 PHASE APRES FERMETURE

L'Andra [40] définit les fonctions de sûreté après fermeture suivantes, identiques à celles définies dans les dossiers précédents :

- isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines ; cette fonction est assurée par le site et la profondeur d'implantation retenus ;
- limiter le transfert jusqu'à la biosphère des substances radioactives et toxiques chimiques contenus dans les déchets, qui est déclinée en trois fonctions de sûreté :
  - s'opposer à la circulation d'eau :
    - limiter le flux d'eau provenant de la formation hôte ;
    - limiter les flux d'eau entre le stockage et les formations sus-jacentes (via les liaisons surface-fond) ;
    - limiter les vitesses de circulation de l'eau au sein du stockage.

Les composants participant à la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » sont ceux constituant les tronçons de galeries (y compris la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, notamment de par ses propriétés hydrauliques) et de liaisons surface-fond dans les formations encaissantes destinés à accueillir un scellement. De chaque fonction de sûreté, l'Andra retient des principes généraux en termes de choix du site et d'options de conception de Cigéo, ainsi que de construction et d'exploitation. Par exemple, les principes suivants répondent à la fonction de sûreté « s'opposer à la circulation d'eau » :

- un faible écoulement d'eau dans le Callovo-Oxfordien du fait de sa faible perméabilité et d'un faible gradient de charge hydraulique dans la ZIRA ;
- une localisation du système de stockage dans une zone située à l'écart des structures géologiques (potentiellement) hydrauliquement actives ;
- un regroupement et scellement des liaisons surface-fond ;
- des quartiers de stockage « borgnes » par rapport au reste de l'installation souterraine...
  - o Limiter le relâchement des substances radioactives et des toxiques chimiques, et les immobiliser dans le stockage, déclinée en :
    - protéger les déchets de l'eau ;
    - limiter la mise en solution des radionucléides et des éléments toxiques chimiques ;
    - limiter la mobilité des radionucléides.

Les composants participant à la fonction « limiter le relâchement des substances radioactives... » sont ceux des alvéoles de stockage MAVL et des alvéoles HA et colis de stockage HA, y compris la formation argileuse du Callovo-Oxfordien (notamment de par ses propriétés chimiques).

- o Retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques qui auraient été relâchés hors des colis puis des alvéoles de stockage, déclinée en :
  - retarder et atténuer le flux longitudinal de radionucléides relâchés dans les ouvrages ;
  - retarder et atténuer la migration de radionucléides dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien ;
  - préserver la capacité naturelle de dispersion et de dilution des formations encaissantes.

Les composants participant à la fonction « retarder et atténuer la migration des substances radioactives... » sont les alvéoles de stockage MAVL, les alvéoles de stockage HA, les galeries et le milieu géologique. A cet égard, l'Andra précise tirer profit « *autant que possible de la capacité naturelle de dispersion et de dilution des formations encaissantes du Callovo-Oxfordien, bien qu'elles ne relèvent pas du système de stockage* ».

L'Andra identifie par ailleurs un objectif de « *préserver les propriétés favorables des argilites* », qui est transverse à toutes ces fonctions de sûreté.

Enfin, l'Andra fixe également un objectif de maîtriser le risque de criticité lié à la présence d'isotopes fissiles dans les déchets.

Aucune fonction n'est attribuée par l'Andra au conteneur des colis primaires MAVL et HA après fermeture. En revanche, les déchets ainsi que l'éventuelle matrice peuvent contribuer à la fonction « *limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage* ». Le conteneur de stockage des déchets MAVL ne se voit attribuer par l'Andra aucune fonction de sûreté après fermeture du stockage. Le conteneur de stockage HA a, quant à lui, pour fonction après fermeture d'empêcher l'arrivée de l'eau au contact des déchets vitrifiés tant que l'activité liée aux radionucléides de courte période n'a pas suffisamment décré et que la température à cœur du verre est supérieure à 50°C pour les colis de déchets HA0 moyennement exothermiques livrés avant 2075 et 70°C pour les colis de déchets HA1/HA2 fortement exothermiques livrés au-delà de 2075 (cf. chapitre 5.1.7). Le

comportement à long terme des colis et leurs fonctions de sûreté, ainsi que les performances associées, sont examinés par l'IRSN respectivement aux chapitres 5.1 et 7.

### **2.8.3 INTEGRATION DANS L'EVALUATION DE SURETE**

A l'ensemble des fonctions de sûreté en exploitation et après fermeture sont associées des exigences, rassemblées dans le document « Exigences applicables » [55], qui tient compte des textes réglementaires et des guides de sûreté, des éventuelles recommandations exprimées par les parties prenantes et de l'expérience acquise par l'Andra, notamment en tant qu'exploitant et dans le Laboratoire souterrain.

Conformément au Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3], l'Andra structure l'évaluation de sûreté autour de trois objectifs :

- la vérification du caractère favorable pour la sûreté, des performances des composants du système de stockage censés participer aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvragés, Callovo-Oxfordien), puis dans leur ensemble, en appréciant le rôle complémentaire de ces composants ;
- l'évaluation des perturbations apportées dans le système de stockage par les interactions entre ses différents composants et l'estimation des conséquences de ces perturbations sur la réalisation des fonctions de sûreté, compte tenu des dispositions préventives et palliatives retenues dans la conception du système de stockage pour minimiser ces perturbations ou leurs effets ;
- la modélisation du comportement dans le temps du système de stockage pour un jeu de scénarios, ainsi que l'estimation des impacts associés à chacun de ces scénarios.

La vérification des performances des composants du système de stockage est analysée dans les chapitres 3 et 4 ci-dessous, relatifs respectivement aux connaissances sur les colis de déchets et au site de [MHM](#) : l'IRSN y examine si l'état des connaissances présenté justifie les performances attribuées par l'Andra aux composants du stockage. L'évaluation des perturbations sur ces composants est analysée dans le chapitre 5, forte de la même approche. Enfin, les chapitres 6, 7 et 8 développent l'examen par l'IRSN de la démarche de sûreté, de l'évaluation de la sûreté du stockage en exploitation puis de celle après fermeture.



## 3 INVENTAIRE DES COLIS DE DECHETS

### 3.1 INVENTAIRE DES COLIS

Au stade du **DOS**, l'inventaire prévisionnel des colis de déchets à stocker est présenté dans le Programme industriel de gestion des déchets à l'indice D ; il est intitulé ci-après « **PIGD-D** » [162]. Une première version du **PIGD** à l'indice A (**PIGD-A**), a été établie en janvier 2012 [161] et examinée en vue de la réunion du **GPD** du 5 février 2013, consacrée à l'examen des « Etudes remises depuis 2009 ». L'inventaire prévisionnel des colis primaires de déchets à stocker est défini conjointement par AREVA, le **CEA** et **EDF**, en liaison avec l'Andra, à partir d'un scénario industriel de référence établi pour l'exploitation des installations nucléaires et d'hypothèses de production et de conditionnement relatives aux colis de déchets à produire. Afin de chiffrer les quantités de déchets relevant d'un stockage dans **Cigéo**, un inventaire des déchets produits jusqu'en 2010 et une estimation de ceux à produire après cette période ont été établis par les principaux producteurs (AREVA, **EDF** et le **CEA**). L'inventaire du **PIGD-D** correspond au nombre et au volume industriel des colis primaires sortant des installations de production et de conditionnement. Cet inventaire est organisé selon différentes familles de colis primaires de déchets qui se distinguent par leur contenu chimique et radiologique, leurs niveaux de puissance thermique et d'irradiation, leur nature (compactés, cimentés, bitumés...) et la géométrie de leur conteneur primaire. L'identification des familles de colis de déchets, conditionnés ou non, s'effectue dans le cadre des relations entre l'Andra et les producteurs de déchets [163]. Le **PIGD-D** dénombre 98 familles de colis primaires de déchets. Par ailleurs, l'inventaire du **PIGD-D** [162] :

- comporte des marges, afin de prendre en compte des incertitudes sur le volume de déchets futurs à produire ou de déchets anciens à reprendre, sur les modalités de conditionnement et sur les caractéristiques des déchets et des colis, tout en restant à l'intérieur du périmètre défini pour le scénario industriel en matière d'installations, de durées d'exploitation des installations et de filières de gestion des déchets. Les marges sont examinées par l'IRSN au chapitre 3.1.4 ;
- est associé à des réserves, afin de prendre en compte des incertitudes sur les stratégies industrielles ou sur la mise en place de nouvelles filières de stockage de déchets **FAVL**. Ces éléments sont examinés par l'IRSN au chapitre 3.5.

L'inventaire margé, établi en nombre et en volume prévisionnel de colis primaires de déchets **HA** et **MAVL** à stocker [162], figurant dans l'inventaire du **PIGD-D**, est rappelé dans le Tableau 3 ci-après. L'inventaire par famille élémentaire de colis de déchets **HA** et **MAVL** est décrit en Annexe T2 du présent rapport.

Catégorie de déchets	Nombre de colis primaires	Volume en m <sup>3</sup>
<b>HA</b>	56 033	10 072
<b>MAVL</b>	175 981	73 609

Tableau 3 : Inventaire des colis primaires de déchets **HA** et **MAVL** du **PIGD-D** [162]

Le volume des colis primaires de déchets correspond au volume :

- des déchets conditionnés sortant des installations de production ;
- estimé pour les déchets futurs ou anciens à conditionner.

Compte tenu de l'inventaire des colis du PIGD-D [162], de leur distribution dans les conteneurs de stockage ainsi que de la géométrie retenue à ce stade pour ces conteneurs de stockage, l'IRSN estime le volume de colis de stockage à environ 400 000 m<sup>3</sup> pour les déchets MAVL et à 22 500 m<sup>3</sup> pour les déchets HA.

### 3.1.1 EVOLUTIONS PAR RAPPORT AU PIGD INDICE A

L'inventaire du PIGD-D diffère peu de celui présenté à l'indice A dans la mesure où la méthode d'élaboration et les principales hypothèses retenues restent les mêmes. En effet, le scénario d'exploitation associé à l'inventaire du PIGD-A a été reconduit dans l'établissement de l'inventaire du PIGD-D ; ce scénario, dit scénario industriel 2011 ou « SI 2011 », est rappelé dans le chapitre 3.1.2 suivant. Le Tableau 4 ci-dessous permet une comparaison globale des inventaires précités. Il montre en particulier que l'inventaire du PIGD-D présente, par rapport à celui à l'indice A, peu de différences en termes de nombre et de volume de colis de déchets HA et MAVL.

Catégorie de déchets	PIGD-D		PIGD-A	
	Nombre de colis primaires	Volume en m <sup>3</sup>	Nombre de colis primaires	Volume en m <sup>3</sup>
HA	56 033	10 072	58 462	10 054
MAVL	175 981	73 609	172 476	68 577

Tableau 4 : Inventaires des colis primaires de déchets HA et MAVL du PIGD-D [162] et du PIGD-A [161]

La diminution du nombre de colis de déchets HA est liée principalement à la prise en compte du traitement des combustibles irradiés dans le réacteur EL4. En effet, le stockage direct de ces combustibles était considéré dans l'inventaire de référence du PIGD-A et le nombre de colis associé, considérés comme colis HA, était alors bien supérieur à celui qui résulterait de leur traitement. Par ailleurs, le PIGD-D prend également en compte les déchets issus du traitement des combustibles irradiés du CEA Civil et du CEA DAM, non pris en compte dans le PIGD-A. Pour ce qui concerne les colis de déchets MAVL, l'augmentation du nombre de colis est essentiellement liée, d'une part à la prise en compte des déchets de structure compactés issus du traitement des combustibles irradiés du CEA et du réacteur EL4, d'autre part à une estimation à la hausse du nombre de colis de déchets issus du fonctionnement puis de la déconstruction du réacteur ITER, des fûts d'enrobés bitumineux en cours de production à Marcoule, des fûts de type EiP contenant des déchets technologiques bloqués dans un liant hydraulique, de colis de 870 L de déchets alpha bloqués dans un liant hydraulique ou encore des colis de déchets solides d'exploitation cimentés (CBFC'-2). En outre, une diminution du nombre de colis est observée pour les déchets de structure et de démantèlement des chaînes TOP (Traitement Oxyde Pilote) et TOR (Traitement Oxyde Rapide) de l'Atelier pilote du CEA de Marcoule (APM) ainsi que pour les déchets issus des opérations de démantèlement des usines UP2-400, UP2-800 et UP3 de l'établissement AREVA de La Hague.

L'IRSN considère que la prise en compte du traitement des combustibles irradiés du CEA Civil et du CEA DAM dans le PIGD-D répond à la demande de l'ASN 2013 D1 [1] de « prendre en compte l'ensemble des stratégies industrielles aujourd'hui envisagées par les producteurs, en particulier pour ce qui concerne [...] la gestion des combustibles usés du CEA », formulée à l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 ». Il convient de rappeler que les quantités de combustibles issus des réacteurs de recherche du CEA sont évaluées à 57 tonnes de combustibles usés oxydes et 19 tonnes de combustibles usés métalliques. Ils sont destinés dans leur globalité à être traités et les matières qui les constituent (uranium et plutonium) à être recyclées par une technique spécifique mise en œuvre dans l'usine de La Hague [239]. S'agissant des combustibles oxydes, les installations opérationnelles de traitement de combustible nucléaire d'AREVA La Hague disposent d'autorisations pour leur retraitement, y compris pour les

combustibles de fort enrichissement en isotope 235. S'agissant des combustibles usés métalliques provenant des réacteurs OSIRIS, ISIS et ORPHEE, l'IRSN souligne qu'aucune campagne industrielle de traitement n'a encore eu lieu dans les usines de La Hague et que leur retraitement n'est à ce jour pas démontré ni autorisé dans ces usines. Il en est de même pour les 156 tonnes de combustibles métalliques issus de la propulsion navale. **L'IRSN souligne donc les incertitudes portant sur la faisabilité industrielle du retraitement de certains combustibles issus des réacteurs expérimentaux et de la propulsion navale.** A ce sujet, le PNGMDR 2016-2018 indique que « *le CEA remet au ministre chargé de l'énergie avant le 31 décembre 2017 un rapport présentant la typologie de l'ensemble des combustibles usés détenus issus des réacteurs expérimentaux, les développements à réaliser pour permettre leur valorisation, ainsi que l'intérêt des propriétés des matières séparées en vue de leur réutilisation* » et que « *EDF remet au ministre chargé de l'énergie avant le 31 décembre 2017 un rapport présentant la typologie des combustibles usés du réacteur EL4 de la centrale des monts d'Arrée, les développements à réaliser pour permettre leur valorisation, ainsi que l'intérêt des propriétés des matières séparées en vue de leur réutilisation* » (cf. article 13 de l'arrêté du 23 février 2017 [232]).

### 3.1.2 HYPOTHESES DE L'INVENTAIRE DU PIGD

L'inventaire du PIGD-D [162] a été établi pour les déchets générés par l'exploitation et le démantèlement :

- des réacteurs de la filière « Uranium-Naturel-Graphite-Gaz » (UNGG) et du réacteur de Chooz A, aujourd'hui arrêtés, et des 58 réacteurs de la filière des REP, aujourd'hui en fonctionnement ;
- du réacteur de la filière à eau lourde (réacteur EL4 de Brennilis) et de ceux de la filière à neutrons rapides (RNR - réacteurs Phénix et Superphénix), arrêtés suite au non déploiement industriel de ces filières ;
- de l'EPR, en construction sur la tranche 3 de Flamanville ;
- des usines de fabrication et de traitement du combustible, arrêtées et en fonctionnement ;
- des installations de recherche, civile et de défense, du CEA ;
- des installations nouvelles ayant obtenu leur décret d'autorisation de création, telles que le réacteur expérimental Jules Horowitz (RJH), l'installation RES (Réacteur d'Essais) et l'« International Thermonuclear Experimental Reactor » (ITER).

La quantité totale de déchets à stocker dans l'installation Cigéo est évaluée en tenant compte de l'inventaire des déchets produits jusqu'en 2010 et d'une estimation de ceux à produire après cette période. Cette estimation constitue le scénario industriel dit « de référence » (SI 2011), établi par les principaux producteurs (AREVA, EDF et CEA), pour l'exploitation des installations susmentionnées. Les durées d'exploitation de 50 et de 20 ans sont considérées pour respectivement le réacteur RJH et l'installation ITER. Par ailleurs, l'inventaire du PIGD-D prend en compte l'ensemble des déchets produits ou à produire par le traitement des combustibles irradiés dans les réacteurs UNGG, REP, EPR et RNR.

A cet égard, les principales hypothèses prises dans le SI 2011 concernent, d'une part les caractéristiques des assemblages combustibles à décharger après 2010 et leur traitement, d'autre part la durée d'exploitation des réacteurs du parc électronucléaire ainsi que la production électrique nette future.

### 3.1.2.1 Caractéristiques des assemblages combustibles à décharger

La détermination du tonnage de métal lourd déchargé en fin d'exploitation du parc REP s'appuie sur la répartition du stock d'assemblages déchargés à fin 2010, complétée, à compter de 2011, par une simulation effectuée par EDF des déchargements à venir, compte tenu des hypothèses d'exploitation envisagées. Les caractéristiques des colis (nombre et inventaire radiologique) considérés dans l'inventaire dépendent de celles des assemblages irradiés, notamment du taux de combustion. A cette fin, le PIGD-D [162] indique que 22 réacteurs de 900 MWe utilisent en partie des assemblages combustibles MOX<sup>11</sup> et que 4 autres réacteurs de 900 MWe utilisent des assemblages combustibles de type URE<sup>12</sup>.

La masse totale de combustibles REP prise en compte dans le PIGD-D s'élève à 64 150 tML (masse de métal lourd initial) et se répartit en 58 000 tML, 4 000 tML et 2 150 tML d'assemblages combustibles UOX, MOX et URE respectivement. A ceci s'ajoutent 230 tML de combustibles RNR. Il est supposé que la totalité des assemblages de combustibles irradiés dans les REP et RNR est traitée.

L'hypothèse selon laquelle les assemblages combustibles MOX sont utilisés dans 22 réacteurs de 900 MWe, correspond à la situation actuelle. A cet égard, l'IRSN souligne qu'EDF a demandé l'autorisation, d'une part de charger des assemblages combustibles MOX dans les réacteurs du Blayais 3 (prévu en 2018) et 4, d'autre part d'augmenter la teneur en plutonium des assemblages combustibles MOX. La mise en œuvre d'assemblages combustibles MOX dans les réacteurs du Blayais porterait à 24 le nombre de réacteurs de 900 MWe utilisant ce type d'assemblages, ce qui modifierait les hypothèses actuelles prises dans le PIGD-D.

De manière générale, l'IRSN note que les caractéristiques des assemblages combustibles à décharger sont amenées à évoluer par rapport au scénario SI 2011 qui est établi à partir de données relatives aux déchets produits et aux combustibles déchargés au 31/12/2010.

### 3.1.2.2 Durée d'exploitation des réacteurs du parc électronucléaire et production électrique nette future

Une production totale du parc électronucléaire de l'ordre de 20 000 TWhe est considérée jusqu'à la date d'arrêt du réacteur EPR de Flamanville et une période de fonctionnement de 50 ans est prise en compte pour l'ensemble des réacteurs. L'Andra indique que le « scénario [SI 2011] ne préjuge pas des résultats du réexamen décennal de sûreté des réacteurs REP, ni des modalités liées, le cas échéant, à l'allongement de la durée d'exploitation de ces réacteurs au-delà de [la période] d'exploitation prise en référence et/ou au renouvellement éventuel du parc par un déploiement de réacteurs de troisième génération (EPR) et/ou par des réacteurs de quatrième génération. Il considère que les matières (uranium et plutonium) non valorisées dans les 58 réacteurs REP actuels et l'EPR Flamanville 3 pourront l'être dans des installations futures. Les déchets produits par un éventuel futur parc de réacteurs ne sont pas pris en compte ». De même, le PIGD-D précise que la durée de 50 ans retenue pour la période de fonctionnement des réacteurs est « à voir comme une moyenne indicative, une durée de fonctionnement moindre de certains réacteurs pouvant en effet compenser, du point de vue des déchets produits, une durée de fonctionnement supérieure pour d'autres ».

<sup>11</sup> Assemblages combustibles à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium.

<sup>12</sup> Assemblages combustibles à base d'oxyde d'uranium issu du traitement, dans les usines de La Hague, de combustibles à base d'oxyde d'uranium (UOX) naturel enrichi (UNE).

L'IRSN rappelle qu'EDF avait présenté à l'ASN, dans son dossier d'orientations du programme associé au projet d'extension de la durée de fonctionnement des réacteurs du parc en exploitation, son objectif « *d'étendre la durée de fonctionnement de son parc nucléaire significativement au-delà de quarante ans* » et avait également annoncé qu'il était prévu d'accroître la production d'électricité en augmentant la puissance des réacteurs de 1300 MWe (AP1300). A cet égard, l'ASN formulait dans son avis [29] la demande 2013 D1 émise suite à l'instruction du dossier « *Etudes remises depuis 2009* » selon laquelle « *l'inventaire devrait prendre en compte l'ensemble des stratégies industrielles aujourd'hui envisagées par les producteurs, en particulier pour ce qui concerne la durée de fonctionnement des réacteurs* ». Par ailleurs, l'article 12 du décret n°2016-1442 du 27 octobre 2016 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie [164] précise qu'EDF doit établir avant la fin avril 2017 « *un plan stratégique compatible avec les orientations de la programmation pluriannuelle de l'énergie qui fixe l'objectif de réduire la part du nucléaire à 50 % de la production d'électricité à l'horizon 2025* ». Cette programmation donne notamment comme orientation de « *décider des fermetures et des prolongations de l'exploitation au-delà de leur quatrième visite décennale de certains réacteurs, au cours de la deuxième période de la PPE* », soit entre 2019 et 2023. A cet égard, afin de prendre position sur la demande d'EDF de poursuivre l'exploitation des réacteurs de 900 MWe significativement au-delà de quarante ans, l'ASN a demandé à EDF par courrier [165] « *de disposer de tous les éléments, et notamment de [ses] intentions concernant les échéances de mise à l'arrêt des réacteurs actuels [et qu'EDF les transmette] avant la fin 2017* ».

L'IRSN constate donc que la conjoncture actuelle relative aux énergies et à la stratégie future de gestion du parc REP et du réacteur EPR (type et gestion des combustibles, durée de fonctionnement des réacteurs, etc.) engendre des incertitudes sur l'inventaire des déchets à produire et à stocker par rapport au scénario retenu pour établir le PIGD. A ce sujet, le PNGMDR 2016-2018 [239] indique que « *l'Inventaire national comprend des scénarios industriels de référence et des scénarios prospectifs* » et recommande que « *les scénarios prospectifs qui seront étudiés par la prochaine édition de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs réalisée par l'Andra [prennent notamment] en compte les demandes suivantes :*

- *intégrer des scénarios industriels de référence compatibles avec les objectifs de la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte ;*
- *présenter un scénario prospectif de non-renouvellement de la production électronucléaire dans lequel les matières non valorisées sont requalifiées en déchets ;*
- *étudier une variante au scénario de renouvellement du parc électronucléaire dans lequel le parc futur ne serait pas composé de réacteurs à neutrons rapides ».*

L'IRSN estime que le dossier en support de la DAC devra être basé sur un inventaire prévisionnel des colis à stocker tenant compte d'un scénario industriel de référence actualisé, notamment en accord avec la stratégie retenue par EDF pour gérer le parc REP et le réacteur EPR (durée d'exploitation des réacteurs, type de combustible chargé). Ce point fait l'objet de l'engagement E1-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

### 3.1.3 DESCRIPTION DES COLIS

Comme indiqué au chapitre 3.1, l'inventaire est organisé selon différentes familles de colis primaires de déchets qui se distinguent par leur contenu chimique et radiologique, leurs niveaux de puissance thermique et d'irradiation, leur nature (compactés, cimentés, bitumés...) et la géométrie de leur conteneur primaire. Il tient compte des colis de

déchets primaires existants, de ceux en cours de production et de ceux à produire, à partir de déchets existants, non encore conditionnés, ou de déchets futurs. Les quantités et volumes de colis primaires et les différentes familles de rattachement, figurant dans l'inventaire du PIGD-D [162], sont rappelés en Annexe T3 du présent rapport. Par ailleurs, il convient de noter que, au titre des dispositions de l'article 6.7 de l'arrêté INB du 07/02/2012 [4] et des décisions associées (dont la décision relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les INB [253]), les spécifications de production de colis de déchets à destination de Cigéo doivent faire l'objet d'une autorisation de l'autorité compétente. A cet égard, l'IRSN tient à rappeler que le traitement des déchets et le conditionnement en colis en vue d'un stockage en formation géologique doit notamment viser, ainsi que préconisé par le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3], à ce que celui-ci présente « *une capacité à confiner les substances nocives adaptée à la nature des déchets qu'il contient, compte tenu de l'environnement dans lequel il se trouve* ». Pour répondre à cet objectif, il est recommandé que « *le colis empêche la dissémination d'activité dans les autres composants du système de stockage pendant* » au moins la phase d'exploitation et de réversibilité et, selon le type de colis et les critères et exigences retenus pour la démonstration de sûreté du stockage, pendant une période donnée après la fermeture de l'installation. Dans tous les cas de figure, il est recommandé que le colis limite « *les relâchements de substances radioactives après la perte partielle ou totale de l'étanchéité du dispositif mis en place pour participer à la fonction de confinement* ». La description des colis retenus [162][39], qui fait l'objet de la présente section, a été notamment examinée eu égard aux recommandations du Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3].

L'IRSN distingue ainsi différentes catégories de déchets selon l'état d'avancement du conditionnement associé et la compatibilité de celui-ci avec le guide de l'ASN précité :

- les déchets produits et futurs pour lesquels un conditionnement existe ;
- les déchets produits pour lesquels :
  - le conditionnement annoncé correspond à un colis de déchets placés en vrac ;
  - le conditionnement est en cours de développement, d'étude ou d'autorisation ;
  - le conditionnement n'est pas défini ;
- les déchets futurs pour lesquels le conditionnement est à définir.

L'intégration, dans l'inventaire, des déchets en cours de production est faite en tenant compte du conditionnement actuellement mis en œuvre pour les différents types de déchets par AREVA et le CEA. C'est notamment le cas pour les déchets issus du traitement des combustibles usés dans l'établissement AREVA NC de La Hague que sont les déchets vitrifiés (CSD-V), les déchets de structure des assemblages de combustibles traités (CSD-C) et les boues bitumées (fûts de bitumes STE3). Le PIGD-D indique par exemple [162] que le procédé de compactage mis en œuvre à La Hague pour le conditionnement des déchets de structure des assemblages combustibles actuellement traités (CSD-C) sera aussi utilisé dans les années à venir pour conditionner les déchets de structure résultant de traitements futurs de combustibles UOX, URE et MOX en mélange (COG-120), de combustibles des réacteurs à neutrons rapides Phénix et Superphénix (COG-450), des combustibles du CEA et de ceux du réacteur EL4 de Brennilis (COG-530 pour le CEA Civil, COG-540 pour le CEA DAM et COG-550 pour EL4) ainsi que les coques et embouts entreposés dans le silo HAO de l'établissement AREVA NC de La Hague (COG-070) ou encore certains déchets de fonctionnement et de démantèlement de l'usine UP2-400 (COG-460) et des usines UP2-800 et UP3 (COG-490). De même, pour le conditionnement des déchets technologiques produits par AREVA (CBF-C2') et par le CEA (colis de 870 L et 500 L), le principe d'un blocage par un liant hydraulique est conservé. Aussi, le PIGD-D indique [162] que les déchets de

démantèlement des usines UP2-400 (COG-480), UP2-800 et UP3 (COG-500) de La Hague, de MELOX (COG-510) et du centre de fabrication du combustible de Cadarache (COG-520) seront bloqués par un liant hydraulique à l'intérieur d'un CBF-C'2.

L'IRSN relève que l'ensemble des déchets produits et futurs pour lesquels le conditionnement existe représente environ 80 % de l'inventaire en nombre de colis et 73 % de l'inventaire en volume et **estime que l'essentiel des conditionnements retenus et décrits ci-dessus est en accord avec les recommandations du Guide de l'ASN relatif au stockage géologique** [3]. Toutefois, s'agissant des colis de déchets bitumés (qui représentent près de 18 % de l'inventaire de Cigéo en nombre de colis et environ 16 % en volume), l'IRSN rappelle qu'il a été recommandé, à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » [16], que les dispositions relatives à la maîtrise du risque incendie en phase d'exploitation soient complétées. Le cas des enrobés bitumineux vis-à-vis du risque incendie est examiné au chapitre 7.2.1.7 du présent rapport. Dans l'éventualité où les colis de déchets bitumés ne seraient pas acceptés au stockage, les déchets produits et futurs pour lesquels le conditionnement existe ne représenteraient plus que 62 % de l'inventaire en nombre de colis et 56 % de l'inventaire en volume.

L'inventaire du PIGD-D [162] tient également compte des déchets qui ont été produits et qui font l'objet d'un entreposage sur les différents sites des producteurs de déchets AREVA, CEA et EDF. Ces déchets n'étant pour l'instant pas conditionnés de manière définitive, des hypothèses de conditionnement ont été prises pour leur intégration dans l'inventaire. Bien que l'objectif du PIGD ne soit pas d'apprécier l'acceptabilité en stockage des colis identifiés dans l'inventaire mais d'identifier le besoin industriel en volume et en flux de colis auquel doit répondre l'installation Cigéo, l'IRSN rappelle que les hypothèses de conditionnement impactent néanmoins le dimensionnement de l'installation. Ces hypothèses appellent les commentaires suivants.

L'IRSN rappelle les remarques émises lors de l'examen des « Etudes remises depuis 2009 » [27] quant à la prise en compte dans le PIGD de certains colis dans lesquels les déchets sont placés en vrac. En effet, ces colis ne peuvent pas être considérés comme tels en vue de leur stockage dans Cigéo compte tenu de l'objectif de confinement assigné au colis par le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3]. A ce sujet, le GPD considérait, à l'issue de sa réunion du 5 février 2013 [28] que « *les colis dont le conditionnement ne répond pas aux objectifs du guide [de l'ASN relatif au stockage géologique [3]], à savoir les conteneurs d'entreposage sans blocage de déchets [...], ne devraient pas être retenus sous leur forme actuelle dans l'inventaire du PIGD. Aussi, le groupe permanent recommande que les producteurs proposent d'autres solutions de conditionnement pour ces déchets avec une assurance raisonnable qu'ils satisferont aux critères de sûreté essentiels pour l'acceptation dans le stockage. Ces solutions devront être intégrées par l'Andra dans le PIGD, au plus tard à l'échéance de la demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation de stockage en formation géologique profonde* ». Ces déchets correspondent au stade du DOS à des déchets technologiques liés à l'exploitation de l'atelier de vitrification R7 de La Hague (COG-850). Il conviendrait que ces déchets fassent l'objet d'un nouveau conditionnement adapté à l'installation de stockage et que l'Andra justifie dans le dossier de DAC les hypothèses de conditionnement retenues dans la démonstration de sûreté.

Il convient de noter par ailleurs que pour certains déchets déjà produits, les modalités de conditionnement sont en cours de développement, d'étude ou d'autorisation. Ce sont notamment :

- les déchets de structure magnésiens correspondant aux gaines et bouchons des combustibles UNGG traités et entreposés sur le site du CEA Marcoule (CEA-1060). Il est prévu de reprendre, de conditionner

et de bloquer ces déchets en fûts de 223 L en acier inoxydable. La définition du matériau qui sera retenu pour le blocage de ces déchets est en cours ;

- les capsules de titanate de strontium entreposées à La Hague dans l'Atelier pilote ELAN IIB (COG-870). Il est prévu de bloquer ces capsules dans un conteneur CSD, le choix de la matrice de blocage est en cours ;
- les déchets sodés des réacteurs à neutrons rapides Superphénix (EDF-250) d'une part, Phénix et Rapsodie (CEA-380) d'autre part. Dans le [PIGD-A](#) [161] il était envisagé la cimentation comme procédé de conditionnement. Dans le [PIGD-D](#) [162], il est indiqué qu'« *une réflexion sur la problématique spécifique posée par ces déchets dans l'optique de leur prise en charge en stockage géologique profond Cigéo est en cours. Elle conduira, entre autres, à préciser les modalités d'un éventuel traitement (désodage) et de conditionnement de ces déchets. L'hypothèse retenue à ce jour par EDF et le CEA consiste à les conditionner dans des conteneurs métalliques de 1,5 m<sup>3</sup> »* ;
- les déchets technologiques alpha issus de l'exploitation des ateliers de l'établissement de La Hague et de l'usine MELOX et non susceptibles d'être stockés en surface (COG-400). L'Andra précise [39] que « *l'hypothèse de conditionnement précédemment retenu par AREVA était un compactage. Suite à la demande de l'ASN, AREVA étudie actuellement un conditionnement alternatif à ce compactage direct, il s'agit d'un procédé d'incinération/fusion/vitrification. Le colis correspondant est le colis PIVIC »* ;
- les boues entreposées dans les cuves et silos de l'atelier STE2 de l'établissement AREVA NC de La Hague (COG 430). Le colis retenu dans le [PIGD-D](#) [162] est le colis dit « C5 ». Le procédé consiste en un séchage avant compactage des boues sous forme de pastilles qui seront ensuite conditionnées dans des fûts en acier inoxydable (les vides étant comblés par du sable) ;
- les déchets activés d'exploitation (DAE) des REP du parc actuel (EDF-080) d'une part, les déchets activés de déconstruction (DAD) des réacteurs de première génération ainsi que les déchets de déconstruction non sodés du réacteur à neutrons rapides Superphénix (EDF-090) d'autre part. Le colis retenu dans le [PIGD-D](#) [162] est le colis dit « C1PG » qui consiste en un blocage des déchets par un coulis cimentaire.

En outre, le [PIGD-D](#) [162] retient la cimentation comme procédé de conditionnement notamment pour :

- des fines de cisailage et de dissolution entreposées dans le silo HAO (COG-440) ;
- des résines échangeuses d'ions, des boues, ainsi que du graphite issus du traitement mécanique des combustibles dans l'usine UP1 (CEA-1040).

S'agissant des procédés retenus à ce stade, l'IRSN n'identifie pas d'élément rédhibitoire à la poursuite de leurs études au regard des recommandations du Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3]. Cependant, pour ce qui est du procédé de cimentation, l'IRSN attire l'attention sur la difficulté de mettre au point ce type de procédé, compte tenu des compositions chimiques de certains déchets (résines, boues, diatomées...) et des teneurs élevées en émetteurs alpha et bêta-gamma des déchets. En effet, les problèmes liés à la radiolyse du béton ainsi que les réactions chimiques entre les composants des déchets et le ciment peuvent conduire à définir des taux d'incorporation du déchet relativement faibles (de l'ordre de quelques pour cent) et ainsi conduire à augmenter le nombre de colis. **Aussi, en l'absence des résultats des études, une forte incertitude subsiste sur le nombre de colis qui sera produit.**

Pour ce qui concerne les déchets technologiques alpha issus de l'exploitation des ateliers de l'établissement de La Hague et de l'usine MELOX, l'ASN a demandé à AREVA, par Décision 2014-DC-0464 du 30/10/2014 [193], de poursuivre « *les études de recherches et développement concernant un procédé associant au mieux incinération, fusion et vitrification afin de conditionner les déchets technologiques [non susceptibles d'être stockés en surface]* ». Dans le cadre de cette décision, AREVA NC a transmis un dossier présentant le procédé d'incinération-vitrification *in can* (PIVIC) associant l'incinération, la vitrification et la fusion pour traiter et conditionner les déchets alpha non susceptibles d'être stockés en surface. Ce procédé permettrait d'élaborer un conteneur métallique contenant, d'une part une phase composée de déchets métalliques fondus, d'autre part un vitrifiat composé de cendres et poussières provenant de l'incinération des déchets organiques et incorporées dans de la fritte de verre fondue. Il est prévu de placer deux « cans » dans un colis primaire dont le concept est en cours de développement. Dans son avis 2016-00141 du 29/04/2016 [201] faisant suite à l'examen du dossier précité, l'IRSN indique ne pas avoir identifié au stade actuel du projet, d'élément rédhibitoire au développement du « procédé d'incinération et vitrification *in can* » (PIVIC). **L'IRSN estime que le développement du procédé PIVIC est une réelle avancée en matière de traitement et de conditionnement des déchets nucléaires. En effet, un tel procédé vise à aboutir à un déchet inerte permettant de s'affranchir, en conditions de stockage, des risques inhérents à la radiolyse des matières organiques (production de gaz et de substances complexantes pouvant accélérer la migration des radionucléides).**

S'agissant du colis C5, celui-ci est la solution de conditionnement proposée en substitution au bitumage des boues. La stratégie retenue par AREVA NC pour la reprise des boues de STE2 ainsi que la spécification de production des colis C5 issus de la mise en œuvre des procédés envisagés ont été examinées par l'IRSN [196] et les conclusions de cet examen ont été présentées aux GPD et GPU le 28 mars 2017. Pour ce qui concerne la sûreté après fermeture du stockage du colis C5 dans l'installation Cigéo, les GPD et GPU n'ont pas identifié de difficulté rédhibitoire [240]. En revanche, les GPD et GPU soulignent que « *le procédé de traitement des boues actuellement envisagé aboutirait à la constitution de colis dans lesquels des réactions exothermiques pourraient se produire, en particulier en cas d'incendie* » et indiquent que « *ce sujet doit être examiné de façon approfondie car il pourrait constituer un obstacle rédhibitoire à l'acceptabilité des colis C5, tels que conçus, dans l'installation Cigéo en phase d'exploitation et de réversibilité* ». A cet égard, les GPD et GPU considèrent qu'« *AREVA NC doit retenir un procédé visant à neutraliser la réactivité chimique du déchet en vue des étapes ultérieures de sa gestion, et ceci sans retarder la mise en œuvre des opérations de reprise et de caractérisation des boues dans les délais prescrits* ». Aussi, l'IRSN relève que le conditionnement retenu pour les boues de STE2 est amené à être modifié pour répondre aux exigences de sûreté en phase d'exploitation. En conséquence, des incertitudes existent sur le nombre et le volume de colis qui seront produits ainsi que sur l'échéance à laquelle ils seront disponibles pour être stockés dans Cigéo.

S'agissant du colis C1PG, celui-ci consiste en un blocage des déchets par un coulis cimentaire dans des paniers déposés dans des conteneurs en béton de type C1PG et immobilisés dans ces derniers par le même coulis cimentaire. L'IRSN rappelle que la révision du rapport préliminaire de sûreté de l'installation ICEDA (EDF) a fait l'objet d'un examen par le GPU le 19 novembre 2008 [198]. S'agissant des colis de déchets, le GPU a relevé que l'activité de certains déchets cimentés dans ces colis sera nettement supérieure à celle des déchets actuellement cimentés dans d'autres installations. Pour ces colis, les risques d'altération du béton liés aux phénomènes thermiques et à la radiolyse, au cours de la fabrication des colis puis pendant leur entreposage, pourraient mettre en cause leur faisabilité et leurs propriétés de confinement. Par ailleurs, le GPU a constaté que les résultats d'essais

étaient très insuffisants pour montrer que les risques d'altération étaient maîtrisés. A cet égard, le GPU a estimé nécessaire qu'EDF poursuive les essais, tout en soulignant qu'en cas de nécessité, l'activité incorporée dans les colis pourrait être réduite, avec, corrélativement, une augmentation du nombre de colis produits. Au cours de l'année 2016, EDF a transmis à l'ASN le référentiel de conditionnement des déchets MAVL en colis C1PG sur l'installation ICEDA en support à sa demande d'accord de conditionnement. **Ce dossier est en cours d'instruction par l'IRSN au moment du présent examen.**

De plus, l'IRSN relève que pour un certain nombre de déchets déjà produits, les modalités de conditionnement ne sont pas définies. Ces déchets sont entre autres les déchets de l'AMI Chinon (EDF-120) ; les déchets activés de déconstruction (DAD) des REP du parc actuel (dont BCOT) (EDF-100) ; les crayons sources primaires et secondaires des REP et les sources scellées usagées diverses d'EDF (EDF-110) ; les colonnes d'élution de l'atelier ELAN IIB (COG 860). En outre, il est indiqué dans le PIGD-D [162] que les conditionnements des déchets technologiques liés à l'exploitation de l'AVM (CEA-1110) et des déchets contenus dans les conteneurs dits « DIADEM » en vue de leur stockage restent à définir. Ces derniers sont des déchets hautement irradiants provenant de Phénix (CEA-360, CEA 370), de l'APM (CEA-1152, CEA-1200), du RJH (CEA-400) ainsi que des sites CEA de Cadarache (CEA-400), Saclay (CEA-410), Fontenay-aux-Roses (CEA-420) et Grenoble (CEA-430). **Il conviendrait que les hypothèses de conditionnement retenues par l'Andra dans la démonstration de sûreté soient justifiées dans le dossier de DAC.**

Enfin, l'inventaire du PIGD-D [162] tient compte également des déchets futurs, à savoir des déchets du réacteur ITER, produits par le remplacement de composants lors de l'exploitation et par leur retrait après mise à l'arrêt définitif (ITER-010). L'Andra indique [162] qu'un conditionnement de ces déchets dans des fûts métalliques de 700 L est retenu à ce stade. **Il conviendrait que les hypothèses de conditionnement retenues par l'Andra dans la démonstration de sûreté soient justifiées dans le dossier de DAC.**

En résumé, sur la base des éléments disponibles au stade du DOS [39][162], l'IRSN a réalisé en Annexe T3 une synthèse du nombre de colis primaires et du volume associé retenus dans l'inventaire de Cigéo, selon l'état d'avancement des conditionnements. L'IRSN constate que l'inventaire de Cigéo est basé pour une partie importante sur des colis déjà produits ou à produire selon des conditionnements existants (environ 80 % en nombre et 73 % en volume). Cependant l'IRSN rappelle que de fortes réserves demeurent quant au caractère acceptable des colis de déchets bitumés au stockage (environ 18 % en nombre et 16 % en volume).

De plus, l'IRSN considère que des incertitudes existent sur les hypothèses retenues pour le conditionnement de certains déchets et que le nombre et le volume de colis est donc susceptible d'évoluer notablement. Les colis concernés au stade du DOS par ces incertitudes représentent environ 20 % de l'inventaire total du PIGD-D en nombre de colis.

**Ainsi, pour ce qui concerne les déchets dont le conditionnement ne sera pas défini, l'IRSN considère que l'Andra devra justifier dans le dossier de DAC les hypothèses retenues dans la démonstration de sûreté. Ce point fait l'objet de l'engagement E2-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 29 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.**

### 3.1.4 MARGES

Les marges présentées dans le PIGD-D [162] sont destinées à couvrir « *des incertitudes sur le volume de déchets futurs à produire ou de déchets anciens qui doivent faire l'objet d'opérations de reprise et conditionnement (RCD)* »,

sur les modalités de conditionnement et les caractéristiques de certains déchets, tout en restant à l'intérieur du périmètre défini pour le scénario industriel des producteurs en matière d'installations, de durées d'exploitation et de filières de gestion des déchets » (cf. chapitre 3.1.2 relatif aux hypothèses de l'inventaire du PIGD). L'Andra précise [162] que la détermination des marges à prendre en compte pour la conception de Cigéo est de la responsabilité des producteurs de déchets ou de leur collecteur (en l'occurrence l'Andra elle-même) lorsqu'il s'agit de déchets provenant de l'industrie non électronucléaire. Les marges sont estimées par les producteurs suivant les principes rappelés en Annexe T4, leur justification faisant l'objet d'échanges entre l'Andra et les producteurs.

Lors de la mise à jour du PIGD-D, l'Andra a transmis [254], conformément à l'engagement 2013 E1.1 [1] pris à l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 », la justification des marges retenues par les producteurs afin d'améliorer la lisibilité de l'inventaire du PIGD et mieux apprécier son conservatisme.

Pour ce qui concerne les déchets issus du traitement des combustibles, AREVA indique que « les marges sur les combustibles ne peuvent être établies [...] en l'absence de communication du scénario précis par EDF ». Pour les colis de déchets provenant d'opérations de reprise et conditionnement de déchets (RCD) d'AREVA, les marges sont « précisées lorsqu'elles sont estimées et nulles lorsque la quantité de déchets est bien connue et les conditionnements également ». Pour les colis de déchets de démantèlement (DEM), AREVA précise que « les colis envisagés à ce jour ne seront peut-être pas ceux produits à très long terme. Aussi, AREVA préfère comptabiliser des assiettes volumiques globales et ne pas préciser les conditionnements. Cependant, à la demande de l'Andra afin d'illustrer l'exercice d'établissement des chroniques, des colis ont été précisés ».

S'agissant des déchets du CEA, le producteur précise notamment que « l'inventaire margé est inchangé par rapport au PIGD indice A, mais [que] les données constitutives évoluent quantitativement ou qualitativement ». Ceci provient de :

- l'« évolution de la répartition des quantités de colis entre l'inventaire de référence et la marge pour les familles CEA-1040 [(fûts en acier inoxydable contenant des déchets de procédé cimentés)] et CEA-1090 [(fûts en acier inoxydable contenant des déchets technologiques métalliques et organiques bloqués dans un liant hydraulique)] » ;
- l'« évolution qualitative du conditionnement, sans modification de son volume industriel, des quantités et volumes associés. Cela concerne [la famille CEA-1110 (déchets technologiques issus de l'AVM)] et toutes les familles dont le conditionnement initialement envisagé pour l'envoi vers Cigéo était le conteneur DIADEM (excepté la famille CEA-420 [(déchets issus de l'exploitation et du DEM de diverses installations de Fontenay-aux-Roses)] traitée plus haut). En effet, l'avis de l'ASN [...] relatif notamment au PIGD de Cigéo a été pris en compte. Par conséquent, pour ces familles, le conteneur primaire est considéré « à déterminer ». Il sera examiné le moyen de bloquer les déchets ».

Enfin, pour ce qui concerne les déchets d'EDF, le producteur retient, pour la majorité des familles de colis de déchets du PIGD-D, des marges nulles, compte tenu, soit du caractère majorant des ratios considérés pour les hypothèses de conditionnement retenues (comparés à ceux du retour d'expérience de la production actuelle de colis), soit des masses de déchets prises en compte, considérées comme définitives et majorantes.

Le tableau en Annexe T5 présente les marges considérées.

L'IRSN relève d'une part que chaque producteur adopte une méthodologie d'établissement des marges qui lui est propre, d'autre part que l'application de marges est faite soit à l'échelle du colis, soit à l'échelle de la

**famille de colis.** De plus, les marges prises en compte pour les colis à stocker à Cigéo sont en majorité incluses dans l'inventaire de référence sans être précisées. En outre, l'IRSN rappelle, ainsi que présenté dans le chapitre 3.1.3, que le nombre et le volume de colis pour lesquels des incertitudes existent sur les hypothèses prises pour leur conditionnement correspondent à environ 20 % de l'inventaire total du PIGD-D [162]. A ce titre, l'IRSN considère que la demande de l'ASN 2013 D2 [1] relative aux marges qui « *devraient couvrir l'incertitude sur les volumes à stocker des déchets pour lesquels des conditionnements restent à définir ou sont en cours d'instruction* », formulée à l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 », reste d'actualité.

Compte tenu des éléments mentionnés *supra*, l'IRSN estime que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, l'inventaire des colis à stocker en distinguant les marges prises en compte afin d'améliorer la lisibilité de l'inventaire et de mieux apprécier son conservatisme. Ce point fait l'objet de l'engagement E3-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

### 3.1.5 CARACTERISTIQUES DIMENSIONNANTES

Les types de colis primaires que l'Andra doit prendre en considération correspondent à une très grande diversité de déchets. Aussi, l'Andra a mis en œuvre une méthode permettant d'identifier les caractéristiques à considérer pour le dimensionnement de ses installations et leur évaluation de sûreté. Il s'agit de caractéristiques des colis primaires dites « dimensionnantes » pour la conception qui permettent de définir un domaine de fonctionnement de l'installation. Les caractéristiques retenues par l'Andra sont basées sur les familles de colis dont le conditionnement est connu à ce stade et conduisent, *via* un remontage global entre la connaissance des colis, les dispositions de conception, les exigences réglementaires et les analyses de sûreté, à l'établissement des spécifications d'acceptation des colis primaires à Cigéo (cf. chapitre 3.1.6). Le conditionnement des déchets dont la définition n'est pas arrêtée à ce jour devra être défini par les producteurs de manière à satisfaire aux spécifications d'acceptation qui auront été établies par l'Andra.

L'Andra indique [39] que les caractéristiques des colis primaires dimensionnantes pour les conteneurs de stockage sont la masse et la géométrie. Ces données permettent la définition des différents modèles de conteneurs de stockage en visant à en limiter le nombre afin de rendre les opérations de manutention des colis aussi simples que possibles et de faciliter l'automatisation du processus de mise en stockage (cf. chapitre 2.3).

Par ailleurs, l'Andra définit [39] les caractéristiques dimensionnantes des colis primaires vis-à-vis :

- du risque d'exposition externe aux rayonnements ionisants ;
- du risque de dispersion de substances radioactives en cas de chute et en cas d'incendie ;
- du risque lié au dégagement de gaz de radiolyse ;
- du risque lié à la puissance thermique des colis primaires ;
- du risque de criticité.

Pour les risques d'exposition externe aux rayonnements ionisants, les familles de colis primaires les plus dimensionnantes sont listées par l'Andra (cf. Annexe T6). Le dimensionnement est établi par l'Andra en retenant l'inventaire radiologique maximal des familles de colis afin de couvrir tous les colis primaires de la famille considérée. Les colis retenus sont notamment les colis standards de déchets compactés contenant des coques et embouts issus d'assemblages combustibles (COG-100 et COG-110) ainsi que ceux contenant les déchets irradiants tels que les grappes de commande issues du fonctionnement des REP (EDF-080).

Pour ce qui concerne le risque de dispersion de substances radioactives en cas de chute, choc ou collision et en cas d'incendie, l'Andra identifie, en retenant l'inventaire radiologique maximal, les familles de colis primaires les plus pénalisantes vis-à-vis respectivement de la mobilisation de l'activité du colis et de la mobilisation de la contamination surfacique labile (cf. Annexe T6). Les colis retenus sont par exemple ceux contenant des sources radioactives (CEA-1510).

S'agissant du risque lié au dégagement de gaz de radiolyse, le critère retenu par l'Andra est le débit de gaz de radiolyse (assimilé à du dihydrogène) par colis primaire MAVL. A ce stade du projet l'Andra retient, sur la base des connaissances des colis primaires, la valeur de 40/n L/an/colis primaires (n étant le nombre de colis primaires par conteneur de stockage [43] (cf. chapitre 3.1.6). En sus, une étude de sensibilité considérant un taux de dégazage de 100 L/an/colis de stockage est réalisée. L'Andra recense [39] les familles de colis primaires présentant les plus forts dégagements en gaz de radiolyse (cf. Annexe T6). L'Andra retient notamment les colis contenant des grappes de commande issues du fonctionnement des réacteurs REP (EDF-080) et les fûts cimentés de fines et résines du silo HAO de l'établissement AREVA NC de La Hague (COG-440).

Pour ce qui concerne le risque lié à la puissance thermique pour les colis primaires MAVL, l'Andra envisage une limitation de la puissance thermique à réception sur Cigéo de l'ordre de 15W par colis primaire ou de 60W par colis de stockage tout en indiquant que des valeurs inférieures pourraient se révéler nécessaires pour des colis à décroissance thermique lente (du fait de la présence d' $^{108m}\text{Ag}$  ou  $^{241}\text{Pu}$ ). L'Andra a précisé au cours de l'instruction que la valeur de 100W par colis de stockage prise en compte dans l'installation de surface était une valeur enveloppe retenue au stade de l'APS et que les critères de puissance thermique retenus dans l'installation souterraine étaient issus de l'exigence de température maximale de 65°C au niveau du béton des ouvrages. Pour les colis primaires HA, l'Andra indique [43] qu'ils seront livrés de sorte à respecter une puissance thermique linéique moyenne par alvéole propre au dimensionnement retenu et spécifiée au moment de la DAC. Il est indiqué par ailleurs que la puissance thermique maximale à réception sera de l'ordre de 300W par colis primaire pour les colis HAO et de 500W par colis de stockage pour les HA1/HA2. L'Andra fournit [39] la liste des familles de colis primaires MAVL et HA les plus pénalisantes, pour un conteneur de stockage donné, vis-à-vis de leur puissance thermique moyenne (sur la base d'un inventaire radiologique moyen), à une date de réception donnée sur Cigéo (cf. Annexe T6). Les colis de déchets MAVL retenus sont en particulier ceux contenant des grappes de commande issues du fonctionnement des réacteurs REP (EDF-080) et les colis standards de déchets compactés contenant des coques et embouts issus d'assemblages combustibles (COG-110). Les colis de déchets HA retenus sont les colis de déchets vitrifiés issus du retraitement de combustibles usés de type UOX (COG-800) ou UOX/MOX/URE (COG-200). L'IRSN observe (cf. Annexe T6) que les familles de colis COG-110 et COG-200 précitées ne respectent pas les limitations de la puissance thermique à réception envisagées à ce stade par l'Andra. A ce sujet, l'Andra relève que « *pour certains colis, un entreposage de décroissance chez le producteur sera nécessaire afin de respecter les critères spécifiés à réception* ». L'IRSN considère que les besoins en entreposage des producteurs devront être évalués en cohérence avec les spécifications d'acceptation des colis primaires à Cigéo lorsque celles-ci seront précisées (cf. chapitre 3.1.6).

Pour ce qui concerne le dimensionnement vis-à-vis du risque de criticité, l'Andra précise [39] que les familles de colis primaires qui sont dimensionnantes font l'objet d'une sélection sur la base de la nature physico-chimique et de la composition du milieu fissile, de la masse de matière fissile, des dimensions géométriques des colis ainsi que des

natures du modérateur et de la matrice d'enrobage des déchets. Les masses maximales de matières fissiles par type de colis primaires sont présentées dans le dossier (cf. Annexe T6).

Les dispositions retenues par l'Andra au regard des différents risques susmentionnés sont examinées au chapitre 7 du présent rapport.

**Les familles de colis primaires retenues à ce stade pour le dimensionnement de Cigéo** (cf. Annexe T6) du point de vue des risques d'exposition externe aux rayonnements ionisants et de dispersion de substances radioactives, du risque lié au dégagement de gaz de radiolyse, du risque lié à la puissance thermique des colis ainsi que du risque de criticité, **n'appellent pas, compte tenu des connaissances de l'IRSN sur les colis primaires au moment du présent examen, de remarque particulière.**

Enfin, pour ce qui concerne le co-stockage physico-chimique de certaines familles de colis MAVL, l'Andra retient des critères conduisant à la définition de sept catégories physico-chimiques. Ces éléments sont présentés et examinés au chapitre 3.4.1.

### 3.1.6 SPECIFICATIONS D'ACCEPTATION DES COLIS PRIMAIRES

L'Andra a transmis [38] les documents constitutifs du DOS dont les spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo [43] font partie. En Annexe B à la note [49] accusant réception du DOS, l'ASN rappelle que « dans le cadre des demandes du PNGMDR 2016-2018, l'Andra doit définir au plus tôt une version préliminaire des spécifications d'acceptation de l'installation de stockage en couche géologique profonde qu'elle conçoit. Elle doit s'attacher, dans l'établissement de ces spécifications, à tenir compte des colis de déchets radioactifs déjà produits et dont elle a été informée des caractéristiques par l'intermédiaire notamment de dossiers de connaissance. Cette version préliminaire des spécifications d'acceptation doit permettre aux producteurs de déchets HA-MAVL de réaliser, dans un délai qui n'excèdera pas 24 mois après la date de transmission du projet de spécifications d'acceptation préliminaires de Cigéo, une analyse de l'acceptabilité des colis de déchets radioactifs qui ont été conditionnés à cette date au regard de ce document ». L'ASN rappelle également sa demande formulée dans son avis [6] portant sur les études relatives à la gestion des déchets HA et MAVL remises en application du PNGMDR 2013-2015 : « L'ASN estime nécessaire que l'Andra établisse dans les meilleurs délais un projet de spécifications préliminaires d'acceptation des déchets radioactifs qui seront applicables pour le stockage en couche géologique profonde. L'Andra doit s'attacher, dans ce projet de spécifications préliminaires, à présenter le niveau d'incertitude attaché aux différents paramètres retenus. L'ASN recommande que, pour le 30 juin 2018, les producteurs de déchets, réalisent une analyse de l'acceptabilité de leurs colis de déchets radioactifs au regard de ce projet de spécifications préliminaires d'acceptation et présentent, si nécessaire, des options de mise à jour de leur stratégie de conditionnement ou d'études de caractérisation ». L'ASN indique [49] que les spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo remises par l'Andra [43] ne répondent pas au niveau de détail attendu pour permettre aux producteurs de déchets de réaliser l'analyse de l'acceptabilité de leurs déchets demandée par l'ASN et par le PNGMDR et demande à l'Andra de transmettre, sous un délai d'un mois, une version complétée de ses spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo. L'ASN précise enfin que le projet devra en particulier présenter les valeurs des paramètres relatifs aux colis primaires devant être retenues en regard des exigences associées au colis identifiées dans la démonstration de sûreté de l'installation de stockage, tant dans sa phase d'exploitation que dans sa phase post-fermeture. Pour chacun de ces paramètres, les incertitudes associées ainsi que la justification des données quantitatives devront être apportées. L'Andra n'a pas fourni

version complétée de ses spécifications au cours de l'instruction mais a transmis un document présentant leur méthode d'élaboration [50] ; ce document fait l'objet de la présente instruction.

Outre la définition de caractéristiques dimensionnantes pour la conception (cf. chapitre 3.1.5), la connaissance des colis primaires fournie par les producteurs à l'Andra a également conduit à la définition des inventaires radiologique et chimique de référence et de l'inventaire à terminaison pour la sûreté après fermeture du stockage (cf. chapitres 3.2, 3.3 et 8.2.1). Les connaissances tracées dans les référentiels de comportement des colis de déchets ont conduit quant à elles à la définition des modèles de relâchement pour la sûreté après fermeture (cf. chapitre 5.1). *In fine*, les spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaire à Cigéo [43] résultent d'une démarche itérative de remontage global entre la connaissance des colis, les dispositions de conception, les exigences réglementaires et les analyses de sûreté [50]. Ce processus permet de décliner en exigences spécifiées ou en critères de sûreté l'ensemble des fonctions de sûreté attribuées aux colis de déchets (cf. chapitre 2.8). Pour les colis primaires futurs, les spécifications serviront de cadre à la définition des conditionnements de déchets.

S'agissant des exigences à spécifier, celles présentées par l'Andra [43] couvrent les caractéristiques générales du colis primaire (description générale du colis primaire, nombre de colis, origine des déchets, identification, masse, géométrie, interface de préhension, caractéristiques relatives au confinement statique, etc.), les composés chimiques des éléments constitutifs du colis primaire (déchets, éventuel matériau de remplissage ou matrice de blocage, conteneur primaire et tout autre composant présent), les caractéristiques radiologiques et thermiques des colis primaires, les caractéristiques mécaniques du colis primaire, les exigences relatives au comportement des colis primaires en cas de sollicitation thermique ainsi que les exigences relatives au terme source gaz. Ces exigences peuvent être déclaratives et/ou de nature quantitative ou qualitative.

L'Andra indique que l'ensemble des substances constitutives du colis primaire fera l'objet d'une déclaration qualitative et quantitative à l'échelle de la famille de colis. Cela concerne en particulier les substances agressives vis-à-vis des constituants du colis primaire (chlorures, fluorures, etc.), les substances qui sont sources potentielles de gaz par radiolyse ou par corrosion (telles que les matériaux organiques ou métalliques), les substances salines (sels de sodium, sels de potassium, etc.), les substances complexantes (certaines substances organiques et/ou les produits de dégradation de substances organiques), les toxiques chimiques (plomb, arsenic, cyanures, etc.) ainsi que les substances classées cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques (telles que le dibutylphtalate). Pour ce qui concerne les substances potentiellement pyrophoriques ou présentant des risques de reprise de réactivité, le producteur devra justifier qu'elles ne constituent pas une source de danger durant la période d'exploitation, en situation normale ou accidentelle, notamment dans le cas d'une potentielle élévation de température. Par ailleurs, il est à noter que la quantité de substances pulvérulentes radioactives par colis primaire devra être limitée afin de garantir le respect du potentiel de contamination maximal en cas de chute du colis. Enfin, un certain nombre de substances seront interdites. Il s'agit des liquides libres, qu'ils soient organiques ou aqueux, des substances et mélanges les plus réactifs au contact de l'eau (réaction exothermique) et dégageant des gaz inflammables, ainsi que des substances explosives, facilement inflammables et infectieuses. Cette interdiction recouvre également toute substance produisant des gaz ou des produits corrosifs par radiolyse dans les colis HA. S'agissant des caractéristiques radiologiques des colis destinés à Cigéo, le producteur devra présenter, par famille de colis, l'évaluation de l'activité des radionucléides, sa justification, les incertitudes associées et le caractère globalement majorant de la méthodologie retenue.

Les exigences déclaratives retenues à ce stade par l'Andra n'appellent pas de remarque particulière de la part de l'IRSN.

Pour ce qui concerne les exigences quantitatives ou qualitatives [43], l'Andra précise qu'elles seront connues au moment du dépôt de la DAC. Aussi, s'agissant en particulier des exigences de confinement assignées au colis de déchets primaires MAVL, l'IRSN considère que l'engagement 2014 E8.1 [1] pris par l'Andra dans le cadre de l'examen du dossier « Maîtrise des risques en exploitation », ainsi que la demande 2015 D1 [1] de l'ASN formulée suite à ce même examen en 2015, restent d'actualité. Enfin, l'IRSN note de manière générale que l'engagement 2010 E1 [1] relatif à la définition des critères d'acceptation des colis de déchets dans le modèle d'inventaire de dimensionnement, pris par l'Andra à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 », n'est pas soldé.

Compte tenu des éléments mentionnés *supra*, l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, à l'échéance de la DAC, des spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo, définissant l'ensemble des exigences déclaratives, quantitatives et qualitatives assignées aux colis primaires HA et MAVL, en cohérence avec la conception et la démonstration de sûreté. Ce point fait l'objet de l'engagement E4-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

## 3.2 INVENTAIRE RADIOLOGIQUE DE REFERENCE

L'inventaire radiologique de référence des colis à stocker est établi à partir des données radiologiques transmises par les producteurs de déchets, ces données étant rassemblées dans des « dossiers de connaissances » des familles de déchets constitués selon la spécification de l'Andra. Le recensement des familles de colis de déchets, conditionnés ou non, et l'établissement des dossiers de connaissances s'effectuent dans le cadre des relations entre l'Andra et les producteurs de déchets [163]. Pour rappel, une famille de colis représente un ensemble de colis présentant des caractéristiques (notamment procédé de fabrication, contenu chimique et radiologique, puissance thermique, niveau d'irradiation) similaires. L'inventaire au stade du DOS est relatif à l'ensemble des 98 familles de colis de déchets référencées dans le PIGD-D [162] ; les déchets en réserve et les combustibles usés ne sont pas pris en compte.

### 3.2.1 ETAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES - DONNEES DE BASE

Les données utilisées pour élaborer l'inventaire radiologique correspondent à l'état des connaissances issues des producteurs, disponibles au 05/11/2014. L'Andra a établi un état des lieux de ces connaissances [115] et indique notamment que :

- les dossiers de connaissances de 25 familles de colis du PIGD-D [162] sont manquants ;
- des évolutions de conditionnement prévues pour 10 familles de colis du PIGD-D remettent en cause les inventaires radiologiques présentés dans les dossiers de connaissances à l'échelle des colis de ces familles ;
- le périmètre de 26 familles de colis a évolué entre l'établissement du dossier de connaissances et celui du PIGD-D.

Le tableau en Annexe T7 regroupe les familles concernées par cet état des lieux.

Les familles de colis du PIGD-D dont les dossiers de connaissances sont manquants et celles dont les évolutions de conditionnements conduisent, selon l'Andra, à une modification de l'inventaire radiologique représentent respectivement environ 9 % et 16 % de l'inventaire total en nombre et en volume des colis. Ces familles de colis

correspondent, pour les déchets HA, aux déchets vitrifiés à produire par le traitement des combustibles usés des réacteurs EL4 (COG-900), Superphénix et Phénix (COG-830), ceux du CEA Civil (COG-880) et du CEA DAM (COG-890), aux déchets technologiques provenant des ateliers de vitrification (COG-850) et aux déchets issus des colonnes d'éluion d'ELAN IIB (COG-860), supposés être conditionnés en conteneurs standards (CSD). Pour les déchets MAVL, ces familles de colis correspondent en majorité à des colis à produire à partir de déchets existants (crayons sources primaires et secondaires REP et autres sources scellées diverses (EDF-110), déchets activés de démantèlement des REP du parc actuel (EDF-100), déchets de l'AMI Chinon (EDF-120), déchets divers contenant du B<sub>4</sub>C issus des phases d'exploitation et de démantèlement du RNR Superphénix (EDF-250)) ou de déchets dont la production est prévue (déchets de structure à produire à partir du traitement des combustibles usés des réacteurs EL4 (COG-550), Superphénix et Phénix (COG-450) et de ceux du CEA Civil (COG-530) et du CEA DAM (COG-540), déchets provenant des opérations de reprise et conditionnement de déchets (RCD) des poubelles de la fosse ATTILA (COG-480), de CDE DEM des usines MELOX (COG-510), UP2-400, UP2-800 et UP3 (COG-500), des installations CFCa CADARACHE (COG 520) et du centre CEA Valduc (COG-460), fûts contenant des boues de filtration cimentées provenant de l'installation STEMA (CEA-1140), fûts en acier issus du reconditionnement de conteneurs bétons dits « Blocs sources » (CEA-450) et déchets collectés par l'Andra conditionnés en conteneur 870 L (AND-000)).

Par ailleurs, les familles de colis du PIGD-D présentant, selon l'Andra, des évolutions en termes de masse de déchets par colis ou d'activité massique moyenne, représentent environ 36 % et 16 % de l'inventaire total en nombre et en volume du PIGD-D. Pour les déchets HA (18,5 % en nombre et 9,5 % en volume), il s'agit de familles de colis de déchets à produire (conteneurs standards de déchets vitrifiés ou CSD-V, provenant de combustibles UOX, URE et MOX (COG-200) et des CSD-V produits suivant la spécification 300 AQ 060 (COG-800)). Pour les déchets MAVL (17,5 % en nombre et 6,5 % en volume), il s'agit essentiellement de familles de colis de déchets dont la production est finie et dont la majorité (11,5 % en nombre et en volume) fait l'objet des évolutions de conditionnement mentionnées *supra*.

Compte tenu de la démarche de construction de l'inventaire radiologique présentée au chapitre 3.2.2 suivant, l'IRSN estime que l'absence de dossier de connaissances, les évolutions de conditionnement ou les évolutions en termes de masse de déchets ou d'activité massique moyenne identifiées par l'Andra pour certaines familles de colis, ne devraient pas être de nature à modifier significativement l'inventaire radiologique retenu dans les études de sûreté.

### 3.2.2 DEMARCHE DE CONSTRUCTION DE L'INVENTAIRE RADIOLOGIQUE

Afin de tenir compte de l'état des connaissances sur les déchets et incertitudes relatives aux données transmises par les producteurs, l'Andra a notamment :

- défini des « périmètres d'analogies » pour les familles sans dossier de connaissances ;
- attribué un « niveau de connaissance » à chacune des familles de colis ;
- appliqué des facteurs de marge modulés en fonction du niveau de connaissance de chaque famille de colis.

Les facteurs de marge retenus par l'Andra, les niveaux de connaissances et d'incertitudes à couvrir sont rassemblés dans le Tableau 5 ci-après.

Facteur de marge	Niveau	Connaissances/incertitudes
10	0	Familles pour lesquelles l'Andra ne dispose pas d'élément ; les inventaires radiologiques des familles de colis relevant de ce niveau sont déterminés par application d'un périmètre d'analogies
5	1	Familles comportant des incertitudes résiduelles sur l'inventaire radiologique susceptibles d'être réduites ; les familles de colis de déchets pour lesquelles l'inventaire radiologique n'a pas été mis à jour au stade actuel pour tenir compte d'une évolution de conditionnement entrent dans cette catégorie
2	2	Niveau de connaissance intermédiaire
1,5	3	Incertaines résiduelles faibles sur l'inventaire radiologique ; familles de colis dont la production est terminée ou en cours

**Tableau 5 : Niveaux de connaissance retenus pour déterminer l'inventaire de référence et facteurs de marge associés [40]**

La construction de l'inventaire comporte, de manière schématique, les étapes suivantes.

- Traitement des données de chaque famille de colis dotée d'un dossier des connaissances (niveaux 1, 2 ou 3)

Les valeurs d'activité de chacun des 144 radionucléides<sup>13</sup> figurant dans l'inventaire radiologique moyen fourni dans le dossier de connaissances sont pondérées par le facteur de marge correspondant au niveau de connaissance attribué à chaque famille de colis. L'évolution de l'inventaire obtenu est calculée à la date retenue par l'Andra pour la mise en stockage du dernier colis, soit 2140. L'activité massique du déchet, pour une famille de colis donnée, est ensuite recalculée à cette même date.

- Traitement des familles de colis dépourvues de dossiers des connaissances (niveau 0)

Des analogies sont effectuées à partir de familles de colis disposant de dossiers de connaissances. Pour chacun des 144 radionucléides des inventaires moyens de ces familles, évalués à la date 2140, la valeur maximale d'activité massique est retenue. La masse maximale de déchets par colis de ces familles est également retenue. L'inventaire de la famille de colis sans dossier de connaissances est ensuite obtenu à partir de l'inventaire massique maximal, pondéré du facteur de marge qui lui est attribué, et de la masse maximale de déchets par colis.

L'Andra indique par ailleurs qu'à l'échelle de l'inventaire global de Cigéo, l'application des facteurs de marge représente un facteur 2,2 sur l'activité totale évaluée en 2140.

**L'IRSN considère que la démarche menée par l'Andra pour déterminer l'inventaire de référence est raisonnable et que l'application de facteurs de marges aux inventaires des différentes familles de colis du PIGD afin de couvrir les incertitudes liées à l'inventaire radiologique des déchets à stocker constitue une mesure satisfaisante.**

Par ailleurs, l'IRSN observe que les activités totales obtenues pour l'inventaire de référence du DOS présentent une nette augmentation comparées à celles présentées dans le « Dossier 2005 » (cf. Annexe T8) notamment du fait de la prise en compte d'un nombre plus important de familles de colis de déchets, d'une évolution d'inventaire de certaines familles et de l'application de facteurs de marge. Les activités totales des radionucléides à vie longue mobiles tels que <sup>36</sup>Cl, <sup>129</sup>I et <sup>41</sup>Ca, sont augmentées respectivement d'un facteur 3,5, 2,5 et 16,7.

S'agissant de ces radionucléides à vie longue mobiles, l'Andra indique notamment qu'environ 97 % de l'inventaire radiologique du <sup>79</sup>Se est contenu dans les colis HA et 3 % dans les colis MAVL. L'IRSN attire l'attention sur le fait que

<sup>13</sup> Ils correspondent à l'ensemble des radionucléides de période comprise entre 6 mois et 5.10<sup>10</sup> ans complété par le <sup>242</sup>Cm dont la décroissance génère du <sup>238</sup>Pu, de période égale à 162,8 jours.

la période radioactive retenue au stade du **DOS** (377 000 ans) pour ce radionucléide est environ 6 fois plus grande que celle retenue dans le « Dossier 2005 » (65 000 ans). Il en résulte que l'inventaire radiologique, converti en moles, de <sup>79</sup>Se augmente d'un facteur similaire pour atteindre désormais 36 600 moles dans les déchets vitrifiés. En l'état des connaissances, le sélénium serait présent sous des degrés d'oxydation 0 et +IV dans les verres [219]. L'IRSN relève qu'une publication [218] fait état de la présence dans les verres de sélénium sous la forme d'ion sélénate présentant un degré d'oxydation +VI. Or, le sélénate est un élément plus mobile et soluble dans les argiles que les formes chimiques du sélénium retenues par l'Andra au stade du **DOS**. La conséquence de la prise en compte, dans l'étude d'impact, du sélénium sous forme oxydée dans le Callovo-Oxfordien est analysée au chapitre 4.5.3 relatif aux propriétés de transport dans le Callovo-Oxfordien et au chapitre 8.2.1.4.3 relatif à l'évaluation de la sûreté après fermeture pour le scénario d'évolution normale.

### 3.3 INVENTAIRE CHIMIQUE DE REFERENCE

Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que l'inventaire en toxiques chimiques des colis à stocker dans **Cigéo** est établi à partir des données relatives aux constituants des colis primaires (déchets, matrice, enveloppe). A cet égard, la présence ou non de toxiques chimiques dans les colis primaires de déchets et leur quantification doivent être déclarées par le producteur, tel que spécifié par l'Andra [163]. Les toxiques chimiques suivants ont été retenus pour établir l'inventaire chimique de référence : le plomb (Pb), le bore (B), le nickel (Ni), le chrome (III) et (IV) (Cr), l'arsenic (As), l'antimoine (Sb), le sélénium (Se), le cadmium (Cd), le mercure (Hg) inorganique et organique, le béryllium (Be), le radical CN, l'uranium (U) et l'amiante. L'établissement de l'inventaire en toxiques chimiques des déchets destinés à l'installation **Cigéo** a été, selon l'Andra, entrepris avec une méthodologie comparable à celle utilisée pour l'inventaire radiologique. L'Andra précise que cet inventaire sera présenté et transmis à l'occasion du dépôt du dossier de demande de la **DAC** [115].

Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que les éléments précités ont été retenus en accord avec la réglementation [166][167][169] et en tenant compte des éléments (et matériaux) présents en quantité importante dans l'industrie nucléaire : B, Be, U, amiante. En outre, l'Andra a précisé que les éléments chimiques stables contenus dans les déchets sont également comptabilisés dans cet inventaire.

L'IRSN n'a pas de remarque à ce stade sur les éléments retenus pour établir l'inventaire chimique de référence.

### 3.4 CHRONIQUES DE STOCKAGE

Les producteurs établissent, en lien avec l'Andra, des chroniques prévisionnelles de livraison à **Cigéo** des colis primaires existants ou à produire recensés dans l'inventaire de référence du projet. Si les chroniques de stockage ne sont pas précisément décrites [41][39], le **PIGD-D** [162] auquel fait référence le **DOS** de **Cigéo** présente l'ordonnancement et les flux prévisionnels de livraison des colis. A cet égard, le **PIGD** indique que « *l'exploitation de Cigéo est prévue sur plus d'un siècle. Cette longue durée conduit à développer les ouvrages de stockage par tranches successives. Cigéo est conçu pour être flexible afin de pouvoir s'adapter à d'éventuels changements de la politique énergétique et à ses conséquences sur la nature et les volumes de déchets qui seraient alors produits* ». Il précise également que « *l'ordonnancement de livraison des colis [...] présente un caractère évolutif. Il pourra notamment être ajusté dans le cadre d'une démarche itérative avec la conception de Cigéo pour optimiser la gestion des différents flux (entreposage, transport, stockage) ainsi qu'en lien avec les actions prévues par le Plan*

*national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) 2013-2015 en matière de scénarios de gestion des déchets. [...] Cigéo est conçu pour stocker les colis de déchets produits par les installations nucléaires existantes. Certains de ces colis n'étant pas encore produits, le PIGD peut être amené à évoluer en fonction des orientations de politique énergétique, des stratégies des industriels et des résultats des études et recherches menées par l'Andra et les producteurs de déchets ».*

Le présent chapitre traite des options de stockages retenues pour les colis MAVL, du principe d'ordonnement de livraison des colis primaires à Cigéo, ainsi que de l'ordonnement présenté dans le PIGD-D [162].

### 3.4.1 OPTIONS DE STOCKAGE DES COLIS MAVL

L'Andra présente [39] trois solutions de stockage pour les familles de colis de déchets MAVL :

- solution n°1 pour la majorité des familles de colis de déchets : le colis primaire est placé dans un conteneur de stockage dit « de référence » à son arrivée à Cigéo ;
- solution n°2 pour quelques familles de colis de déchets : le colis primaire est placé dans un conteneur de stockage dit « renforcé vis-à-vis du confinement » qui assure les mêmes fonctions que le conteneur de « référence » ainsi qu'une fonction supplémentaire vis-à-vis du confinement pour pallier l'incertitude du maintien du confinement du colis primaire une fois stocké en alvéole pour toute la durée de la phase d'exploitation et de réversibilité. Le clavage du couvercle du colis de stockage est actuellement retenu en tant que solution technique de base pour ce conteneur dit « renforcé ». Cela concerne en particulier quelques familles de colis de déchets déjà produites ;
- solution n°3 pour certaines familles de colis de déchets dites « éligibles au stockage direct » : le colis primaire pourrait être stocké directement dans l'alvéole sans mise en conteneur de stockage. Ce type de colis primaire devra satisfaire aux fonctions attribuées à l'ensemble constitué par un colis primaire qui serait mis en conteneur de stockage de « référence ». Ses caractéristiques radiologiques, mécaniques et physico-chimiques devront être compatibles avec le dimensionnement de l'installation sans contribution d'un conteneur de stockage.

Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que l'identification des familles de colis de déchets MAVL pouvant relever des différentes solutions de stockage est en cours d'analyse, sur la base des éléments mis à disposition par les producteurs. En particulier, les familles de colis dont les conditionnements sont encore à l'état de recherche sont envisagées pour un stockage direct sous réserve qu'elles respectent les spécifications d'acceptation des colis primaires à Cigéo associées au mode de stockage direct. Au moment de la DAC, le rapport de sûreté précisera pour chaque famille de colis la solution retenue au regard des éléments de démonstration apportés. Au stade du DOS, l'Andra mentionne uniquement [40] le fait que les familles de colis de type C1PG, CSD-C ou CBFC'2 pourraient être éligibles au stockage direct. S'agissant des colis CSD-C, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction avoir mené une première analyse qualitative concluant au fait que, moyennant certaines dispositions précises, les colis CSD-C ne présentent pas a priori de caractéristique rédhibitoire à leur éligibilité au stockage direct. En particulier, le colis est considéré comme intrinsèquement confinant du fait de sa robustesse en condition d'exploitation et de sa qualification à la chute, en vertu (notamment) des analyses qui ont fondé son autorisation de production et d'entreposage [191], ainsi que du retour d'expérience associé. L'Andra a également précisé au cours de l'instruction qu'à ce stade de la connaissance, les colis primaires de type C1PG ne présentent pas de caractéristique rédhibitoire à leur éligibilité au stockage direct.

La possibilité de stocker directement dans l'alvéole certains colis primaires, sans mise en conteneur de stockage, appelle d'ores-et-déjà les commentaires suivants. L'IRSN attire l'attention sur le fait qu'AREVA retient, pour les colis CSD-C, un mode de contrôle de la criticité par la limitation de la masse de matière fissile par colis et de la géométrie des colis, y compris l'agencement des colis dans les cellules ou les casemates d'entreposage. La solution de stockage n°1 consiste à conditionner 4 colis primaires CSD-C dans un conteneur de stockage en béton, de forme parallélépipédique. Le mode de contrôle de la criticité retenu pour la phase d'exploitation, au stade du **DOS**, est la limitation de la masse de matière fissile pour le colis associée à la géométrie du conteneur et l'agencement des conteneurs dans les alvéoles de stockage. Il convient de noter que ce mode de contrôle de la criticité ne diffère pas de celui considéré pour justifier la sous-criticité de l'entreposage des colis CSD-C sur le site de l'établissement AREVA NC de La Hague. En revanche, l'IRSN souligne que la maîtrise de la criticité dans l'éventualité d'un stockage direct des colis primaires CSD-C n'est pas démontrée au stade du **DOS**. Par ailleurs, l'IRSN remarque que les colis retenus au stade du **DOS** (C1PG, CSD-C et CBF-C'2) sont de forme cylindrique, peu compatible avec la minimisation des taux de vide dans l'alvéole **MAVL**. En outre, en l'absence des spécifications d'acceptation des colis qui seront établies par l'Andra, l'IRSN ne dispose pas d'éléments à ce stade pour se prononcer sur l'acceptabilité en stockage direct de colis primaires.

Enfin, pour ce qui concerne l'identification des familles de colis de déchets **MAVL** pouvant relever des solutions de stockage n°1 à 3, l'IRSN relève que l'engagement 2014 E8.4 [1], relatif aux modes de stockage retenus ou envisagés pour chaque famille de colis de déchets du **PIGD**, pris par l'Andra à l'issue de l'examen du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » n'est pas formellement soldé.

Afin d'optimiser le nombre d'alvéoles de stockage **MAVL**, l'Andra prévoit le co-stockage, au sein d'un même alvéole, de plusieurs familles de colis de déchets différentes présentant des caractéristiques physico-chimiques compatibles. Aussi, l'Andra regroupe en sept catégories (**MAVL1** à **MAVL7**) les familles de colis de déchets **MAVL** :

- **MAVL1** : colis de déchets contenant une quantité significative de sels, hors colis de boues bitumées ;
- **MAVL2** : colis de boues bitumées ;
- **MAVL3** : colis contenant des déchets (ou autre constituant du colis hors matrice) composés de matières organiques ;
- **MAVL4** : colis de déchets non ou faiblement exothermiques cimentés ne contenant ni matière organique ni sels ;
- **MAVL5** : colis de déchets non ou faiblement exothermiques non cimentés ne contenant ni matière organique ni sels, notamment les déchets de structure issus du retraitement des combustibles ;
- **MAVL6** : colis de déchets vitrifiés, non ou faiblement exothermiques, éventuellement après une phase préalable d'entreposage de décroissance qui permet de les déclasser de la catégorie **HA0** ;
- **MAVL7** : colis de déchets sodés.

L'IRSN n'a pas identifié à ce stade du projet d'élément rédhibitoire au co-stockage des familles de colis de déchets **MAVL** retenues dans la même catégorie physico-chimique.

Enfin, certaines pistes d'optimisation pour lesquelles des études sont encore nécessaires, notamment vis-à-vis de la démonstration de sûreté, sont mentionnées dans le **DOS** et seront précisées dans le dossier accompagnant la **DAC**. Pour ce qui concerne le cas particulier des familles de colis de déchets **MAVL** vitrifiés, l'opportunité d'utiliser des bétons dits « bas pH » pour l'ouvrage de certains alvéoles **MAVL** afin d'offrir aux colis de déchets vitrifiés un environnement faiblement alcalin, plus favorable à leur comportement long terme, est citée. L'alternative au

stockage de ces colis en alvéoles MAVL, consistant à les placer en intercalaire des colis de déchets vitrifiés HA fortement exothermiques, est également envisagée par l'Andra. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que « *cette option aujourd'hui à l'étude offre des gains technico-économiques potentiels en termes de réduction du nombre d'alvéoles et de l'extension du quartier MAVL, mais aussi du point de vue de la lixiviation à long terme du verre, qui se déroulerait dans un environnement non cimentaire plus favorable* ».

A cet égard, l'IRSN rappelle sa remarque formulée au chapitre 5.1.8.2, à savoir qu'un environnement cimentaire apparaît chimiquement peu compatible avec le stockage de verres et que la piste d'optimisation consistant en un stockage des colis de déchets vitrifiés MAVL en intercalaires des colis de déchets vitrifiés HA en alvéole de stockage HA présente indéniablement de meilleures garanties du point de vue du comportement à long terme. L'IRSN convient toutefois que le choix de l'option de stockage des colis de déchets vitrifiés MAVL reste ouvert et qu'il devra être fondé sur une analyse globale prenant en compte l'ensemble des implications de ce choix, en particulier en termes d'entreposage, d'optimisation du volume de stockage et de la sûreté en exploitation et après fermeture.

### 3.4.2 PRINCIPE D'ORDONNANCEMENT DE LIVRAISON DES COLIS PRIMAIRES

Les principes retenus dans le PIGD-D pour l'ordonnancement de livraison des colis [162] sont fondés sur les hypothèses suivantes :

- une montée en puissance progressive de Cigéo sur la période 2025-2029 (tranche 1) ;
- une exploitation continue du stockage jusqu'en 2140 ;
- un ordonnancement des livraisons des colis MAVL visant à optimiser au mieux l'ouverture et l'exploitation des alvéoles ;
- une mise en stockage de déchets MAVL jusqu'en 2095 ;
- une mise en stockage des déchets HAO dans un quartier dédié sur la période 2026-2035 ;
- une mise en stockage des déchets HA fortement exothermiques à partir de 2075, permettant à ces derniers de bénéficier d'une décroissance thermique notable ;
- une fin d'exploitation de Cigéo à l'horizon 2140.

Ces hypothèses présentent des différences avec le calendrier de Cigéo donné dans le PDE [41] (cf. chapitre 2.4.2). En particulier, le PIGD-D [162] ne prend pas en compte le planning des essais de la phase industrielle pilote qui entraînera un décalage de quelques années pour le début de la réception des colis sur Cigéo. En effet, le PDE [41] prévoit explicitement une phase industrielle pilote de 2025 à 2035 comprenant des essais « en inactif » dès 2025 et des essais « en actif » dès 2029 avec des colis MAVL et HAO. Le passage en exploitation courante est alors prévu vers 2035 et la réception des premiers colis de déchets HA fortement exothermiques est envisagée vers 2070. Enfin les opérations de fermeture, partielle puis définitive, sont prévues vers 2150.

Compte tenu de ces éléments, il convient dans le présent chapitre ainsi que dans le chapitre 3.4.3 suivant de bien distinguer la phase industrielle pilote prise en compte dans le PDE [41] de la tranche 1 qui correspond à la première période d'exploitation courante du stockage. Le PNGMDR 2016-2018 précise à cet égard que la phase industrielle pilote doit permettre « *d'une part, de conforter la démonstration de sûreté et, d'autre part, de démontrer la capacité de l'installation à monter progressivement vers une cadence industrielle de stockage* » (cf. article 55 de l'arrêté du 23 février 2017 [232]).

S'agissant des principes d'ordonnancement de livraison des colis primaires présentés dans le PIGD-D [162], l'Andra distingue les colis primaires de déchets HA0, modérément thermiques, des colis primaires de déchets HA1/HA2, dont la puissance thermique plus importante implique une phase d'entreposage préalable avant leur expédition à Cigéo afin que leur activité, et corollairement leur dégagement thermique aient suffisamment décru pour qu'ils puissent être transportés et stockés [41]. Ainsi, ils ne seront pas expédiés vers Cigéo avant 2075. Entre la mise en service de Cigéo et 2075, seuls des déchets MAVL et HA0 seront donc reçus sur le site. L'Andra envisage la réception en parallèle de déchets HA0 et MAVL dès la phase industrielle pilote, afin d'exploiter les installations de Cigéo avec des colis de déchets représentatifs de l'ensemble de l'inventaire. Pour ce qui est de cette phase industrielle pilote, l'IRSN rappelle avoir estimé, dans son avis relatif au plan de développement des composants du projet Cigéo [36], qu'une durée de dix ans pour celle-ci n'est vraisemblablement pas suffisante et n'intègre aucun aléa de réalisation des essais.

Pour ce qui concerne les capacités d'entreposage actuellement disponibles sur les sites des producteurs de déchets, l'Andra indique [41] qu'elles « ne suffisent pas à gérer l'ensemble des déchets inventoriés avant leur expédition vers Cigéo. Aussi, des projets de nouveaux entrepôts sont gérés par les producteurs. Au final, les capacités d'entreposage des producteurs pourront s'adapter au planning d'exploitation de Cigéo ». S'agissant en particulier des colis de déchets produits d'ici 2025, le PIGD-D indique qu'ils seront entreposés « sur les sites de production ou de conditionnement dans l'attente de la mise en exploitation du centre de stockage. Les exploitants attribuent généralement aux entrepôts existants une durée prévisionnelle d'exploitation d'une cinquantaine d'années ». A ce sujet, l'IRSN rappelle qu'EDF, le CEA et AREVA doivent, dans le cadre du PNGMDR 2016-2018 (cf. arrêté du 23 février 2017 [232]) remettre « avant le 30 juin 2017 les besoins en entreposages futurs pour toutes les familles de déchets HA et MAVL, portant au minimum sur les vingt prochaines années. EDF, le CEA et AREVA étudient dans ce cadre la sensibilité du besoin en entreposages à des décalages dans le calendrier de développement du projet Cigéo ».

### 3.4.3 ORDONNANCEMENT DE LIVRAISON DES COLIS PRIMAIRES

Le PIGD-D [162] présente trois alternatives pour l'ordonnancement de livraison des colis primaires sur Cigéo : une chronique de référence, une chronique résultant d'une analyse de sensibilité à la livraison des colis MAVL et HA0 sur la période 2025-2085 et une chronique résultant d'une analyse de sensibilité à la livraison des colis HA1/HA2 sur la période 2095-2140. Dans chaque cas, la période 2025 à 2029 (tranche 1) reste inchangée. Le flux annuel de colis primaires stockés en tranche 1 de Cigéo augmente progressivement d'environ 200 à 1300 colis pour atteindre un total de près de 3 800 colis stockés à la fin de cette première tranche, ce qui représente environ 1,6 % de l'inventaire. Les colis de déchets prévus d'être réceptionnés sont :

- les déchets technologiques cimentés (CBF-C'2 et CAC, respectivement COG-030 et COG-050), les coques et embouts cimentés (CEC, COG-040) et les colis compactés CSD-C provenant de l'établissement AREVA NC de La Hague (COG-100, COG-070 et COG-110) ;
- les colis de déchets vitrifiés de l'Atelier AVM à Marcoule (CEA-1070 et CEA-1080) ainsi que les colis de solutions molybdiques de produits de fission vitrifiés de l'établissement AREVA NC de La Hague (COG-150).

La chronique de référence propose la mise en stockage des colis MAVL de 2025 à 2095, la mise en stockage des colis de déchets HA0 sur la période 2026-2035 et retient la mise en stockage des déchets HA1/HA2 à partir de 2075. Pour

ce qui concerne les colis [MAVL](#), globalement le flux annuel augmente jusque 2035 pour atteindre environ 3 000 colis par an puis diminue vers 2075, échéance du début de livraison des colis [HA1/HA2](#). Le flux annuel de mise en stockage de ces derniers augmente progressivement sur la période 2075-2086 pour atteindre un flux moyen de 600 colis primaires par an pour la période 2080-2085 puis 858 colis primaires par an pour la période 2086-2140.

La chronique résultant d'une analyse de sensibilité à la livraison des colis [MAVL](#) et [HA0](#) sur la période 2025-2085 propose un resserrement de la mise en stockage des colis à 2085 au lieu de 2095 en référence. Cette modification conduit à une élévation sensible non précisée du flux annuel en fin de période.

Enfin, la chronique résultant d'une analyse de sensibilité à la livraison des colis [HA1/HA2](#) propose une mise en stockage sur la période 2095-2140 et non plus 2075-2140 comme en référence. Cette alternative conduit à une augmentation progressive du flux annuel sur la période 2095-2099 pour atteindre un flux moyen de 1 180 colis primaires par an pour la période 2099-2140.

Contrairement à ce qui avait été présenté dans le [PIGD-A](#) [161], les déchets technologiques de l'Atelier AVM (CDT-AVM, famille CEA-1110), les déchets vitrifiés Atalante (CEA-350), les verres Piver (CEA-200), les verres de laboratoire provenant de Marcoule (CEA-1190), ainsi que certains colis de déchets bitumés (CEA-1030, COG-020 et COG-420) ne sont plus retenus en tranche 1 de [Cigéo](#). S'agissant en particulier des CDT-AVM, l'IRSN rappelle que leur conditionnement définitif n'est pas défini (cf. chapitre 3.1.3) et considère donc pertinent de ne pas les faire figurer en tranche 1. Pour ce qui concerne les colis de déchets bitumés, l'ASN avait indiqué [29], à l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 » : « *Il est important que les colis placés dans la première tranche soient aussi passifs que possible, c'est-à-dire que leurs caractéristiques soient très peu sensibles aux agressions qu'ils pourraient subir, afin de minimiser les conséquences des incidents qui pourraient survenir durant cette phase et de pouvoir retirer ces colis de manière sûre en cas de nécessité d'intervenir dans les alvéoles ; dans cette perspective, les colis de déchets bitumés ne devront pas être stockés dans cette première tranche d'exploitation* » ; leur non prise en compte en tranche 1 au stade du [PIGD-D](#) [162] répond donc à la demande de l'ASN. Par ailleurs, le [PIGD-D](#) [162] conserve notamment en tranche 1 les colis primaires de déchets vitrifiés faiblement exothermiques issus du traitement de combustibles irradiés dans des réacteurs [UNGG](#) et produits dans l'atelier de vitrification AVM de Marcoule, ainsi que les déchets technologiques cimentés, les coques et embouts cimentés et les CSD-C provenant de l'établissement Areva NC de La Hague. A l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 », l'IRSN a indiqué [27] que le stockage des colis vitrifiés AVM pourrait permettre de fournir un retour d'expérience susceptible d'être mis à profit lors du stockage ultérieur de déchets vitrifiés plus fortement exothermiques et ne voit pas d'obstacle à les retenir en tranche 1. L'IRSN estime également que les déchets technologiques ainsi que les coques et embouts susmentionnés pourraient être stockés en tranche 1 sous réserve que les colis respectent les critères qui seront définis dans les spécifications d'acceptation des colis primaires (cf. chapitre 3.1.6). Les éléments relatifs à la mise en stockage des colis sur la période 2030-2140 (postérieure à la tranche 1) présentés dans le [PIGD-D](#) n'appellent pas de remarque de l'IRSN à ce stade.

Pour ce qui concerne la phase industrielle pilote, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que la « *chronique détaillée de la phase industrielle pilote sera définie ultérieurement, en prenant en compte la version Version E du [PIGD](#) et la réflexion en cours sur ce sujet* ». Aussi, l'IRSN considère qu'au stade du [DOS](#), la demande 2016 D14 [1] de l'ASN, relative à l'établissement de l'inventaire des colis de déchets strictement nécessaire aux essais réalisés pendant la phase pilote et leur chronique de stockage, est toujours d'actualité. A ce sujet, l'indice E du

PIGD [52] a été transmis à l'IRSN avant la fin de l'instruction. Ce document n'a pas été versé au présent examen car cette version ne correspond pas à l'état du projet à fin d'APS (cadre du DOS).

### 3.5 DECHETS EN RESERVE

Le PNGMDR 2016-2018 [239] rappelle que l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement précise que « *les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde* ». Aussi, le PNGMDR 2016-2018 [239] indique qu'il est nécessaire que l'Andra conduise en amont de la DAC de Cigéo des études permettant de vérifier que la conception de Cigéo ne présente pas de caractère réhibitoire à l'acceptation éventuelle de déchets radioactifs issus des installations actuelles susceptibles de nécessiter un tel stockage et qui ne seraient pas inclus dans l'inventaire de référence considéré à ce stade ; ces déchets constituent les « réserves ». Le PNGMDR 2016-2018 [239] demande que des « *études sur les réserves [soient] jointes au dossier de [DAC] de Cigéo déposé par l'Andra [et intègrent] :*

- *une esquisse des concepts retenus pour leur stockage ainsi que des éléments démontrant sommairement la faisabilité d'une démonstration de sûreté ;*
- *la démonstration que la conception retenue pour l'installation de stockage dont la création est prévue préserve la possibilité technique de leur accueil ;*
- *des éléments présentant les modifications éventuelles à apporter aux installations « support » (descenderies, galeries d'accès, installations de surface, ventilation...) et leur impact potentiel sur la démonstration de sûreté de l'installation ;*
- *les jalons d'un programme de R&D qui permettrait de disposer, en temps voulu, de la démonstration complète de la sûreté de leur stockage ».*

Le PNGMDR 2016-2018 [239] demande également que l'Andra remette « *avant le 31 mars 2017 au ministre chargé de l'énergie une proposition de types et de quantités de déchets à inclure dans les réserves. Par ailleurs, et à titre de précaution, l'Andra, en lien avec les producteurs, peut inclure certaines réserves FA-VL dans l'inventaire qui sera soumis dans le cadre de la demande de [DAC] de Cigéo et dans la démonstration de sûreté associée sans pour autant que l'envoi de ces déchets dans Cigéo ne soit considéré comme la solution de référence* ».

Dans le cadre de la présente instruction, l'Andra a transmis un dossier d'adaptabilité de Cigéo pour le stockage des déchets en réserve [48]. Le présent chapitre ne porte que sur l'inventaire de ces déchets.

Les colis de déchets en réserve au stade du DOS comprennent les déchets FAVL pour lesquels un stockage à faible profondeur est par ailleurs à l'étude (déchets de graphite [chemises] issus de la filière UNGG, résines échangeuses d'ions qui pourraient être utilisées pour le démantèlement sous eau des réacteurs UNGG, enrobés bitumineux entreposés à Marcoule et déchets particuliers de petits producteurs et du nucléaire diffus<sup>14</sup>) ainsi que les déchets HA et MAVL qui seraient issus de l'exploitation et du démantèlement d'un réacteur EPR supplémentaire. Dans le cas où un traitement des déchets de graphite visant à réduire leur volume et à faciliter leur stockage à faible profondeur serait retenu, les résidus obtenus au terme des opérations, concentrés en <sup>14</sup>C et <sup>36</sup>Cl, se substitueraient, dans les réserves, aux déchets de graphite.

---

<sup>14</sup> Tels que les sources de détecteurs ioniques, les paratonnerres compactés et les déchets de la Défense nationale.

L'IRSN souligne que la faisabilité industrielle du traitement des déchets de graphite mentionné *supra* n'est, à ce stade, pas acquise. A ce sujet, le PNGMDR 2016-2018 [239] indique qu'« EDF, en collaboration avec le CEA et l'Andra, n'abandonne pas à ce stade la possibilité d'élaborer puis de mettre en oeuvre une solution basée sur un traitement thermochimique de décontamination des graphites irradiés préalablement à leur stockage. Ainsi, un programme de recherche et de veille se poursuit, notamment au travers de l'étude de l'influence du traitement thermique sur la spéciation et le relâchement des radionucléides. Des résultats permettant de statuer sur l'intérêt de mettre en oeuvre une telle solution sont attendus à l'horizon 2017 ». Par ailleurs, compte tenu du changement de stratégie de démantèlement des réacteurs UNGG d'EDF, qui serait réalisé à sec et non plus sous eau, la production des résines échangeuses d'ions considérées dans l'inventaire est incertaine. S'agissant des enrobés bitumineux de Marcoule, l'IRSN rappelle que leur mise en stockage soulève des interrogations relatives à la sûreté de l'installation et qu'il a été recommandé, à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » [16], que les dispositions relatives à la maîtrise du risque incendie en phase d'exploitation soient complétées (cf. chapitre 3.1.3). Le cas des enrobés bitumineux vis-à-vis du risque lié à l'incendie est examiné au chapitre 7.2.1 du présent rapport.

**Compte tenu des éléments précités, l'IRSN considère que l'inventaire des déchets en réserve devrait être consolidé dans le dossier de DAC.**

### 3.5.1 CONDITIONNEMENT DES DECHETS ET INVENTAIRE DES COLIS

L'inventaire des déchets en réserve est utilisé dans l'étude de l'Andra visant à montrer l'adaptabilité de Cigéo à un élargissement de l'inventaire des déchets à stocker [48]. Les colis de déchets en réserve appartiennent en partie à des familles de colis qui n'ont pas encore été produites et dont le conditionnement est encore à l'étude. Aussi, des hypothèses de conditionnement sont définies par l'Andra qui précise qu'« en règle générale, les hypothèses de conditionnement retenues pour les colis de déchets en réserve sont susceptibles de larges évolutions ».

Pour ce qui concerne les déchets FAYL en réserve, il est envisagé de placer les déchets de graphite directement dans un panier disposé dans un conteneur de stockage, sans conteneur primaire. Les résines échangeuses d'ions sont prévues d'être bloquées par une matrice cimentaire ou en résine époxy au sein d'un conteneur en béton de type C1PG. Les enrobés bitumineux de Marcoule sont en cours de reconditionnement en surfûts en acier inoxydable. Les déchets particuliers de petits producteurs et du nucléaire diffus seraient quant à eux placés dans des conteneurs cylindriques en acier de 870 L.

Le Tableau 6 ci-après présente les familles de colis de déchets qui ont été répertoriées comme réserve et les caractéristiques des colis correspondants.

Déchets	Masse en tonnes ou nombre de fûts	Famille de colis	Conteneurs	Volumes conditionnés en m <sup>3</sup>
Déchets de graphite du CEA et d'EDF	2718,3	EDF-3070, CEA-3060, CEA-3070	Conteneur de stockage	11 090
Déchets des silos 115, 130 de La Hague	1021,9	COG-3010, COG-3020	Conteneur de stockage	6 110
Déchets des décanteurs 1 et 2 de La Hague	48,4	COG-3030, COG-3040	Conteneur béton fibres CBF-C'2	168
Résines échangeuses d'ions	400	EDF-5011, EDF-5021, EDF-5031, EDF-5061, EDF-5012, EDF-5022, EDF-5032, EDF-5062	Conteneur béton armé C1PG	3 330
Enrobés bitumineux de Marcoule	32 901 fûts	CEA-6010, CEA-6020, CEA-6030, CEA-6040	Fût en acier inox EIP	14 080
Sources, paratonnerres, déchets divers de la Défense nationale	42 fûts	AND-7000, AND-7010, AND-7020	Conteneur acier cylindrique 870 L	37

Tableau 6 : Déchets FAVL mis en réserve [48]

L'Andra indique [48] que dans le cas où un traitement des déchets de graphite serait retenu, le <sup>14</sup>C contenu dans les résidus pourrait être piégé sous forme de pastilles de carbonate de calcium (éventuellement bloquées par un liant hydraulique) ou de carbonate de calcium et de baryum ; le <sup>36</sup>Cl pourrait quant à lui être piégé par des résines échangeuses d'ions immobilisées par cimentation.

L'IRSN observe que la transposition aux colis primaires de déchets FAVL en réserve, des dispositions retenues par l'Andra pour la mise en conteneurs de stockage conduirait à un volume supplémentaire d'environ 104 000 m<sup>3</sup> de colis de stockage (dont 55 400 m<sup>3</sup> pour les colis d'enrobés bitumineux de Marcoule).

Par ailleurs, au cours de l'instruction, bien que les empilements de graphite ne soient pas pris en compte dans l'inventaire des déchets en réserve à ce stade, l'Andra a fourni le volume de colis correspondant aux empilements des réacteurs UNGG d'EDF et du CEA, en y intégrant les réflecteurs et aires de support, qui est estimé à 65 981 m<sup>3</sup> de colis primaires (cf. Annexe T9). Dans l'hypothèse où il n'y aurait pas de DAC sur le projet de stockage de déchets FAVL, l'IRSN souligne qu'il conviendrait d'intégrer les empilements de graphite dans les réserves de Cigéo. A ce sujet, l'IRSN considère que l'engagement 2013 E1.2 pris par l'Andra [1] à l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 », relatif aux hypothèses retenues pour l'évaluation des quantités de déchets graphites comptabilisées en réserve, est toujours d'actualité. L'IRSN note par ailleurs que le conditionnement (matrice et/ou blocage) des déchets FAVL en réserve n'est pas défini à ce stade. L'inventaire en nombre et volume des colis correspondants peut donc varier significativement selon l'état de connaissances des déchets et l'adéquation des procédés de conditionnement à mettre en œuvre en vue de leur traitement et stockage.

S'agissant des déchets en réserve correspondant au fonctionnement et au démantèlement d'un réacteur EPR supplémentaire, l'Andra prend comme hypothèse qu'ils seraient conditionnés selon des procédés identiques à ceux utilisés pour les déchets similaires issus du parc électronucléaire actuel. Le Tableau 7 ci-après présente les familles de colis de déchets associées et les volumes de colis primaires.

Catégorie	Déchets	Famille de colis	Conteneurs	Volumes conditionnés en m <sup>3</sup>
HA	Déchets vitrifiés	COG-200	CSD-V	215
MAVL	Déchets de structure	COG-120	CSD-C	200
MAVL	Déchets activés d'exploitation	EDF-080	C1PG	60
MAVL	Déchets activés de démantèlement	EDF-100	C1PG par hypothèse d'étude	275

**Tableau 7 : Déchets mis en réserve correspondant au fonctionnement et au démantèlement d'un réacteur EPR supplémentaire [48]**

Les volumes indiqués pour les colis primaires sont en accord avec une masse de combustibles usés d'environ 1 690 tML compatible avec la gestion initiale prévue pour ce type de réacteur (rechargement en UO<sub>2</sub> enrichi à 4,2 % en <sup>235</sup>U par tiers de cœur tous les 18 mois durant 50 ans).

Pour ce qui concerne le volume total des déchets considérés par l'Andra au stade actuel en réserve, l'IRSN observe qu'il présente peu d'évolutions comparé à l'inventaire des réserves présenté dans le PIGD-A [161]. L'IRSN remarque par ailleurs que la valeur d'environ 104 000 m<sup>3</sup> correspondant aux colis de stockage des déchets en réserve est significative par rapport aux 400 000 m<sup>3</sup> évalués pour les colis de stockage de déchets MAVL de l'inventaire de référence du PIGD-D (cf. chapitre 3.1). L'IRSN rappelle que le PNGMDR 2016-2018 [239] demande que l'Andra remette « avant le 31 mars 2017 au ministre chargé de l'énergie une proposition de types et de quantités de déchets à inclure dans les réserves ».

### 3.5.2 INVENTAIRE RADIOLOGIQUE

Pour ce qui concerne l'établissement de l'inventaire radiologique des déchets en réserve, l'Andra indique dans le dossier d'adaptabilité [48] appliquer l'approche dite « enveloppe » retenue pour la sûreté après fermeture du projet Cigéo au stade du DOS, les inventaires radiologiques des colis en réserve étant définis suivant la même méthode que les autres colis de déchets (cf. chapitre 3.2). L'Andra précise que dans le cas d'une décontamination des déchets de graphite par traitement thermique (empilements compris), les principaux radionucléides à période longue extraits des déchets dans les résidus de traitement à prendre en charge par Cigéo seraient le <sup>14</sup>C et le <sup>36</sup>Cl. L'activité totale en <sup>14</sup>C serait d'environ 880 TBq et celle en <sup>36</sup>Cl serait de 2,2 TBq.

L'Andra indique que l'ajout des déchets en réserve conduirait à une augmentation de 2,2 % de l'inventaire radiologique de référence de Cigéo. Cette augmentation serait due essentiellement aux colis de déchets vitrifiés induits par un réacteur EPR supplémentaire. L'activité des autres déchets en réserve n'apporterait qu'une augmentation de 0,3 % de l'inventaire radiologique de référence de Cigéo, que cela soit dans le cas d'un stockage des déchets de graphite en réserve ou dans le cas d'un stockage des résidus de traitement de l'ensemble des déchets de graphite. L'augmentation en <sup>36</sup>Cl atteindrait 5 % dans le scénario de traitement de l'ensemble des déchets de graphite. S'agissant en particulier de l'inventaire radiologique des déchets de graphite, le PNGMDR 2016-2018 [239] précise qu'« EDF, le CEA et l'Andra ont mis en place des programmes d'études et de recherches pour préciser le contenu radiologique des déchets de graphite et évaluer leur comportement en stockage. Une attention particulière a été portée à l'inventaire en <sup>36</sup>Cl et en <sup>14</sup>C, qui constituent les principaux contributeurs à l'impact radiologique à long terme. Les travaux de caractérisation menés jusqu'au début de l'année 2015 par le CEA et EDF sur leurs déchets de graphite ont ainsi conduit à une réduction notable de l'inventaire radiologique en <sup>36</sup>Cl, par rapport aux hypothèses conservatives antérieures retenues pour les études de stockage. L'inventaire radiologique estimé en <sup>36</sup>Cl (essentiellement constitué par les déchets CEA et EDF précités) dorénavant en vigueur est ainsi de

l'ordre de 2 TBq, ce qui constitue toujours une valeur conservative ». Le PNGMDR indique en outre que « La connaissance sur ces déchets devra toutefois être consolidée dans les années à venir ».

Le Tableau 8 suivant présente les radionucléides de période supérieure à 100 ans dont l'activité dans le stockage augmenterait de plus de 3 % avec l'accueil des déchets en réserve.

Radionucléide	Période en années	Scénario de stockage des déchets de graphite du CEA et d'EDF (chemises)		Scénario de traitement des déchets de graphite (empilements et chemises)	
		Activité des colis de déchets en réserve en Bq	Facteur d'accroissement de l'inventaire de Cigéo	Activité des colis de déchets en réserve en Bq	Facteur d'accroissement de l'inventaire de Cigéo
<sup>232</sup> Th	1,41E+10	2,92E+14	5	idem	idem
<sup>226</sup> Ra	1,60E+03	4,68E+15	4,8	idem	idem
<sup>39</sup> Ar	2,69E+02	1,31E+13	1,4	3,41E+13	2,1
<sup>137</sup> La	6,00E+04	1,92E+09	1,4	8,20E+09	2,6
<sup>158</sup> Tb	1,80E+02	7,71E+08	1,2	1,13E+09	1,4
<sup>40</sup> K	1,27E+09	6,29E+08	1,07	2,80E+09	1,3
<sup>238</sup> U	4,47E+09	4,85E+12	1,07	idem	idem
<sup>81</sup> Kr	2,10E+05	3,22E+08	1,06	7,12E+09	2,4
<sup>14</sup> C	5,70E+03	1,45E+15	1,04	3,54E+15	1,1
<sup>129</sup> I	1,61E+07	1,46E+11	1,04	idem	idem
<sup>166m</sup> Ho	1,20E+03	1,58E+12	1,04	1,80E+12	1,04
<sup>63</sup> Ni	1,01E+02	2,46E+17	1,04	idem	idem
<sup>59</sup> Ni	7,60E+04	2,54E+15	1,03	idem	idem
<sup>36</sup> Cl	3,01E+05	8,26E+12	1,03	1,24E+13	1,05
<sup>245</sup> Cm	8,50E+03	3,41E+14	1,03	idem	idem
<sup>41</sup> Ca	1,03E+05	1,74E+12	1,02	6,97E+12	1,08
<sup>236</sup> Np	1,52E+05	8,73E+08	1,02	1,42E+09	1,03
<sup>154</sup> Dy	3,00E+06	<1	1	5,50E+08	1,11
<sup>202</sup> Pb	5,30E+04	2,50E+02	1	5,49E+08	1,11

**Tableau 8 : Radionucléides de période supérieure à 100 ans dont l'activité dans le stockage augmenterait de plus de 3 % avec l'accueil des déchets en réserve [48]**

Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que les augmentations observées pour le <sup>232</sup>Th, le <sup>226</sup>Ra, l'<sup>39</sup>Ar, le <sup>137</sup>La et le <sup>81</sup>Kr proviennent notamment de la méthodologie retenue pour l'élaboration de l'inventaire radiologique, fondée sur l'application de facteurs de marge modulés en fonction des informations relatives aux différentes familles de colis intégrées dans l'inventaire des déchets en réserve. Les aspects liés à l'impact de l'augmentation de l'inventaire radiologique de référence du fait de la prise en compte des déchets en réserve sont examinés au chapitre 8.2.6 du présent rapport.

### 3.5.3 INVENTAIRE CHIMIQUE

L'Andra souligne [48] que, parmi les colis de déchets en réserve, les enrobés bitumineux de Marcoule, les résines échangeuses d'ions et les résidus concentrés en chlore contiennent des espèces chimiques susceptibles d'induire une perturbation saline (en raison du relâchement de nitrates ou sulfates) ou organique (du fait de la formation par dégradation des déchets organiques de produits de dégradation hydrosolubles, complexants potentiels des radionucléides et susceptibles d'augmenter leur solubilité et/ou de modifier leur rétention par l'ouvrage ou l'argilite). Ces aspects sont examinés aux chapitres 5.4.3.2 et 5.4.3.3 du rapport.

L'IRSN note l'absence d'information précise relative à l'inventaire chimique des déchets mis en réserve. L'IRSN estime qu'il conviendrait que l'Andra indique au moment du dépôt du dossier de DAC si les colis de déchets en réserve sont de nature à introduire dans le stockage des éléments chimiques différents de ceux déjà identifiés

et inventoriés pour les colis de déchets en référence. L'IRSN rappelle à cet égard que l'Andra a précisé que l'inventaire en toxiques chimiques des déchets destinés à l'installation Cigéo sera présenté et transmis à l'occasion du dépôt du dossier de demande de la DAC [115] (cf. chapitre 3.3).

## 3.6 COMBUSTIBLES USES

Dans le cadre de la présente instruction, l'Andra a transmis un dossier d'adaptabilité de Cigéo pour le stockage des combustibles usés [47]. Le présent chapitre traite de l'inventaire de ces combustibles usés qui n'avait pas été présenté par l'Andra depuis le « Dossier 2005 ».

### 3.6.1 SCENARIOS ET TYPOLOGIES DE COMBUSTIBLES USES

Le stockage direct de combustibles usés a été intégré au titre de l'adaptabilité du projet selon deux possibles scénarios d'évolution de la stratégie de production électronucléaire française :

- un premier scénario, dit « scénario variante du scénario Industriel 2011 », se base sur une durée moyenne d'exploitation de 50 ans pour les 58 tranches REP et l'EPR Flamanville mais limite le traitement des combustibles usés aux seuls combustibles UOX. Il conduirait au stockage direct de l'ordre de 14 500 assemblages de type URE et MOX usés (issus des réacteurs REP et RNR). Ce scénario pourrait correspondre à une hypothèse de non-déploiement d'un futur parc de RNR. Ce sont en effet ces réacteurs qui justifient le traitement des combustibles usés MOX (REP et RNR) et URE du fait des importantes quantités de plutonium nécessaires à leur démarrage. Néanmoins, ce scénario suppose que l'ensemble du plutonium issu du traitement des UOX est mono-recyclé dans des réacteurs actuellement en service aptes à l'utiliser sous forme de combustible MOX ;
- un second scénario, dit « scénario 2 de l'Inventaire National 2012 » correspond au non-renouvellement de la production électronucléaire avec l'hypothèse d'une durée d'exploitation de 40 ans du parc de réacteurs et un arrêt du traitement des combustibles à l'horizon 2019 en vue d'atteindre un stock de plutonium nul en fin d'exploitation du parc. Ce scénario destinerait au stockage direct environ 57 300 assemblages combustibles de tous types (UOX, URE et MOX).

Les scénarios mentionnés *supra* résultent d'une mise à jour effectuée par l'Andra en 2012, en collaboration avec EDF, des hypothèses présentées dans le « Dossier 2005 », incluant la mise à jour du périmètre de combustibles à considérer, y compris l'intégration des combustibles RNR et de leurs quantités. Pour ces scénarios, l'Andra précise que le début de mise en stockage de combustibles usés n'interviendrait pas avant 2085.

Par ailleurs, pour ce qui concerne les combustibles issus des réacteurs civils et militaires du CEA et les combustibles EL4 d'EDF l'Andra précise que « *si ces combustibles étaient considérés comme des déchets, des études ad hoc seraient à mener pour vérifier la faisabilité de leur stockage direct. Cela concerne plus particulièrement certains combustibles posant des questionnements particuliers par rapport aux combustibles REP tels que la réactivité des combustibles métalliques en présence d'eau et la maîtrise du risque de criticité pour des combustibles à fort taux d'enrichissement* ». Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé, d'une part que ces études sont initiées pour les combustibles EL4, d'autre part que le PNGMDR 2016-2018 demande que les données relatives aux combustibles du CEA soient transmises avant le 30 juin 2017 (cf. article 14 de [232]).

Afin de couvrir la variabilité des combustibles utilisés douze typologies de combustibles à caractère « enveloppe » sont prises en compte par l'Andra dans son étude d'adaptabilité. Les caractéristiques des combustibles considérés

sont reprises en Annexe T10. L'Andra indique que « *bien que les inventaires découlant de chacun des deux scénarios présentés ci-avant soient potentiellement appelés à évoluer, la typologie des combustibles à considérer est stabilisée* ».

### 3.6.2 CONCEPTS ET INVENTAIRE DES COLIS

Comme indiqué au chapitre 2.7.1.2, l'Andra prévoit de réceptionner à Cigéo (dans le cas d'un stockage direct des combustibles usés) les assemblages de combustibles usés, de type UOX, URE ou MOX<sup>15</sup>, conditionnés dans des étuis métalliques cylindriques à raison d'un assemblage par étui, l'ensemble « étui + assemblage » constituant le colis primaire de combustible usé [47]. Les étuis seront en acier inoxydable d'épaisseur 5 mm. L'Andra précise par ailleurs que le colis primaire doit assurer *a minima* le confinement des matières nucléaires depuis sa fabrication jusqu'à son conditionnement en conteneur de stockage. Le conteneur de stockage est composé d'un corps cylindrique et d'un couvercle en acier forgé, à basse teneur en carbone, de même nature que celui du conteneur de stockage des colis de déchets HA vitrifiés (cf. chapitre 2.3.1). Il est prévu de souder le couvercle au corps du conteneur par faisceau d'électrons afin de limiter l'étendue de la zone affectée thermiquement. Un détensionnement thermique de la soudure est d'ailleurs prévu pour atténuer les contraintes résiduelles après soudage. La longueur du conteneur de stockage varie selon l'origine de l'assemblage à stocker, des conteneurs dits « courts » ou « longs » étant destinés aux assemblages de combustibles usés provenant respectivement des REP 900 MWe d'une part, et des REP 1300 MWe, 1450 MWe, de l'EPR 1650 MWe et de Superphénix d'autre part. L'épaisseur du conteneur est comprise entre 53 et 65 mm.

A ce stade, l'Andra présente deux options de conditionnement pour les colis primaires d'assemblages de combustibles usés. La première option consiste à les conditionner en conteneur de stockage mono-assemblage. L'Andra indique que cette option « *présente des similarités dimensionnelles avec les déchets HA vitrifiés, en termes de diamètre du conteneur et de l'alvéole [micro-tunnels de longueur d'environ 100 à 150 mètres]. Elle permet de transposer aux combustibles les principales options techniques du projet Cigéo retenues pour les déchets HA, en particulier le matériau constitutif du conteneur et son épaisseur* ». La deuxième option se traduit par le conditionnement en conteneur de stockage multi-assemblages recevant quatre colis primaires. A cet égard, l'Andra indique que « *l'augmentation de diamètre par rapport aux colis HA introduit des sujets d'étude complémentaires [et que] pour la présente étude, on retient l'hypothèse d'un matériau constitutif de l'enveloppe et d'une épaisseur identiques aux conteneurs mono-assemblage* ». Cette deuxième option ne concerne pas les combustibles MOX, ni les combustibles UOX et URE sous-irradiés, en raison respectivement de leur puissance thermique et de leur réactivité vis-à-vis du risque de criticité, plus élevée que celle des combustibles usés UOX standards. Le Tableau 9 ci-après présente les dimensions et masses des colis de stockage des combustibles usés, selon la provenance des assemblages à stocker [47].

<sup>15</sup> Les assemblages de type UOX et URE contiennent des pastilles d'oxyde d'uranium UO<sub>2</sub> et ceux de type MOX contiennent des pastilles d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (U,Pu)O<sub>2</sub>

	CS mono- assemblage court (REP URE et MOX)	CS mono- assemblage long (REP UOX)	CS mono- assemblage long (RNR- MOX-SPX)	CS multi assemblages courts (REP UOX et URE)	CS multi assemblages longs (REP UOX)
Diamètre hors tout (mm)	470	470	350	1 165	1 165
Longueur hors tout (mm)	4 475	5 225	5 225	4 500	5 250
Masse approximative (tonne)	4	5	3	27	32

Tableau 9 : Dimensions et masses des colis de stockage de combustibles usés [47]

Le Tableau 10 ci-après présente le nombre de colis primaires et de colis de stockage résultant des deux scénarios étudiés et des hypothèses retenues pour les assemblages combustibles et leur conditionnement [47].

Typologie de combustible		Scénario "variante du SI2011"		Scénario 2 de l'IN 2012	
		Nombre de colis primaires	Nombre de colis de stockage	Nombre de colis primaires	Nombre de colis de stockage
RNR MOX-SPX long	Fertile neuf	50	50	50	50
	Fertile irradié	225	225	225	225
	Fissile neuf	405	405	405	405
	Fissile irradié	365	365	365	365
REP MOX court (palier 900 MWe)	G1	1 200	1 200	1 200	1 200
	G2	1 500	1 500	1 500	1 500
	G3	1 300	1 300	1 300	1 300
	G4	4 715	4 715	2 150	2 150
REP URE court 100 % irradié (palier 900 MWe)		4 225	1 055*	2 625	655*
REP URE court sous-irradié (palier 900 MWe)		465	465	465	465
REP UOX court 100 % irradié (palier 900 MWe)		0	0	14 390	3 600*
REP UOX court sous-irradié (palier 900 MWe)		0	0	2 615	2 615
REP UOX long 100 % irradié (autres paliers)		0	0	26 725	6 680*
REP UOX long sous-irradié (autres paliers)		0	0	3 245	3 245
Total		14 450	11 280	57 260	24 455

\* Suivant l'hypothèse d'un regroupement de 4 colis primaires par colis de stockage

Tableau 10 : Nombre de colis primaires de combustibles usés et de colis de stockage associés

L'IRSN estime, sur la base des géométries indiquées [47] pour les conteneurs de stockage, que la première option de conditionnement indiquée pour les assemblages combustibles conduirait, pour le scénario 2 de l'IN 2012, à un volume d'environ 37 000 m<sup>3</sup> pour les colis de stockage. La prise en compte de la deuxième option étudiée à ce stade par l'Andra, de mettre en œuvre des conteneurs mono-assemblages et multi-assemblages pour le stockage des combustibles usés, conduirait pour le scénario 2 de l'IN 2012 à un volume d'environ 68 500 m<sup>3</sup> pour les colis de stockage. L'IRSN examine l'impact d'un tel stockage des combustibles usés sur l'emprise dans la ZIRA de l'installation souterraine au chapitre 4.5.1 du présent rapport.

Les aspects liés à la maîtrise des risques de criticité et d'exposition externe/interne sont examinés respectivement aux chapitres 7.1.3.3 et 7.1.1.4 du présent rapport.

Par ailleurs, l'Andra considère, par analogie avec les conteneurs de stockage de colis de déchets HA, que le matériau constitutif des conteneurs de stockage de combustibles usés est de même nature que celui du conteneur de stockage HA, que leur épaisseur est comprise entre 53 et 65 mm et que leur fonction d'étanchéité serait assurée pendant 4 300 ans en situation de référence et 500 ans en situation enveloppe. L'examen par l'IRSN de l'évolution des conteneurs de stockage HA en acier est présenté au chapitre 5.2 du présent rapport.

L'IRSN considère que les quantités d'assemblages considérés fournissent un ordre de grandeur satisfaisant pour les études d'adaptabilité.

### 3.6.3 PUISSANCE THERMIQUE DES COLIS

L'Andra indique [47] que la puissance thermique des colis à leur mise en stockage dépend de la composition du combustible, de ses caractéristiques d'irradiation, de la période où il est déchargé du réacteur et de son temps de refroidissement. Compte tenu du fait qu'il est envisagé une mise en stockage des colis de combustibles usés à partir de 2085, les temps de refroidissement des assemblages sont compris entre 90 et 120 ans et les puissances thermiques des colis sont inférieures à 1 200 W (cas des assemblages MOX en conteneur de stockage mono-assemblage).

L'IRSN observe que l'augmentation d'environ 30 ans par rapport au « Dossier 2005 » de la durée d'entreposage des assemblages combustibles avant leur mise en stockage conduit à un abaissement de la puissance thermique des colis, ce qui va dans le bon sens afin de limiter la température dans les alvéoles HA pour lesquels un critère de 90°C au niveau de l'argilite est retenu.

### 3.6.4 INVENTAIRES RADIOLOGIQUE ET CHIMIQUE

Les études relatives au stockage de combustibles usés sont réalisées en tenant compte des spécificités des combustibles impactant les fonctions de sûreté en phase d'exploitation de Cigéo puis après fermeture du stockage, en regard des déchets HA vitrifiés, à savoir : « (i) la part augmentée des actinides dans leur dégagement thermique, (ii) le risque de criticité induit par leur contenu en matières fissiles, (iii) un inventaire plus élevé en iode radioactif, et (iv), une part plus ou moins grande d'activité qui doit être considérée comme labile » [47].

L'IRSN relève que les inventaires radiologique et chimique des colis de combustibles usés du parc REP, RNR et de l'EPR n'ont pas été transmis dans le dossier d'adaptabilité. L'IRSN considère qu'il conviendrait que les inventaires radiologique et chimique des combustibles REP, EPR et RNR soient transmis au moment du dépôt du dossier de demande de la DAC.

## 3.7 CONCLUSION

L'inventaire du PIGD-D utilisé dans le DOS a été établi selon la même méthode d'élaboration et les mêmes hypothèses principales que celui du PIGD-A ; en particulier, il s'appuie sur le scénario industriel dit de référence (SI 2011). Aussi, l'IRSN considère que l'inventaire de référence des colis à stocker à Cigéo au moment de la DAC devrait être basé sur un scénario industriel actualisé en accord avec la stratégie retenue par EDF pour gérer le parc REP et le réacteur EPR (durée d'exploitation des réacteurs, type de combustible chargé, etc.). L'IRSN constate par ailleurs que l'inventaire de référence des colis à stocker comprend principalement des colis déjà produits ou à produire selon des conditionnements existants. Cependant, des incertitudes existent sur les hypothèses retenues pour le conditionnement de certains déchets (correspondant à environ 20 % de l'inventaire total du PIGD-D en nombre de colis) ainsi que sur le caractère acceptable au stockage des colis de déchets bitumés (correspondant à environ 18 % de l'inventaire total du PIGD-D en nombre de colis). S'agissant des marges destinées à couvrir les incertitudes sur les volumes de déchets, les modalités de conditionnement et les caractéristiques des déchets, l'IRSN remarque qu'elles sont en majorité incluses dans l'inventaire de référence sans être précisées. Les dites marges sont donc peu lisibles et le conservatisme de l'inventaire de référence des colis à stocker est difficile à évaluer. En outre, l'IRSN souligne

que l'inventaire des colis de déchets qui seront stockés pendant la phase industrielle pilote, devra être précisé dans le dossier de DAC.

Par ailleurs, l'IRSN rappelle qu'il est nécessaire de disposer pour le dossier de DAC des spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo.

Enfin, l'Andra a fourni dans le cadre de l'instruction du DOS des dossiers d'adaptabilité pour le stockage des déchets en réserve et des combustibles usés. L'IRSN relève que de nombreuses incertitudes demeurent quant à l'inventaire des déchets en réserve et que les inventaires radiologique et chimique correspondant au stockage des combustibles usés ne sont pas communiqués au stade du DOS. Des précisions et compléments sont donc attendus au moment de la DAC.

## 4 CONNAISSANCE DU SITE DE MEUSE/Haute-MARNE

Le présent chapitre 4 porte sur l'examen de la pertinence des connaissances du site utilisées par l'Andra en appui de la conception de Cigéo, du programme de creusement et de son analyse de la sûreté de cette installation en exploitation et après fermeture.

S'agissant de l'analyse de sûreté après fermeture (cf. chapitre 6.2 relatif à la démarche de sûreté après fermeture), l'Andra définit deux situations associées au « *domaine d'évolution normale* » : une situation « *de référence* » et une situation « *enveloppe* ». Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que la situation « *de référence* » est fondée sur des données et modèles correspondant « *au meilleur de la connaissance* » et que la situation « *enveloppe* » correspond au fonctionnement du système de stockage « *tel que spécifié dans les exigences applicables* » ou, à défaut d'exigence spécifiée, à la « *borne la plus conservatrice des connaissances acquises pour les composants contribuant aux fonctions de sûreté* » (cf. Figure 73). L'examen par l'IRSN de la pertinence des phénomènes et des valeurs de paramètres retenus par l'Andra pour ces scénarios « *de référence* » et « *enveloppe* » est effectué au regard des connaissances acquises sur les données de site, qui ne sont pas spécifiées, et des incertitudes résiduelles [53][54].

Dans ce quatrième chapitre, l'IRSN examine successivement les connaissances de l'Andra sur le contexte géologique du site, les ressources naturelles qu'il présente et son évolution géodynamique, puis les propriétés géotechniques des couches superficielles. Un chapitre est ensuite dédié à l'analyse des connaissances sur la couche du Callovo-Oxfordien. Enfin, l'IRSN examine les modèles hydrogéologiques de l'Andra utilisés pour son évaluation de la sûreté après fermeture.

### 4.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE

L'Andra rappelle, dans le DOS, l'état des connaissances géologiques sur le secteur de MHM, réunies à partir de la bibliographie et des nombreuses campagnes de reconnaissances qu'elle a menées depuis les années 90 jusqu'en 2012 dans ce secteur. Ces connaissances et les investigations réalisées par l'Andra sont résumées respectivement au chapitre 2.1 et en Annexe T1. L'examen de ces connaissances a déjà fait l'objet de nombreuses instructions, dont les éléments principaux sont rappelés au chapitre 1.3. Aussi, dans le présent chapitre, seuls sont analysés les éléments nouveaux depuis 2012 relatifs au modèle structural général, c'est-à-dire à la géométrie globale des couches et aux failles qui les traversent.

L'Andra a transmis au cours de l'instruction le modèle structural [56] actualisé, résultant de l'ensemble des travaux de reconnaissance géologique précités. L'IRSN note avec satisfaction que dans ce modèle certaines failles de la ZFD sont à présent considérées comme traversant le fossé de Gondrecourt et se prolongeant vers l'Est, en cohérence avec les reconnaissances effectuées sur le terrain par l'IRSN [57]. Par ailleurs, la faille de Vittel, située au Sud du secteur de MHM, constitue une structure d'importance pour l'évaluation de l'aléa sismique après fermeture en raison de son extension régionale. Les connaissances acquises sur cette faille [69] conduisent l'Andra à considérer sa segmentation ; ce point est examiné dans le chapitre 8.1.2.1 relatif à l'aléa sismique après fermeture. En outre, la géométrie des différentes couches constituant l'Oxfordien est examinée au chapitre 4.6 relatif au modèle hydrogéologique. **Le schéma structural régional qui résulte des travaux menés par l'Andra n'appelle pas d'autre commentaire de la part de l'IRSN.**

Pour ce qui concerne la reconnaissance locale du sous-sol au niveau de la ZIRA, l'IRSN observait en 2012-2013 [27], dans le cadre de l'examen des « Etudes remises depuis 2009 », la présence d'anomalies sur le bloc de sismique 3D de 2010, en particulier dans l'Oxfordien calcaire à l'aplomb du cours de l'Orge ainsi que dans le Trias et les couches sus-jacentes dans la moitié Nord de la ZIRA. La superposition de ces indices sismiques, tous orientés Nord-Sud, conduisait l'IRSN à émettre l'hypothèse soit d'un problème de traitement sismique, soit d'une origine tectonique commune. L'Andra attribuait ces anomalies à un artefact de correction de vitesses sismiques et s'était alors engagée (2013 E3.1 [1]) à remettre avant la fin du premier semestre 2013 un rapport présentant et justifiant la méthode de traitement par « kriegeage bayésien<sup>16</sup> » qu'elle retenait pour la conversion des vitesses sismiques en profondeurs, ainsi que les nouvelles cartes isohypses obtenues, ce que l'Andra a effectivement réalisé [58][59][60][61]. L'IRSN estime donc que cet engagement peut être soldé. La stratégie d'implantation de l'installation souterraine au regard des anomalies identifiées dans la moitié Nord de la ZIRA, toujours présentes sur les cartes isohypses obtenues en 2013, est examinée au chapitre 4.5.1 relatif aux propriétés géologiques de la roche hôte. En outre, afin de prendre en compte l'incertitude subsistant sur la nature de ces anomalies, l'ASN a demandé (2013 D3 [1]) à l'Andra de retenir « à titre de précaution dans son évaluation de sûreté de l'installation de stockage un scénario comprenant une ou plusieurs discontinuités traversant le Callovo-Oxfordien afin d'évaluer la robustesse du stockage, même si la vraisemblance d'un tel scénario peut être considérée comme faible ». Ce scénario est examiné au chapitre 6.2.3 du présent rapport.

Enfin, l'Andra s'était engagée (2013 E3.3 [1]) à présenter, dans le dossier accompagnant la DAC, un modèle conceptuel du milieu géologique du site de MHM, prenant en compte les résultats de traitement et d'analyse de l'acquisition sismique 3D réalisée en 2010 sur la ZIRA. L'Andra a indiqué au cours de la présente instruction qu'il n'a pas été réalisé à ce stade de nouvelle interprétation des résultats (hors une interprétation des données sismiques en termes de distribution 3D de propriétés physiques de la formation du Callovo-Oxfordien). **Cette mise à jour du modèle conceptuel de site reste donc attendue dans le dossier accompagnant la DAC.**

## 4.2 RESSOURCES NATURELLES

Le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3] indique que « le site devra être choisi de façon à éviter des zones pouvant présenter un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines » afin de ne pas les stériliser. A cet égard, l'IRSN concluait en 2005 [13] à l'absence de ressource naturelle exceptionnelle gazière, pétrolière, minière ou charbonnière connue dans l'environnement du site qui soit exploitable dans les conditions technico-économiques d'alors. En 2013 [62] à l'occasion du débat public relatif au projet Cigéo et en 2014 [34] à la demande du CLIS de Bure, l'Institut a précisé sa position quant au potentiel géothermique du site de MHM en s'appuyant entre autres sur de nouvelles connaissances scientifiques acquises dans le cadre du programme TAPSS 2000<sup>17</sup>. En l'absence de nouvelles données présentées par l'Andra relatives aux ressources géothermales, le présent rapport rappelle la position de l'IRSN sur ces ressources, puis examine le potentiel de ressources en hydrocarbures, dont les méthodes d'exploitation ont bénéficié d'avancées technologiques notables depuis 2005, au regard des nouvelles données disponibles.

<sup>16</sup> Méthode stochastique d'interpolation spatiale

<sup>17</sup> « Transferts Actuels et Passés dans un Système Sédimentaire aquifère-aquitard ». Réalisation en 2008, sur la commune de Montier-sur-Saulx, d'un forage (EST433) d'étude des formations géologiques profondes et du potentiel géothermique dans le cadre d'un programme ouvert à la communauté scientifique

Pour rappel, les 2 000 premiers mètres du sous-sol du site sont d'âge Mésozoïque et sont présentés sur la Figure 2. Les couches sous-jacentes (c'est-à-dire sous le Trias), d'âge Paléozoïque, sont, pour ce qui concerne les autres couches d'intérêt en termes de ressources naturelles et en descendant en profondeur :

- le bassin du Permien, traversé en grande partie par le forage de Germisay (GER1) à l'Est du secteur de [MHM](#), situé entre environ 2 000 et 4 000 m de profondeur et correspondant à des alternances de roches détritiques altérées, avec notamment des conglomérats et des argilites ;
- le Carbonifère, traversé par des forages de reconnaissance pétrolière à l'Est et au Nord du secteur de [MHM](#) ; il est constitué, d'après les études réalisées par l'IRSN en collaboration avec le BRGM, d'un bassin d'âge Stéphanien pauvre en charbon et schistes d'au moins 1500 m d'épaisseur, surmontant des couches d'âge Westphalien riches en lits de charbon à plus de 5500 m de profondeur.

#### 4.2.1 RESSOURCE GEOTHERMALE

En 2005, l'IRSN considérait comme l'Andra qu'il n'existait pas de potentiel géothermique exceptionnel rentable, aux conditions technico-économiques de l'époque, 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. L'Andra a réalisé en 2007, dans le cadre du programme TAPPS, le forage EST433 de 2 000 m sur la commune de Montiers/Saulx (cf. Figure 1) au centre de la [ZT](#), dont un des objectifs était de reconnaître les réservoirs du Buntsandstein (Trias ; cf. Figure 2) et de caractériser leur potentiel géothermique. Un gradient géothermique normal de 3°C/100m et des caractéristiques communes de l'aquifère supérieur du Trias inférieur acquises notamment au travers de ce forage ont conduit l'Andra à considérer cette ressource comme non exceptionnelle [40].

En 2013, lors du débat public relatif au projet [Cigéo](#), l'IRSN constatait (cf. fiche sur le potentiel géothermique réalisée par l'IRSN à cette occasion [62] ainsi que dans le rapport réalisé en 2014 [34]) l'existence probable d'une ressource de type « Basse Energie » dans le Trias inférieur mais estimait que la rentabilité, voire la faisabilité d'une exploitation géothermique dans le Trias ou dans le Permien étaient incertaines dans le contexte technico-économique du moment et qu'il n'y avait pas de raison de considérer ce potentiel exceptionnel. L'IRSN concluait qu'au regard des critères définis par l'ASN, le potentiel géothermique du secteur de [MHM](#) n'était pas de nature à remettre en cause le choix du site d'implantation du projet [Cigéo](#).

L'IRSN observe par ailleurs qu'il n'a pas été reconnu, sur l'imagerie géophysique réalisée dans le secteur de [MHM](#), de traces permettant d'identifier une activité volcanique actuelle dans les couches sous-jacentes au Trias, qui aurait pu modifier à plus grande profondeur le gradient géothermique normal de 3°C/100m et constituer un intérêt du point de vue géothermique. Aussi, l'IRSN peut raisonnablement confirmer l'absence d'intérêt économique marqué par rapport à d'autres parties du territoire français sur lesquelles un potentiel géothermique est démontré du fait de l'augmentation rapide de la température avec la profondeur (cas par exemple de l'exploitation à Soultz-sous-Forêts dans le Bas-Rhin).

Cependant, l'IRSN considère qu'une évaluation quantitative de la ressource géothermique serait de nature à conforter ces conclusions qualitatives. Aussi, l'IRSN suggère de compléter les études réalisées en effectuant une

évaluation de la puissance thermique maximale pouvant être délivrée par doublets<sup>18</sup> dans toute la ZIRA pour les réservoirs du Trias (tous réservoirs confondus), du Permien et du Carbonifère. Pour les niveaux les plus profonds (température supérieure à 90°C), une évaluation de la puissance électrique pourrait être réalisée.

Les scénarios d'exploitation de la géothermie après la fermeture du stockage qui peuvent être déduits de la présente évaluation, pris en compte par l'Andra au travers d'« intrusions humaines involontaires », sont examinés au chapitre 8.2.5 du présent rapport.

#### 4.2.2 RESSOURCES EN HYDROCARBURES

Les hydrocarbures sont produits par la décomposition (maturation) de la matière organique piégée dans les roches. Selon la profondeur de la roche qui les emmagasine, ils peuvent correspondre à des schistes bitumineux (roche immature : la température et la pression atteintes n'ont pas permis la transformation de la majeure partie du kérogène en hydrocarbures liquides), à du pétrole (atteinte de la "fenêtre à huile", généralement à plus de 60°C c'est-à-dire généralement à plus de 2000 m de profondeur) ou à du gaz (atteinte de la "fenêtre à gaz", au-delà d'environ 130°C, c'est-à-dire 4000 m de profondeur). Deux catégories de ressources en hydrocarbures peuvent être distinguées selon leur procédé d'extraction. Les ressources exploitables par des méthodes dites « conventionnelles » (Hydrocarbures Conventionnels, HC) font l'objet d'une exploitation dans des formations « réservoir » poreuses et perméables. Les ressources dites « non conventionnelles » (Hydrocarbures Non Conventionnels, HNC<sup>19</sup>) sont celles dont l'exploitation requiert des techniques visant à accroître la perméabilité de la roche, par exemple par fracturation hydraulique : il s'agit d'hydrocarbures piégés dans des formations de faible porosité et perméabilité, c'est-à-dire soit dans des roches mères<sup>20</sup>, soit dans des roches en général légèrement plus poreuses et perméables et qui leur sont stratigraphiquement adjacentes.

Pour ce qui concerne l'existence de ressources naturelles exceptionnelles à l'aplomb du site de MHM, l'Andra concluait dans le référentiel géologique de 1999 que « *la zone ne montre pas d'indication d'une ressource naturelle exceptionnelle [du fait de] 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* ». L'IPSN indiquait en 2001 à l'issue de l'examen de ce référentiel que l'Andra devrait toutefois maintenir une veille scientifique sur ce sujet afin de profiter de nouvelles données géophysiques disponibles dans le domaine public ou d'éventuels développements dans le domaine de l'interprétation des données sismiques profondes dans le socle permo-carbonifère. Dans le « Dossier 2005 », l'Andra ajoutait que « *la pauvreté du Stéphaniens en charbon et sa profondeur limitent également son potentiel pour une exploitation gazière éventuelle du gaz de charbon ou "coalbed methane". En effet, si des essais sont en cours au Etats-Unis pour*

---

<sup>18</sup> Un doublet géothermique correspond à un forage de « production » (extraction de l'eau chaude) et un forage de réinjection de l'eau refroidie (notamment pour protéger l'environnement et garantir la pérennité de la ressource).

<sup>19</sup> Il est à noter que la terminologie courante de gaz ou huile de « schiste » est une traduction de « shale » en anglais pouvant porter à confusion, car un schiste désigne en français à la fois cette roche sédimentaire argileuse feuilletée et une roche métamorphique, pour laquelle un mot différent existe en anglais (« schist »).

<sup>20</sup> La « roche mère » est celle dans laquelle la matière organique s'est transformée en hydrocarbure ; celui-ci peut ensuite rester piégé dans la roche mère ou migrer vers une autre roche, appelée « réservoir ».

*l'exploitation de cette ressource à des profondeurs de l'ordre de 1200 m, un enfouissement de 3800 mètres semble définitivement réhibitoire ».*

Depuis lors, l'Andra a actualisé son étude des ressources en hydrocarbures non conventionnels à la lumière des connaissances géologiques [63]. En particulier, sur la base d'une interprétation de profils sismiques dédiée, l'Andra a défini la limite Sud du bassin westphalien (connu pour être riche en charbon), qui passerait approximativement au niveau de la bordure Nord de la **ZT**. Sur la base de ses propres analyses de profils sismiques, l'IRSN observe également la disparition des couches du Westphalien, même si cette limite se situerait un peu plus au Sud (donc dans la **ZT**). L'absence de couche d'âge westphalien à l'aplomb de la **ZIRA** est donc vraisemblable. Toutefois, l'IRSN note la présence de méthane (CH<sub>4</sub>) et d'autres alcanes dissous dans les eaux porales du Callovo-Oxfordien du Laboratoire de **MHM** (0,36 à 1,28 mg/L de CH<sub>4</sub> à 445 m de profondeur et 0,56 à 1,55 mg/L à -490 m [64]), dont la composition isotopique témoigne d'une origine thermogénique, c'est-à-dire d'une formation par enfouissement et non par activité bactérienne [65]. L'IRSN conclut donc à la présence sous-jacente d'hydrocarbures sous forme gazeuse. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que *« l'hypothèse actuellement privilégiée pour expliquer leur présence au niveau de Laboratoire Souterrain est celle de leur formation dans des niveaux sous-jacents et leur migration verticale par diffusion »*. L'IRSN observe que l'Andra n'a pas identifié à ce stade quelle couche serait la roche mère de ce méthane, et si la source pourrait être localisée à l'aplomb du site ou être plus éloignée (par exemple piégeage aux abords d'une des failles régionales). L'IRSN estime que par exemple la réalisation de simulations simples (modèles 1D par exemple) de transport visant à reproduire les concentrations en alcanes mesurées au Laboratoire permettrait de proposer des hypothèses sur leur provenance mesurées dans le Callovo-Oxfordien. Par exemple, il est connu (par exemple [171]) que les schistes cartons du Toarcien sous-jacent constituent une roche mère d'hydrocarbures (Figure 2) ; or, même s'ils n'ont vraisemblablement pas atteint la fenêtre à gaz dans la **ZT** en raison de la faible profondeur d'enfouissement atteinte par le passé (maximum 1 500 m), il est possible qu'une fraction se soit tout de même transformée en gaz et corresponde à cette source de méthane décelée les eaux porales du Callovo-Oxfordien. **L'IRSN suggère ainsi que l'Andra mène des études plus poussées pour préciser la provenance des alcanes présents dans le Callovo-Oxfordien.**

S'agissant plus particulièrement des schistes cartons du Toarcien, l'Andra indique [63] qu'il existe une recherche active dans le monde pétrolier pour tenter d'extraire ces hydrocarbures par cracking thermique *in situ*, et convient qu'une telle ressource en HNC pourrait être exploitée *« si dans le futur des techniques d'exploitation par cracking thermique in situ devenaient opérationnelles et adaptées à l'exploitation de formations profondes »*. En tout état de cause, même en cas d'avancées technologiques notables sur l'extraction de cette ressource, celle-ci ne présente pas *a priori* de caractère exceptionnel étant donné le caractère répandu en France de zones où les schistes cartons ont atteint un niveau de maturation potentiellement plus important.

Plus généralement, l'Andra conclut à l'absence d'HNC dans la série mésozoïque du Bassin parisien sur le secteur de **MHM** dans les conditions d'exploitation actuellement mises en œuvre dans le monde, en raison du trop faible enfouissement des roches mères. En conclusion, l'IRSN convient qu'il n'existe pas de ressource HNC rentable avec des techniques éprouvées à l'aplomb de la **ZIRA**. Cependant, de même que pour le potentiel géothermique, l'IRSN estime qu'une évaluation quantitative de la ressource en hydrocarbures en TEP (Tonne Equivalent Pétrole) serait de nature à appuyer ces conclusions, par exemple en faisant des hypothèses optimistes sur la proportion de roche mère (schistes carton du Toarcien) mature au niveau de la **ZIRA**, et en comparant cette valeur aux ressources d'hydrocarbures estimées sur l'ensemble du Bassin du Paris afin d'illustrer son caractère peu exceptionnel.

De même que pour la géothermie, les scénarios d'exploitation de ressources en hydrocarbures après la fermeture du stockage sont examinés au chapitre 8.2.5 relatif aux scénarios d'intrusion humaine involontaire.

### 4.3 EVOLUTION GEODYNAMIQUE DU SITE

En 2005, l'IRSN estimait que les études réalisées par l'Andra, d'une part sur l'évolution quaternaire du réseau hydrographique et de la géomorphologie en fonction du climat (glaciations) et sur les phénomènes de surrection tectonique, d'isostasie<sup>21</sup> et d'eustatisme<sup>22</sup> d'autre part, avaient permis d'améliorer considérablement la connaissance de la géomorphologie régionale. Deux cartes topographiques géoprospectives étaient calculées (à 500 Ka et 1 Ma), en retenant l'hypothèse majorante d'un maintien des valeurs actuelles maximales d'ablation des plateaux (10 à 30 m/Ma) et d'incision des rivières (30 à 150 m/Ma), en considérant un taux de surrection tectonique égal, voire supérieur, à celui du dernier million d'années (80 à 100 m/Ma). L'IRSN estimait que la prise en compte de telles valeurs était appropriée compte tenu de l'état des connaissances présenté et de l'hypothèse retenue par l'Andra d'un maintien du régime de contraintes actuel pour le prochain million d'années.

Dans le DOS [53], l'Andra présente une nouvelle carte des taux de surrection quaternaires, établie en 2008 et dite « *maximaliste* » (cf. Figure 52), ceux-ci étant directement transposés des taux d'incision évalués à partir d'une compilation des nombreuses données acquises jusqu'en 2008 sur les relations géométriques des terrasses alluviales [67]. Les taux obtenus sont de l'ordre de 80 m/Ma sur le secteur de MHM et jusqu'à des valeurs très élevées, dépassant les 180 m/Ma à 90 km au NNW. Ce scénario d'évolution géomorphologique « *maximaliste* » est considéré par l'Andra au stade du DOS comme enveloppe de l'évolution probable du secteur étudié.

En complément, l'Andra [68] retient une carte de surrection « *réaliste* » (ou « *phénoménologique* » [88]), réalisée en 2011, basée sur une méthodologie différenciant le taux d'incision des vallées et le taux de surrection tectonique (cf. Figure 52). La carte d'incision est corrigée des influences de l'eustatisme et de l'impact des captures de rivières<sup>23</sup> pour obtenir une carte dont les valeurs sont sensiblement revues à la baisse. Cette dernière, de l'ordre de 30 m/Ma sur le secteur de MHM et de 40 m/Ma au NNW, « *tient compte de l'existence d'une composante ancienne du mouvement de surrection des massifs périphériques du bassin de Paris [...] en prenant l'hypothèse minimaliste d'extrapoler les taux estimés dans le bassin jusque sur ces massifs* ». Des valeurs moyennes de surrection sont obtenues pour chaque rivière, puis ensuite extrapolées à l'ensemble du système. De nouvelles données acquises sur le bassin de l'Aube permettent de corréliser les bassins de la Marne et de la Seine et de dessiner un axe NE-SW de surrection au NW du site.

Concernant la méthodologie retenue pour établir la carte de surrection « *réaliste* », l'IRSN estime que la démarche de prise en compte des phénomènes « *externes* » (eustatisme, captures) est pertinente pour déduire les taux de surrection à partir de ceux d'incision. Par exemple, les mesures de taux d'incision des rivières Saulx et Ornain peuvent effectivement être supprimées du modèle car ces rivières ont subi une capture récente par la Marne. Cependant, l'IRSN observe que la disposition spatiale des taux de surrection obtenus est contrôlée par les

<sup>21</sup> Remise à l'équilibre (par des mouvements verticaux) de corps géologiques en raison de leur différence de densité. On parle par exemple d'isostasie glaciaire lorsque la calotte glaciaire provoque un enfoncement du sous-sol (subsidence) sous son poids, ou à l'inverse un soulèvement (surrection) lors de sa fonte.

<sup>22</sup> Variation du niveau des mers

<sup>23</sup> L'érosion régressive d'une rivière au niveau de sa source peut conduire à un rapprochement d'une autre rivière. Cette « capture » par la seconde conduit généralement à un fort accroissement de l'incision au niveau de la première rivière.

corrections effectuées sur les données récoltées (intégrant des hypothèses sur les interactions entre les processus d'érosion, de soulèvement, de régularisation des systèmes fluviaux) et influencée par la méthode d'interpolation retenue. Ainsi, l'étude [68] fait apparaître des différentiels de soulèvement finalement assez limités, au maximum de 40 m sur le secteur de **MHM**, sans toutefois présenter d'estimation de l'impact des incertitudes sur les données et des approximations liées à leur interpolation sur la carte de surrection obtenue. Par ailleurs, même si l'IRSN estime justifié (cf. ci-dessus) que les données des rivières Ornain et Saulx ne soient pas prises en compte, il s'agit de données les plus proches du site, et il est donc regrettable qu'aucune autre donnée ne précise localement cette carte de surrection.

En outre, concernant toujours la carte de surrection « réaliste », la « projection » des taux de surrection vers le futur s'appuie sur des valeurs déterminées pour la période Tertiaire (i.e., depuis 66 Ma). Or, depuis 20 Ma, la région, située en domaine de plateforme intraplaque en périphérie de l'orogène alpin, a subi des changements de régime de déformation importants qui se trouvent ainsi lissés. Sur ce point, l'IRSN note que d'après l'Andra [39], l'état des contraintes tectoniques n'est pas susceptible d'être modifié à l'échelle du prochain million d'années. L'IRSN estime que cette affirmation n'est pas fondée : le contexte géodynamique, certes avec des constantes de temps plus longues, a déjà changé dans les régions périalpines au Plio-quatenaire (Nocquet et al., 2016 [110]) et il ne peut être totalement exclu que ce contexte soit légèrement modifié au cours du prochain million d'années. Ainsi qu'indiqué en 2005, afin de couvrir l'incertitude sur une éventuelle évolution du régime de contraintes actuel au cours du prochain million d'années, l'IRSN considère que des valeurs maximales de surrection, telles que celles retenues dans la carte « maximaliste », doivent être prises en compte dans l'établissement de la carte géoprospective régionale.

Enfin, la période Quaternaire est caractérisée par une succession à haute fréquence des cycles climatiques. L'IRSN estime que de tels événements « transitoires » peuvent laisser un résidu de déformation de la lithosphère. Or, l'Andra ne prend pas en compte, sans le justifier, l'impact potentiel sur la surrection de la succession des cycles glaciaires sur les déformations de grandes longueurs d'onde. Cet impact mériterait d'être évalué.

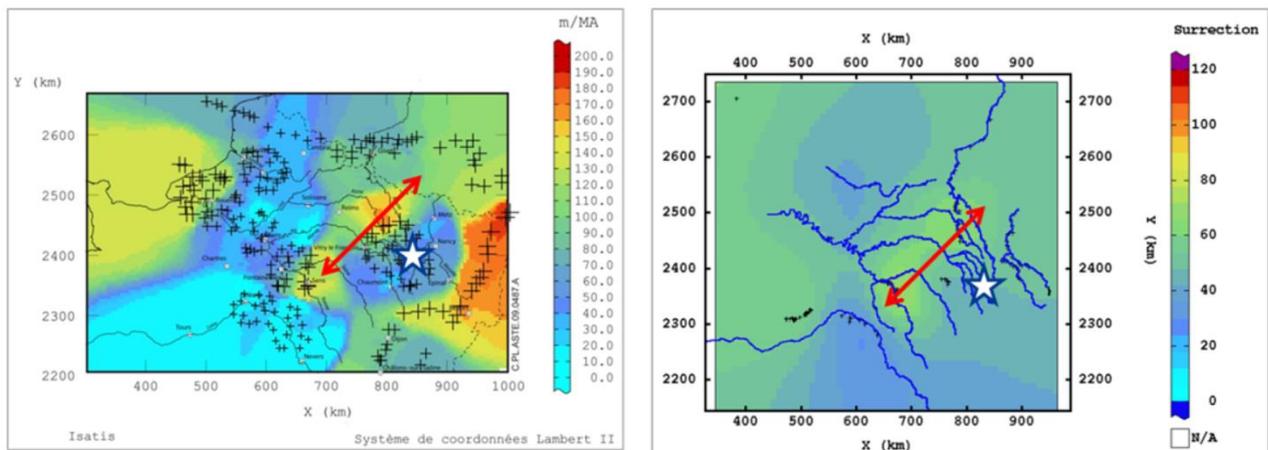


Figure 52 : Modèles de surrection tectonique de 2008 (gauche) dit « maximaliste » et de 2011 (droite) dit « réaliste » [53]

En conclusion, l'IRSN souligne le travail de qualité fourni par l'Andra, en termes de compilation de données de datation des terrasses, mais estime qu'il conduit à une carte dite « réaliste » pour laquelle les incertitudes, non estimées par l'Andra, pourraient être importantes. Par conséquent l'IRSN estime que malgré les efforts fournis pour caractériser les mouvements verticaux passés, il subsiste trop d'incertitude pour convenir de la

robustesse du modèle dit « réaliste » de surrection future du secteur, à prendre en compte dans le modèle hydrogéologique géoprospectif (cf. chapitre 4.6.4.2). A l'inverse, la carte dite « maximaliste » conduit à retenir des taux de surrection très forts, mais qui ont le mérite, selon l'IRSN, d'être clairement enveloppes de la réalité. Or, si l'Andra présente bien dans le DOS une estimation de l'évolution des écoulements à long terme sur la base de chacune des deux cartes de surrection « réaliste » et « maximaliste » (cf. chapitre 4.6.4.2 du présent rapport), l'Andra ne retient que le modèle basé sur la carte « réaliste » pour l'évaluation de sûreté après fermeture (cf. chapitre 8.2.1.2).

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra justifier, dans le dossier de DAC, le cas enveloppe retenu vis-à-vis de la surrection prise en compte dans les simulations hydrogéologiques qui intègrent l'évolution géodynamique future de site de MHM. Ce point fait l'objet de l'engagement E5-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

L'IRSN estime qu'il conviendrait qu'un tel cas enveloppe d'évolution géodynamique du site soit pris en compte pour représenter la situation « enveloppe » du « domaine d'évolution normale ».

## 4.4 CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DE SURFACE

Pour ce qui concerne les futurs bâtiments de surface (cf. description au chapitre 2.2.1 du présent rapport), l'Andra [39] indique que le principal bâtiment nucléaire (EP1) sera semi-enterré, fondé dans les calcaires du Barrois et susceptible d'être atteint périodiquement par la nappe des calcaires sublithographiques. En cours d'instruction, l'Andra a précisé que la zone descenderie et la zone puits seraient aménagées en plateformes dont les niveaux seraient adaptés en fonction de la topographie initiale, qui indique notamment un dénivelé de 11 m entre la plateforme d'EP1 et la plateforme sur laquelle seront implantés les bassins pour la gestion des eaux pluviales. De plus, les dépôts de terrains excavés (verses) seront aménagés pour limiter le risque d'infiltration d'eau dans les calcaires de Dommartin et implantés à un niveau inférieur à la plateforme des puits afin d'éviter toute interaction en cas d'instabilité des dépôts.

Pour ce qui concerne les reconnaissances géotechniques, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction avoir caractérisé la zone descenderie et plus en détail l'emplacement d'EP1, au moyen de profils de sismique réfraction (calibrés pour les 50 premiers mètres de profondeur), de trous à la pelle mécanique, de forages de 30 à 50 m de profondeur avec un suivi géologique, d'une caractérisation géomécanique sur échantillons, d'essais pressiométriques, d'essais cross-hole et d'essais d'eau<sup>24</sup>. Un suivi piézométrique en continu a été initié en août 2016. En revanche, le programme de caractérisation de la zone puits, initié à l'été 2016 avec des profils de sismique réfraction, n'est pas terminé à ce stade. L'Andra prévoit de réaliser un forage carotté dans l'axe de chaque puits et des forages complémentaires (à préciser) dans l'environnement des puits (diagraphies, reconnaissance sismique...). L'IRSN estime satisfaisant le programme de caractérisation géotechnique mis en œuvre dans la zone descenderie et envisagé dans la zone puits.

<sup>24</sup> Les essais pressiométriques consistent en un chargement in situ effectué au sein d'un forage, afin de mesurer un module de déformation du sol. Les essais cross-hole consistent à mesurer les temps de propagation des ondes sismiques entre forages afin de déterminer, en fonction de la profondeur, leurs vitesses sismiques et les paramètres mécaniques des roches entre ces forages. Les essais d'eau (Lefranc, Lugeon, Dupuit...) consistent en un pompage ou une injection d'eau en forage visant à déterminer des propriétés hydrauliques du niveau aquifère.

L'Andra [39] présente dans le [DOS](#) des données géotechniques relatives aux caractéristiques des terrains issues de la bibliographie, sans intégrer de résultats provenant des reconnaissances mentionnées ci-dessus. Aussi, l'IRSN n'est pas en mesure d'évaluer la qualité des matériaux envisagés pour l'aménagement des plateformes (déblais/remblais), des assises de fondations des différents bâtiments ni des terrains au contact des liaisons surface-fond. Il conviendra donc de compléter ce sujet dans le dossier de [DAC](#).

Par ailleurs, il est à noter que les calcaires du Barrois sont potentiellement karstifiés en profondeur (cf. chapitre 4.6.1.1). Au-delà du rôle hydraulique de telles cavités, examiné au chapitre 7.3.2, ces cavités constituent des zones de faiblesse des assises de fondation des bâtiments et, en fonction de leur dimension et de leur position, peuvent générer des désordres sur les ouvrages sus-jacents.

Aussi, en vue d'asseoir l'évaluation de la stabilité des bâtiments en présence de vides karstiques, l'Andra devra préciser, dans le dossier accompagnant la DAC :

- les moyens mis en œuvre pour la détection des cavités ainsi que les dimensions des cavités susceptibles d'être détectables par ces méthodes ;
- les examens complémentaires à conduire lors de l'ouverture des fouilles ;
- le cas échéant, les moyens à mettre en œuvre pour supprimer les cavités accessibles.

Ce point fait l'objet de l'engagement E6-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

## 4.5 LA ROCHE HOTE

### 4.5.1 PROPRIETES GEOLOGIQUES

L'Andra indique [39] que le niveau d'implantation de l'installation souterraine de [Cigéo](#) se situe autour de 525 m. Au cours de l'instruction, l'Andra a présenté un plan de l'architecture souterraine de [Cigéo](#) avec des cotes de profondeur [210] et a précisé la profondeur attendue des unités du Callovo-Oxfordien pour la zone des puits et le milieu des quartiers [HA](#) (Tableau 11).

	Laboratoire souterrain	Puits	Milieu quartiers <a href="#">HA</a>
Toit Callovo-Oxfordien	416,4	446,5	476,1
Toit <a href="#">UT</a>	451,4	476,4	505,7
Toit <a href="#">UA3</a>	473,4	491,6	521
Toit Callovo-Oxfordien-50m	466,4	496,5	526
Toit <a href="#">UA2</a>	491,5	517	546,2
Niveau radier installation souterraine <a href="#">Cigéo</a>		515	554
Toit <a href="#">UA1</a>	516,5	555	583,8
Mur Callovo-Oxfordien	554,8	597,8	630,3

Tableau 11 : Profondeur estimée (en m) par l'Andra des niveaux stratigraphiques recherchés au niveau Laboratoire souterrain (EST210), du barycentre des puits de [Cigéo](#) et à l'aplomb du milieu de la zone [HA](#) sur la [ZIRA](#). [UT](#), [UA1](#), [UA2](#), [UA3](#) : cf. Figure 2.

L'IRSN rappelle qu'au stade du « Dossier Jesq03 », l'Andra présentait deux profondeurs possibles pour l'implantation du stockage : le milieu du Callovo-Oxfordien ou 65 m sous le toit. Au stade du [DOS](#), l'Andra retient le milieu du

Callovo-Oxfordien sans toutefois justifier ce choix. L'IRSN observe qu'il s'agit, au niveau des puits, de l'horizon le plus connu du Callovo-Oxfordien (niveau d'implantation du Laboratoire souterrain, à l'interface UA2-UA3, cf. Figure 2) et convient que les propriétés de la roche hôte devraient être très proches de celles acquises au Laboratoire souterrain. Ainsi, le choix d'une implantation proche du niveau principal du Laboratoire permet de bénéficier des nombreuses connaissances acquises sur ce niveau. Néanmoins, l'IRSN constate que certaines zones de l'installation souterraine seraient implantées à des niveaux décalés jusqu'à une dizaine de mètres au-dessus (quartiers HA) ou en-dessous (Sud du quartier MAVL) du niveau stratigraphique équivalent au niveau principal du Laboratoire, sans qu'il y ait à ce jour de retour d'expérience de creusement d'ouvrages dans ces niveaux. Ainsi, le niveau de connaissance des caractéristiques de la roche n'est pas un critère absolu pour le choix de la profondeur d'implantation de l'installation. De ce fait, tout en respectant l'exigence que se fixe l'Andra du maintien d'une épaisseur de garde saine de 50 m [55], le choix du niveau d'implantation mériterait de résulter d'un bilan des avantages et inconvénients relatifs aux différentes solutions possibles, en particulier un niveau plus profond par exemple afin d'éloigner davantage le stockage de l'aquifère de l'Oxfordien (cf. chapitre 4.6.4.2), ou moins profond par exemple dans un niveau plus carbonaté afin de réduire l'impact de l'endommagement mécanique dû au creusement (cf. avis IRSN sur le « choix de la ZIRA » [24] et « Dossier Jesq03 » [19] ainsi que le chapitre 4.5.4).

Aussi, l'IRSN considère que dans le dossier de DAC, l'Andra devra justifier le choix de la profondeur d'implantation du stockage dans le Callovo-Oxfordien sur la base d'un bilan avantages/inconvénients des différentes options en fonction notamment des propriétés mécaniques de la roche et des épaisseurs de garde, au regard de la sûreté de l'installation en exploitation et après fermeture. Ce point fait l'objet de l'engagement E7-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Par ailleurs, l'IRSN rappelle qu'en 2013, dans le cadre de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 » [27] portant notamment sur les résultats de la reconnaissance du sous-sol par sismique 3D de 2010, les cartes isohypses des horizons pointés du Callovo-Oxfordien (notamment « LS1 » et « LS2 », correspondant respectivement environ au toit de l'UA1 et au milieu de l'USC, cf. Figure 2) révélaient la présence d'une zone d'allongement Nord-Sud traversant la ZIRA, plus basse (flexure) d'une quinzaine de mètres sur une largeur de 1 à 2 km, avec une épaisseur a priori constante du Callovo-Oxfordien. L'IRSN constatait que cette dépression était située à l'aplomb d'un fossé dans le Trias, attribué par l'Andra à une dissolution du sel pendant la sédimentation des marnes du Lias sus-jacentes. L'Andra attribuait alors la dépression dans le Callovo-Oxfordien à un artefact ayant pour origine une variation latérale de vitesses sismiques sans toutefois que la zone à l'origine de cette variation soit identifiée, et ajoutait que cette variation de profondeur reste dans la fourchette d'incertitudes estimée sur les profondeurs, la borne haute de celle-ci atteignant 18 m. L'IRSN considère que cette incertitude, correspondant à la somme des incertitudes sur les vitesses sismiques des couches traversées, ne devrait pas être significativement différente entre deux zones voisines qui présentent la même pile sédimentaire. Par ailleurs, sur les nouvelles cartes isohypses transmises par l'Andra en 2013 en réponse à son engagement 2013 E3.1 [1] (cf. chapitre 4.1) [59][60][61], réalisées en utilisant la méthode de « kriegeage bayésien » (cf. chapitre 4.1) retenue pour la conversion des vitesses sismiques en profondeur l'IRSN constate que cette dépression Nord-Sud est toujours présente dans les niveaux du Callovo-Oxfordien et qu'elle affecte toutes les couches, du Trias jusqu'au Kimméridgien sub-affleurant. Il ne s'agit donc pas, selon l'IRSN, d'un artefact de traitement sismique. A cet égard, l'Andra n'a pas actualisé sa position sur la nature de ces indices sismiques au cours de l'instruction du DOS. S'agissant de l'origine de cette dépression, l'IRSN attirait en 2013 l'attention sur l'éventualité que les structures bordant le fossé du Trias aient été réactivées après la dissolution de sel du Trias, par des épisodes tectoniques ultérieurs [27]. Aussi, l'IRSN estime, au vu de ce dernier traitement de la

sismique 3D, que l'affaissement du Trias s'est vraisemblablement poursuivi après le dépôt de l'ensemble des couches du Mésozoïque, par exemple par une reprise de la dissolution du sel et/ou une réactivation de petites failles bordières qui ne seraient pas détectables par la sismique 3D. Du point de vue de l'IRSN, cet affaissement apparaissant de faible amplitude (entre 10 et 20 m) et étalé sur 1 à 2 km, il peut être raisonnablement postulé une simple flexuration des couches sans endommagement notable. Néanmoins, **il convient que l'Andra vérifie, en vue du dépôt de la DAC, que la zone affaissée présente bien des propriétés équivalentes au Callovo-Oxfordien sain notamment sur les bords de la zone affaissée, afin de confirmer que l'hypothèse d'homogénéité du Callovo-Oxfordien sur l'ensemble de la ZIRA reste valable.** La zone du Callovo-Oxfordien concernée par cet affaissement Nord-Sud se situe au niveau des quartiers HA1/HA2 de l'architecture envisagée au stade du DOS (cf. Figure 8), en particulier des quartiers 2 et 3.

Si l'Andra confirmait l'existence de cette zone affaissée, accompagnée ou non de la présence de structures dans les zones bordières de l'affaissement, des adaptations de l'architecture souterraine du stockage devraient être possibles en plaçant les alvéoles HA à distance de celle-ci. Dans ce cas, il conviendrait que cette nouvelle architecture soit présentée dans le dossier accompagnant la DAC, assortie d'une stratégie de reconnaissance, au cours du creusement de la zone présumée affaissée, en vue de vérifier la géométrie de la roche hôte et ses propriétés mécaniques. A cet égard, l'IRSN rappelle la demande de l'ASN [15] formulée à l'issue de l'examen du « Dossier 2005 », de définir, en vue de la DAC « *une stratégie de reconnaissance [...] pour identifier des volumes de roche pour lesquels la fracturation est absente ou peut être compensée en adaptant l'architecture de stockage, sans pénaliser la sûreté, et pour définir ainsi la localisation et l'emprise du stockage* ». A l'issue de l'examen du « Dossier 2009 », l'IRSN considèrerait qu'il conviendrait que la stratégie de reconnaissance de l'Andra fasse état des éléments qui conduiraient à une adaptation des concepts du stockage [16]. La réalisation d'une telle reconnaissance pourrait par exemple être associée au programme de forages ZBS envisagé par l'Andra en 2017-2018, évoqué au chapitre 4.6.1.2.

**Aussi, une reconnaissance directe du Callovo-Oxfordien devra être réalisée à l'aplomb de la zone suspectée affaissée dans le Nord de la ZIRA, par exemple par forages à des emplacements stratégiques permettant de lever tout doute sur sa profondeur réelle ainsi que sur le caractère intact de la roche dans les zones présumées flexurées.**

**L'Andra devra présenter dans le dossier de DAC les premiers résultats de cette reconnaissance ainsi que la manière dont l'architecture souterraine pourrait tenir compte de ces zones si leur flexuration était à terme avérée.** Ce point fait l'objet de l'engagement E8-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

S'agissant plus généralement de stratégie de reconnaissance lors de la construction, l'Andra indique [39] qu'une reconnaissance géologique à l'avancement est prévue tout au long de la construction de l'installation souterraine ; elle visera notamment à vérifier l'homogénéité de la roche hôte ainsi que ses caractéristiques importantes, prises pour données d'entrée dans l'évaluation de sûreté après fermeture (comportement mécanique ; extension, structure et perméabilité de la zone endommagée autour des ouvrages...). L'Andra ajoute que dans les zones de stockage, en fonction des configurations géométriques des galeries et des connaissances acquises pendant le creusement des premiers ouvrages, il pourra être envisagé de compléter le modèle géologique par forages carottés ou par tomographie sismique entre galeries, préalablement au creusement des alvéoles. **Cette stratégie apparaît satisfaisante à ce stade pour ce qui concerne la vérification des paramètres utilisés pour l'évaluation de la**

**sûreté de l'installation après sa fermeture.** Cependant, l'IRSN estime qu'il convient également de confirmer les caractéristiques de la roche hôte au cours de l'avancement pour le dimensionnement du génie civil. Or, l'IRSN observe que d'après le plan de l'architecture souterraine de Cigéo [210], les galeries d'accès aux alvéoles HA traversent la zone présumée affaissée et recoupent donc obliquement les couches du Callovo-Oxfordien ; elles passent en outre par des niveaux légèrement au-dessus ou en-dessous du niveau équivalent à celui d'implantation du Laboratoire souterrain, du simple fait de l'architecture actuelle mais aussi de cette flexuration, sans qu'il soit à ce stade aisé pour l'IRSN d'apprécier avec précision cet écart. D'après ses propres estimations, l'IRSN estime que l'exigence d'une garde supérieure et inférieure de 50 m de Callovo-Oxfordien devrait pouvoir être respectée. Cependant, **il est possible que les caractéristiques des couches sus-jacentes et sous-jacentes (d'au plus une dizaine de mètres) au niveau principal du Laboratoire souterrain (cf. Tableau 11), ainsi que le creusement de galeries recoupant obliquement les couches lithologiques, induisent un endommagement d'une ampleur différente de l'attendu pour des ouvrages creusés dans la couche équivalente à ce niveau principal et parallèlement à la lithologie.** Ceci est examiné au chapitre 4.5.4.1 relatif au comportement géomécanique du Callovo-Oxfordien.

Enfin, concernant l'étude d'adaptabilité de Cigéo à un stockage de combustibles usés et/ou des réserves, l'Andra présente différentes superficies de l'installation souterraine selon l'inventaire retenu, dont certaines atteignent les limites de la ZIRA (cf. Figure 48 et Figure 51). Compte tenu des remarques de l'IRSN sur l'incertitude relative au nombre et au volume des colis (voir chapitres 3.5.1 et 3.6.2) notamment pour les déchets en réserve FAVL, la superficie de l'installation souterraine pourrait dépasser l'emprise de la ZIRA. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que « *la ZIRA n'a pas été définie comme une zone d'exclusion ; cette zone de 30 km<sup>2</sup> définie en 2010 s'inscrit dans la zone de transposition de 250 km<sup>2</sup> définie dans le Dossier 2005 et pour laquelle la faisabilité de principe du stockage a été établie sur l'ensemble de la superficie. Ainsi, le fait d'envisager dans le cadre des études d'adaptabilité que le stockage sorte légèrement de la ZIRA ne présente pas d'éléments rédhitoires en matière de sûreté* ». Les investigations menées à ce jour par l'Andra dans la ZT et portées à la connaissance de l'IRSN ne montrent effectivement pas à ce stade d'élément rédhitoire à l'extension d'emprise que générerait le stockage des combustibles usés et des réserves de Cigéo.

## 4.5.2 PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

### Perméabilités

L'Andra mentionne [40] que des valeurs médianes de perméabilité horizontale ( $K_h$ ) et verticale ( $K_v$ ) ont été obtenues au niveau du Callovo-Oxfordien selon deux méthodes différentes : des mesures acquises *in situ* par pulse-test et des mesures acquises sur échantillons en régime permanent. Dans le premier cas, les valeurs médianes sont de l'ordre de  $10^{-13}$  m/s, dans le second elles sont de l'ordre de  $10^{-14}$  m/s (cf. Tableau 12). Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que depuis 2014, la valeur de référence « phénoménologique » correspondait à la médiane des mesures obtenues en régime permanent, dont la méthode ne nécessite pas de modèle d'interprétation hydromécanique (à l'inverse de la méthode de pulse test) et dont la dispersion des valeurs est d'un ordre de grandeur (deux ordres de grandeur pour les essais par pulse tests). Sur cette base, l'Andra retient, pour effectuer l'évaluation de sûreté, la valeur de  $4 \cdot 10^{-14}$  m/s (issue de mesures en régime permanent) pour  $K_v$  et  $K_h$  pour la situation normale « de référence » et les valeurs de  $2 \cdot 10^{-13}$  m/s pour  $K_v$  et de  $4 \cdot 10^{-13}$  m/s pour  $K_h$  (issues de mesures par pulse test) pour la situation normale « enveloppe ».

	Kv (m/s)	Kh (m/s)	Facteur d'anisotropie	Source
Mesures par pulse test	médiane à $2.10^{-13}$	médiane à $4.10^{-13}$	de 2 à 3	[40]
Mesures sur échantillons en régime permanent	Médiane à $4.10^{-14}$		autour de 1	[40]
Résultats issus de toutes les mesures jusqu'en 2012	moyenne de 1 à $2.10^{-13}$ gamme de $1.10^{-14}$ à $2.10^{-12}$	moyenne de 3 à $5.10^{-13}$ gamme de $1.10^{-14}$ à $2.10^{-12}$	autour de 2	[51]
Valeurs retenues dans l'évaluation d'impact	valeur référence : $4.10^{-14}$ valeur enveloppe : $2.10^{-13}$	valeur référence : $4.10^{-14}$ valeur enveloppe : $4.10^{-13}$	1 de 2 à 3	[40]

Tableau 12 : Perméabilités verticales (Kv) et horizontales (Kh) du Callovo-Oxfordien

L'IRSN estime que l'utilisation de mesures sur échantillons présente l'avantage de pouvoir appliquer un même protocole pour toutes les mesures. En effet, ceci peut conduire à limiter l'incertitude autour des valeurs produites, dans la mesure où les échantillons ont des compositions minéralogiques proches ; c'est en particulier un bon moyen de tester l'anisotropie des perméabilités. La préférence des essais en laboratoire sur échantillons sur les essais *in situ* pose en revanche la question de la représentativité des mesures car d'une part l'échantillon subit une double perturbation, lors du carottage puis lors du reconditionnement en laboratoire, qui ne garantit pas le retour aux conditions qui prévalent *in situ*, d'autre part le volume élémentaire représentatif de l'échantillon testé est plus limité. L'IRSN constate que l'Andra ne présente pas d'analyse des résultats obtenus tant en laboratoire que pour les essais *in situ*, qui permettrait de juger de leur pertinence, par exemple des études statistiques ou des éléments d'appréciation de la qualité des prélèvements et des mesures en laboratoire. En outre, l'Andra n'a pas précisé si des essais *in situ* en régime permanent avaient été réalisés. L'IRSN observe que deux études indépendantes menées dans le cadre de l'expérience DB du Mont Terri ont montré une absence de différence significative entre les perméabilités déduites d'essais hydrauliques *in situ* menés successivement par Pulse Withdrawal tests (PW) en régime transitoire et par Constant Rate withdrawal tests (RC) en régime permanent [78][79]. L'IRSN estime donc que sur la base des éléments à sa disposition, il n'est pas justifié de rejeter les résultats obtenus par une méthode plutôt qu'une autre. Ainsi, l'IRSN estime que les mesures *in situ* auraient dû aussi être considérées dans l'évaluation de sûreté après fermeture du stockage au stade du DOS, afin de sélectionner une valeur représentative de l'ensemble des gammes de mesures de perméabilités réalisées dans le Callovo-Oxfordien pour la situation « de référence » (cf. introduction du chapitre 4). Pour la situation « enveloppe », l'IRSN estime que l'Andra aurait dû retenir une valeur proche de la borne haute de la gamme des perméabilités mesurées.

En tout état de cause, l'Andra devra présenter, dans le dossier accompagnant la DAC, les éléments de justification des perméabilités qu'elle retient pour caractériser les propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien. Ce point est repris ci-après (cf. engagement E9-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017).

L'impact d'une modification des valeurs retenues pour la perméabilité du Callovo-Oxfordien sur les calculs de sûreté après fermeture est examiné au chapitre 8.2.

### Porosité totale et cinématique

D'après les mesures réalisées dans la ZT [53], la porosité totale moyenne sur la totalité du Callovo-Oxfordien est autour de 16 % ; elle est autour de 18 % dans l'UA et de 14 % dans l'USC. L'IRSN observe que l'Andra retient pour ses évaluations de sûreté une porosité totale égale à 18 %, soit légèrement supérieure aux résultats des mesures. La porosité cinématique, correspondant à une partie de la porosité totale, traduit la porosité accessible à l'eau mobile et permet le calcul de la vitesse moyenne de l'eau en divisant la vitesse de Darcy par la porosité cinématique. Aussi, plus faible sera la porosité cinématique, plus grande sera la vitesse moyenne de l'eau et donc de transport des radionucléides dissous. Sur la base de mesures réalisées sur échantillons, l'Andra retient une porosité cinématique

pour les argilites du Callovo-Oxfordien (saines comme endommagées) égale à la porosité totale (18 %) divisée par 2 et par 4 pour les valeurs « *de référence* » et « *enveloppe* » [40] respectivement, soit 9 % et 4,5 %, en lien, ainsi qu'indiqué au cours de l'instruction, avec les quelques données expérimentales disponibles et l'évaluation de la quantité d'eau porale libre. L'Andra a précisé que « *la détermination expérimentale de la porosité cinématique est difficile et s'avère peu généralisable pour un large ensemble d'échantillons* », ce dont convient l'IRSN. Aussi, l'IRSN attend, dans le dossier accompagnant la DAC, une analyse critique et détaillée des protocoles et résultats acquis, afin d'en déduire l'incertitude sur ce paramètre. L'IRSN estime que l'Andra devrait retenir, pour le scénario « *de référence* » la valeur moyenne dans la gamme des valeurs de porosité cinématique mesurées et pour le scénario « *enveloppe* », une valeur pénalisante. Ce point est repris ci-après (cf. engagement E9-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017).

#### Emmagasinement spécifique<sup>25</sup>

L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que ce paramètre est « *sans objet car les évaluations quantitatives de sûreté sont menées pour des situations hydrauliques en régime permanent (ou multi-permanent, avec des enchaînements de situations hydrauliques)* ». L'IRSN convient que la simulation en régime permanent ne nécessite pas l'utilisation de ce paramètre. Néanmoins, ce paramètre est important dans les études relatives à l'évolution transitoire thermo-hydro-mécanique après fermeture du stockage. Au stade du DOS, l'Andra retient l'hypothèse d'un stockage complètement saturé dès sa fermeture, mais a indiqué que la phase transitoire de resaturation serait prise en compte pour la DAC. Aussi, l'IRSN suggère que l'Andra présente, dans le dossier accompagnant la DAC, une évaluation de l'emmagasinement spécifique du Callovo-Oxfordien et de l'impact de l'incertitude associée à ce paramètre sur le transport des radionucléides durant la phase transitoire de resaturation du stockage.

#### Charges hydrauliques

Le gradient hydraulique vertical à travers le Callovo-Oxfordien, résultant des différences de charges mesurées par l'Andra entre l'Oxfordien et le Dogger (respectivement, 305 m NGF à 410 m de profondeur et 290 m NGF à 550 m, à l'aplomb du Laboratoire [53]), varie [81] entre une valeur légèrement négative (-0,08 m/m, gradient descendant) au coin Sud de la ZIRA et légèrement positive (environ 0,12 m/m, gradient ascendant) au coin Nord de cette zone.

Ainsi que présenté dans le chapitre 2.1 du présent rapport, les mesures réalisées dans le Callovo-Oxfordien révèlent l'existence d'une surcharge atteignant environ 50 m [53]. L'Andra indique [40] que, bien que l'existence de surpression dans des formations argileuses profondes de faible perméabilité soit fréquente et que différentes hypothèses sur son origine aient été identifiées (osmose chimique, variation de conditions aux limites hydrauliques ou mécaniques au toit et au mur...), l'origine de la surpression dans le Callovo-Oxfordien n'est pas encore totalement explicitée. L'Andra a donc testé l'influence de cette surcharge sur la performance du stockage après fermeture en considérant les perméabilités qu'elle a retenues pour la situation normale « *de référence* » (Tableau 12), soit  $4 \cdot 10^{-14}$  m/s. Ces évaluations [81] montrent, d'après l'Andra, que l'effet de « *la surpression [est] négligeable sur les indicateurs de performance retenus, car le transfert par diffusion reste dominant* ». Sur cette base, l'Andra ne tient pas compte des profils de surcharges mesurées dans le Callovo-Oxfordien pour effectuer son évaluation de sûreté.

---

<sup>25</sup> Le coefficient d'emmagasinement correspond à la quantité d'eau libérée par section verticale de  $1 \text{ m}^2$  sous l'effet d'une baisse de pression de 1 unité sur  $1 \text{ m}^3$ .

L'IRSN convient que la surcharge hydraulique est un indicateur de très faible perméabilité et que son origine n'est que partiellement expliquée. Cette surcharge peut avoir des origines multiples, notamment mécaniques (mouvements verticaux ou surcharges glaciaires passées, déformation actuelle, etc. entraînant des rééquilibrages régis par la loi de Darcy), chimiques (chémo-osmose<sup>26</sup>) ou thermiques (thermo-osmose<sup>27</sup>). Selon cette origine, les mécanismes naturels qui tendent à revenir à l'équilibre ne sont pas rigoureusement identiques mais tous impliquent un mouvement d'eau potentiellement chargée en radionucléides. Par exemple, la modélisation numérique par Gonçalves et al. (2012) [82] d'un transport convectif en régime permanent en couplant les flux d'eau générés par gradient de pression, de température et de concentration rend compte d'environ 80 % de la surcharge mesurée dans la partie supérieure mais seulement 10 à 20 % dans la partie inférieure du Callovo-Oxfordien. La prise en compte d'une surcharge considérée comme exclusivement liée à un excès d'eau engendrerait respectivement un gradient ascendant d'environ 0,9 m/m dans les 50 m supérieurs de la couche et un gradient descendant d'environ 1 m/m dans les 50 m inférieurs de la couche du Callovo-Oxfordien, soit, dans les deux cas, une augmentation significative du gradient considéré à partir des mesures effectuées dans les formations encaissantes. **Aussi, l'IRSN estime que cette surcharge hydraulique doit être prise en compte dans les calculs de sûreté.**

Ainsi qu'indiqué ci-dessus, l'IRSN considère que les valeurs des paramètres de transport retenus par l'Andra pour le Callovo-Oxfordien dans son modèle « *de référence* » peuvent être sous-estimées, en particulier pour la perméabilité ; de ce fait, l'effet de la surcharge hydraulique sur le transport pourrait être minimisé dans l'évaluation précitée. L'influence de cette surcharge aurait dû être testée en tenant compte des valeurs enveloppes des paramètres du Callovo-Oxfordien rapportées dans le Référentiel de site [53]. A cet égard, l'IRSN a testé l'influence d'un gradient vertical de 0,6 m/m et constate que celui-ci a peu d'effets sur les débits molaires estimés au toit du Callovo-Oxfordien. En revanche, dans l'hypothèse d'un dysfonctionnement des scellements, la prise en compte de ce gradient, combinée à des valeurs de perméabilité plus pénalisantes, conduit à obtenir des débits molaires en sortie de liaison surface-fond d'environ un ordre de grandeur supérieurs aux évaluations présentées par l'Andra. **Aussi, une évaluation de la capacité de confinement globale du stockage à un gradient de charge vertical tenant compte de la surcharge hydraulique permettrait de disposer d'une estimation enveloppe des transferts des radionucléides, notamment à travers les ouvrages en cas de court-circuit hydraulique de la roche hôte.** Enfin, ainsi qu'indiqué au chapitre 5.4.3.2, il conviendrait d'évaluer l'effet cumulé de cette surcharge hydraulique avec celle provoquée par le panache salin dû à certains colis MAVL (boues bitumées et déchets C5).

**Des remarques précédentes sur les paramètres hydrodynamiques du Callovo-Oxfordien, il ressort la conclusion suivante.**

---

<sup>26</sup> La chémo-osmose ou osmose chimique est causée par une différence de concentration de solutés entre deux milieux séparés par un semi-perméable ; elle implique une augmentation de pression proportionnelle à la concentration des solutés et engendre un mouvement d'eau et non de ces solutés (à la différence de la diffusion) du milieu le moins concentré vers celui plus concentré.

<sup>27</sup> La thermo-osmose ou osmose thermique est causée par une différence de température entre deux milieux séparés par un semi-perméable. Elle implique une augmentation de pression proportionnelle à la température et engendre un mouvement d'eau du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid.

L'IRSN estime que, dans le dossier de DAC, l'Andra devra :

- justifier, pour les scénarios étudiés, les valeurs « *de référence* » et « *enveloppe* » retenues pour la porosité cinématique et pour la perméabilité du Callovo-Oxfordien sur la base d'une analyse des incertitudes qui s'appuiera sur l'ensemble des mesures expérimentales réalisées sur ces paramètres ;
- évaluer la capacité de confinement globale du stockage en considérant un gradient de charge vertical qui tienne compte de la surcharge hydraulique, afin de disposer d'une estimation enveloppe des transferts des radionucléides, notamment à travers les ouvrages en cas de court-circuit hydraulique de la roche hôte.

Ce point fait l'objet de l'engagement E9-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

### 4.5.3 PROPRIETES DE TRANSPORT

La capacité de confinement de la formation hôte repose sur ses propriétés chimiques d'insolubilisation (limite de solubilité) et de rétention (coefficient de distribution) des solutés, ainsi que sur ses propriétés hydrodynamiques (coefficient de diffusion, porosité...), qui caractérisent le transport de ces solutés vers les formations encaissantes.

S'agissant de la limite de solubilité ( $C_{sat}$ ) et du coefficient de distribution ( $K_d$ ) qui représente la rétention des radionucléides et toxiques chimiques dans la roche hôte, l'Andra présente une base de données révisée depuis le « Dossier 2005 ». L'Andra [83] détermine des gammes de valeurs de  $C_{sat}$  et  $K_d$  pour les radionucléides et toxiques chimiques sur la base de différentes méthodes : (i) la mesure sur des échantillons d'argilite du Callovo-Oxfordien (en laboratoire ou *in situ*), (ii) l'analogie de comportement chimique entre les différentes espèces chimiques, (iii) l'étude mécanistique sur des minéraux argileux isolés, (iv) l'étude d'analogues naturels et (v) la modélisation thermodynamique. Lorsque différentes méthodes ont été appliquées, l'Andra croise leurs résultats pour en déduire une valeur pour la situation « *de référence* » du domaine d'évolution normale ainsi qu'une valeur conservative pour la situation « *enveloppe* » de ce domaine.

De manière générale, l'IRSN estime que les valeurs déterminées à la suite d'expériences réalisées sur des échantillons de roches argileuses naturelles (Callovo-Oxfordien de [MHM](#), argiles à opalines du Jurassique inférieur étudiée au Mont-Terri en Suisse) et dans des conditions expérimentales représentatives de celles du stockage, sont les plus pertinentes pour le choix des valeurs de référence. Lorsque les mesures expérimentales sont indisponibles, l'IRSN convient que les données obtenues par analogie de comportement avec des espèces chimiques voisines peuvent constituer une gamme de valeurs appropriées pour décrire la solubilité et la rétention de l'élément d'intérêt. En outre, l'IRSN relève que, pour de nombreux éléments chimiques, les valeurs de limite de solubilité retenues sont déduites de modélisations thermodynamiques et ont été modifiées depuis 2005 pour tenir compte des évolutions de la base de données thermodynamiques liées notamment à l'amélioration des connaissances du site. L'IRSN estime que ces résultats de modélisations thermodynamiques constituent une gamme de valeurs envisageables pour décrire la solubilité et la rétention de l'élément d'intérêt, mais mériteraient d'être consolidés sur la base de mesures expérimentales. Les expériences menées sur des minéraux purs isolés permettent d'obtenir des informations qualitatives sur l'existence d'un phénomène de rétention et sur les mécanismes qui lui sont associés.

En tout état de cause, lorsque des gammes de valeurs obtenues par différentes méthodes sont disponibles, l'évaluation de l'impact après fermeture du stockage doit tenir compte de valeurs caractérisant la solubilité et la rétention des radionucléides et toxiques chimiques sélectionnées sur la base d'une hiérarchisation de ces méthodes, puis d'un examen de la qualité des différents types de données disponibles pour chaque cas, en vue de tracer et de justifier le processus de sélection.

Sur la base des éléments présentés au stade du **DOS**, l'IRSN estime que les gammes de valeurs retenues par l'Andra [83] pour l'évaluation de sûreté après fermeture, sont bien, pour une grande partie d'entre elles, représentatives du niveau de connaissances actuelles concernant la solubilité et la rétention des éléments chimiques dans la roche hôte. En outre, l'IRSN souligne que l'Andra poursuit l'acquisition de données complémentaires par des expériences spécifiques de rétention (cas par exemple du calcium), **ce qui est satisfaisant. A cet égard, l'IRSN encourage l'Andra à poursuivre son effort d'acquisition de connaissances sur les propriétés de rétention de la roche hôte.** Toutefois, l'IRSN relève, parmi les radionucléides et toxiques chimiques dont les valeurs de Kd et de Csat ont été révisées depuis 2005, les points suivants portant sur la représentativité des valeurs de rétention de référence du zirconium, du protactinium et du neptunium, acquises selon différentes expérimentations. Le cas du sélénium est ensuite plus largement détaillé.

L'IRSN note [83] que des expériences de type batch ont permis de caractériser la rétention du zirconium (Zr) sur des échantillons d'argilite du Callovo-Oxfordien. Les valeurs de Kd obtenues, déjà présentées dans le « Dossier 2005 », sont comprises entre 0,1 et 13 m<sup>3</sup>/kg, avec une valeur moyenne égale à 6 m<sup>3</sup>/kg. L'Andra précise que, sur la base d'expériences complémentaires faisant intervenir des concentrations à l'équilibre en Zr « *inférieures aux limites de détection* » (10<sup>-15</sup> mol/L) ainsi qu'une analogie avec le thorium (conduisant à des gammes de valeurs comprises entre 0,1 m<sup>3</sup>/kg et 1 000 m<sup>3</sup>/kg), elle retient une valeur de Kd de référence égale à 10 m<sup>3</sup>/kg et une valeur conservatrice de 0,1 m<sup>3</sup>/kg. Compte tenu des incertitudes intrinsèques associées aux expérimentations mettant en jeu de très faibles concentrations de radionucléide (limites de détection) et au raisonnement par analogies, l'IRSN considère, sur la base des éléments présentés par l'Andra à ce stade, que le choix d'une valeur de Kd de référence d'un ordre de grandeur supérieur à celle retenue au stade du « Dossier 2005 » (1 m<sup>3</sup>/kg) pour le Zr n'apparaît pas suffisamment justifié.

S'agissant de la rétention du protactinium (Pa), l'Andra indique [83] que des expériences de rétention ont été réalisées sur des échantillons d'illite du Puy et que les valeurs de Kd obtenues sont de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/kg. L'Andra ajoute que le comportement de sorption du Pa(V) peut être traité par analogie avec le niobium (Nb(V)) et le neptunium (Np(V)), dont les valeurs de Kd mesurées sur des argilites sont comprises entre 0,1 et 1 m<sup>3</sup>/kg. Pour l'évaluation de sûreté après fermeture, l'Andra retient une valeur de référence du Kd du Pa égale à 10 m<sup>3</sup>/kg (et, comme valeur conservatrice la valeur de 0,1 m<sup>3</sup>/kg). L'IRSN considère que les mesures sur l'illite, qui est une phase minérale constitutive de l'argilite, confirment l'affinité du Pa pour ce minéral. Toutefois, cette information qualitative ne peut être directement retenue pour quantifier des valeurs de Kd pour le Pa(V) dans la roche hôte. Aussi, compte tenu des éléments présentés, l'IRSN estime que le choix d'une valeur de Kd de référence égale à 1 m<sup>3</sup>/kg basé sur les mesures réalisées sur des argilites pour les Nb(V) et Np(V) qui, selon l'Andra, ont des comportements de sorption analogues à celui du Pa(V), serait plus justifié à ce stade.

L'Andra indique [83] que la rétention du neptunium (Np(IV)) n'a pas été directement mesurée sur des échantillons d'argilite et précise que le comportement de sorption du Np(IV) peut être évalué par analogie avec le comportement du Pu(IV) et de l'U(IV). Au stade du **DOS**, l'Andra retient, pour le Np(IV), les gammes de valeurs spécifiques à l'U(IV) pour lequel la valeur de référence du Kd est de 8 m<sup>3</sup>/kg et la valeur conservatrice est de 1 m<sup>3</sup>/kg. Pour le Pu(IV), l'Andra retient une valeur de référence égale à 1 m<sup>3</sup>/kg et une valeur conservatrice égale à 0,1 m<sup>3</sup>/kg. L'IRSN estime que les valeurs de Kd plus pénalisantes pour le transport du Np(IV) dans la roche auraient pu être choisies, basées sur celles du Pu(IV), à savoir une valeur de référence de 1 m<sup>3</sup>/kg et une valeur conservatrice égale à 0,1 m<sup>3</sup>/kg.

Pour ce qui concerne plus particulièrement le  $^{79}\text{Se}$ , l'IRSN note que l'Andra [83] a fait le choix de retenir une limite de solubilité dans le Callovo-Oxfordien de  $2.10^{-9}$  mol/L pour la situation « de référence » et  $10^{-7}$  mol/L pour la situation « enveloppe » du SEN (cf. chapitre 8.2.1.2), sur la base d'études et de calculs réalisés concluant à la prépondérance du sélénium en milieu naturel sous forme réduite Se(-II) (séléniure,  $\text{Se}^{2-}$ ). En effet, l'Andra indique que [83] des « études expérimentales sur la caractérisation de la solubilité de Se(s) et FeSe(s) au contact de solutions argileuses (De Cannière et al., 2010) ont mis en évidence que les concentrations totales aqueuses en Se mesurées varient entre  $6.10^{-5}$  et  $2.10^{-9}$  mol/L pour Se(s) et entre  $3.10^{-5}$  et  $4.10^{-10}$  pour FeSe(s). Cette variabilité expérimentale est à mettre en relation avec la présence ou l'absence de pyrite ou bien de minéraux du fer dans les échantillons ». L'Andra précise qu'en milieu naturel, « les teneurs en sélénium observées dans les eaux argileuses sont pour la plupart inférieures à  $10^{-7}$  mol/L (McNeal & Balistrieri, 1989 ; Burau, 1985), et pour l'analogue naturel de Cigar Lake, voisines de  $4.10^{-7}$  mol/L (Bruno et al., 2001) ». Sur la base de ces études, l'IRSN convient que, pour la situation « de référence », la limite de solubilité du sélénium sous forme réduite (Se(-II)) dans le Callovo-Oxfordien retenue par l'Andra traduit bien l'état des connaissances. En revanche, pour la situation « enveloppe », **une limite de solubilité plus conservative (de l'ordre de  $10^{-5}$  mol/L), tenant compte des gammes de valeurs obtenues par les études les plus récentes précitées, aurait dû être retenue pour le Se(-II)**. Par ailleurs, au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que l'état d'oxydation le plus élevé attendu dans les déchets est le sélénium sous sa forme oxydée Se(IV) (sélénite,  $\text{SeO}_3^{2-}$ ) et a précisé que la solubilité du Se(IV) est infinie et non contrôlée par un solide, mais que les mesures de rétention réalisées sur les argilites pour le Se(IV) font état de valeurs de Kd supérieures à  $0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$  pour des concentrations traces ( $< 10^{-6}$  mol/L) ; la mobilité du sélénium sous forme Se(IV) serait donc fortement réduite en comparaison de celle du Se(-II) dont le Kd est nul et son impact radiologique à long terme serait moindre. L'Andra ajoute que la réduction du Se(IV) en Se(-II) a été observée expérimentalement au cours d'essais de diffusion. **L'IRSN convient que le choix de l'Andra de considérer le sélénium sous forme Se(-II) est pénalisant pour l'évaluation d'impact du stockage après fermeture en comparaison de la forme Se(IV)**. Toutefois, comme indiqué au chapitre 3.2.2 relatif à l'inventaire des déchets vitrifiés, l'IRSN relève que d'après Poinssot & Geckeis (2012 [187]) et De Cannière et al. (2010 [188]), le  $^{79}\text{Se}$  devrait être relâché par les déchets vitrifiés (ou les combustibles usés) sous forme oxydée, Se(IV) mais aussi Se(VI) (séléniate,  $\text{SeO}_4^{2-}$ ). En outre, Bingham et al. (2011[218]) montre que, dans les déchets vitrifiés étudiés, si l'état d'oxydation majoritaire est le Se(IV) (environ 80 % de l'inventaire en sélénium), le sélénium élémentaire (Se(0)) et le séléniate Se(VI) sont présents à hauteur de 10 % de l'inventaire chacun. L'IRSN relève que l'ion Se(VI) est un élément soluble et faiblement sorbé, voire non sorbé, dans les argiles [188]. En outre, la spéciation du Se(VI) est difficilement modifiée en conditions réductrices (Bruggeman et al., 2007 [189]), sauf sous l'action de certains micro-organismes, qui le réduiraient en Se(IV), puis en Se(-II). L'IRSN souligne, en outre, que l'absence d'apparition de Se(-II) suite à une injection de Se(VI) a été notamment montrée lors d'expérimentations sur les argiles de Tournemire, sur les argiles à opalines au Mont-Terri et sur l'argile de Boom à Mol [188][190].

**Aussi, l'Andra devra préciser, dans le dossier de DAC, la spéciation chimique du sélénium dans les colis de stockage et dans la roche hôte.** Ce point fait l'objet de l'engagement E10-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

La conséquence, dans l'étude d'impact radiologique, de la prise en compte du sélénium sous sa forme oxydée dans le Callovo-Oxfordien, est analysée dans le chapitre 8.2.1.4.3.

S'agissant de la diffusion des radionucléides et des toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien, l'Andra indique que les données sont obtenues par des mesures sur échantillons prélevés à l'aplomb du Laboratoire souterrain de **MHM**, respectivement pour l'eau tritiée (HTO), l'anion chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) et le cation césium ( $\text{Cs}^+$ ). Les coefficients de diffusion effective ( $D_e$ ) mesurés varient peu sur l'épaisseur du Callovo-Oxfordien à l'exception des niveaux carbonatés dans l'unité silto-carbonatée (**USC**, cf. Figure 2). Ainsi, l'Andra déduit, en estimant la moyenne des valeurs mesurées dans le Callovo-Oxfordien, une valeur de référence de  $D_e$  pour l'évaluation de sûreté après fermeture :

- pour l'eau tritiée,  $D_e = 2,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , avec une porosité accessible à la diffusion ( $\omega_{\text{acc}}$ ) identique à la porosité totale (18 % ; cf. chapitre 4.5.2) ;
- pour le chlorure,  $D_e = 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\omega_{\text{acc}}$  environ la moitié de la porosité totale (7 %) ;
- pour le césium,  $D_e = 1,7 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\omega_{\text{acc}}$  prise comme égale à la porosité totale.

L'Andra évalue ensuite les valeurs de référence de  $D_e$  pour les éléments neutres (à partir des valeurs pour l'eau tritiée), pour les anions (à partir des valeurs pour le chlorure) et pour les cations (à partir des valeurs retenues pour le césium) en les corrigeant par le coefficient de diffusion dans l'eau libre  $D_0$  spécifique à chaque espèce chimique (Li et Gregory, 1974 [243]).

L'IRSN relève que les valeurs de référence retenues par l'Andra pour l'eau tritiée, le chlorure et le césium sont basées sur les nombreuses mesures réalisées dans les unités (**UA**, **USC** et **UT**, cf. Figure 2) composant la formation du Callovo-Oxfordien, ce qui est satisfaisant. L'IRSN note que certaines valeurs mesurées dans l'**USC** ont été écartées du calcul de ces moyennes. Or, pour le chlorure, ces valeurs peuvent être supérieures d'un facteur 2 aux valeurs de référence retenues. L'Andra indique, à ce propos, que celles-ci n'ont pas été retenues car elles sont issues d'une passe carottée du forage EST423 qu'elle estime non représentative du reste de la formation du Callovo-Oxfordien. A cet égard, l'IRSN convient que les mesures dans le forage EST423 se distinguent par des valeurs de  $D_e$  plus élevées que celles mesurées dans l'**USC** au niveau du laboratoire souterrain et qu'elles peuvent être dues à une hétérogénéité dans l'**USC**, dans la partie Nord-Est de la **ZT** (zone de quelques mètres d'épaisseur plus carbonatée). Par ailleurs, l'IRSN observe que la prise en compte de ces valeurs aurait peu modifié l'estimation de l'Andra pour le chlorure ( $5,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  en comparaison de  $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ). En outre, l'IRSN note que l'Andra retient, pour la situation « *enveloppe* » dans l'évaluation de sûreté après fermeture, une valeur conservative supérieure à cette valeur moyenne ( $D_e(\text{Cl}^-) = 6,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Aussi, l'IRSN estime que les coefficients de diffusion effective retenus pour les situations « *de référence* » et « *enveloppe* » de l'évaluation de sûreté après fermeture, présentée au stade du **DOS**, traduisent globalement bien l'état des connaissances.

#### 4.5.4 PROPRIETES MECANIQUES

Ainsi que décrit au chapitre 2.1 du présent rapport, les argilites du Callovo-Oxfordien sont une formation de 153 m d'épaisseur en moyenne sur la ZIRA dont le toit se situe entre 340 et 530 m de profondeur et le niveau médian entre 420 et 600 m environ [40]. Du haut vers le bas, elle est constituée des unités litho-stratigraphiques suivantes : USC, l'UT et l'UA (cf. Figure 2). L'UA représente les deux tiers inférieurs de la formation hôte. D'une épaisseur de 100 à 120 m, elle est la plus homogène et la plus riche en minéraux argileux (plus de 40 % en moyenne). C'est au sommet de la sous-unité UA2 qu'ont eu lieu la plupart des expérimentations du Laboratoire souterrain (-490 m). L'USC, située au toit du Callovo-Oxfordien, présente une épaisseur de 20 à 30 m et les teneurs en carbonates les plus élevées (40 à 90 %). C'est au sein de cette unité qu'a été creusée la « niche » du Laboratoire souterrain (-445 m). L'Andra précise [40] que du fait de cette teneur élevée en carbonates et de leur organisation en un quasi-squelette 3D, l'USC présente une résistance mécanique supérieure à celle de l'UA dans laquelle les minéraux non argileux s'organisent en inclusions au sein d'une matrice argileuse. L'UT marque une transition entre les roches principalement argileuses de l'UA et les roches plus carbonatées de l'USC.

L'impact des propriétés mécaniques de la roche hôte sur la conception du stockage est examiné en deux parties dans le présent chapitre : l'une relative aux aspects géomécaniques (propriétés de confinement des argilites) et l'autre relative aux aspects géotechniques (techniques d'excavation, dimensionnement des revêtements...).

##### 4.5.4.1 Comportement géomécanique du Callovo-Oxfordien

L'IRSN rappelle qu'en fonction des propriétés mécaniques des argilites et des contraintes *in situ* (liées à la profondeur – poids des terres – et à la tectonique), les travaux d'excavation peuvent induire un endommagement localisé autour des ouvrages communément appelé « EDZ » (*Excavation Damaged Zone*) et susceptible de nuire aux propriétés de confinement de la roche. Cet endommagement pouvant évoluer au cours du temps, l'Andra appelle « *endommagement initial* » [40] celui qui résulte immédiatement de l'excavation.

L'Andra indique que les travaux menés au Laboratoire souterrain sur des ouvrages de 10 cm à 8 m de diamètre excavé ont permis de bien caractériser la zone endommagée initiale et que celle-ci montre une structure générale similaire pour tous les types et dimensions d'ouvrages avec une extension proportionnelle au rayon excavé (R) (cf. Figure 53).

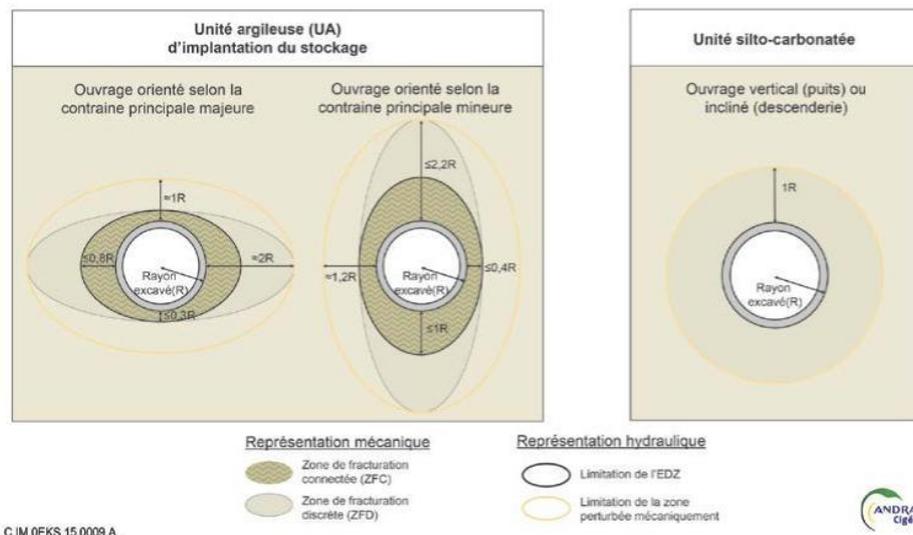


Figure 53 : Schéma de la zone endommagée initiale créée par l'excavation dans les unités argileuse (UA) et silto-carbonatée (USC) du Callovo-Oxfordien [40]

L'Andra [40] précise que :

- dans l'**USC**, peu d'endommagement est observé suite au creusement des ouvrages en raison d'une résistance suffisante des argilites. La perméabilité à l'eau atteint  $10^{-11}$  m/s en paroi et décroît à  $10^{-13}$  m/s dans les deux premiers mètres de la roche (cf. Figure 53, partie droite) ;
- dans l'**UA** en revanche, un endommagement initial important localisé autour des ouvrages, qui s'organise en deux zones (cf. Figure 53, partie gauche) est observé :
  - à proximité du parement, un réseau tridimensionnel et dense de fractures connectées dont les ouvertures peuvent atteindre plusieurs millimètres en paroi et que l'Andra appelle « Zone Fracturée Connectée » (**ZFC**) ;
  - au-delà de la **ZFC**, une zone de fracturation « discrète » (**ZFd**) où ne subsistent que des extrémités de fractures, non connectées entre elles, et présentant des ouvertures inférieures au millimètre.

Cette zone endommagée se développe préférentiellement dans le plan horizontal pour un ouvrage creusé dans la direction de la contrainte horizontale majeure (N155°) et dans la direction verticale pour un ouvrage creusé dans la direction de la contrainte horizontale mineure (N065°). Les perméabilités à l'eau mesurées dans la **ZFC** initiale peuvent atteindre  $10^{-5}$  m/s alors que des perméabilités inférieures à  $10^{-12}$  m/s sont mesurées sur des échantillons prélevés entre les fractures. Pour l'Andra, ces observations montrent que les valeurs de perméabilité très élevées mesurées dans la **ZFC** initiale sont dues à des fractures ouvertes alors que des volumes d'argilites peu endommagés sont présents entre ces fractures ; au-delà de la **ZFC**, la **ZFd** initiale montre des perméabilités à l'eau qui décroissent de manière exponentielle de  $10^{-10}$  à  $10^{-12}$  m/s en l'espace d'un rayon d'ouvrage.

L'IRSN estime que la caractérisation de la zone endommagée initiale a été convenablement menée au Laboratoire souterrain mais convient avec l'Andra [116] que des progrès restent à faire en matière de possibilités de reproduire numériquement la création de cette zone endommagée. Par ailleurs, l'IRSN rappelle que le Laboratoire souterrain est à une profondeur de 490 m alors que les ouvrages de Cigéo pourraient être implantés jusqu'à une profondeur de 600 m et estime que cette augmentation de profondeur devrait accroître l'endommagement de la roche autour des ouvrages, ainsi qu'indiqué dans son avis de 2009 relatif au choix de la **ZIRA** [24]. Enfin, l'IRSN rappelle qu'il estime (cf. chapitre 4.5.1) que le creusement recoupant localement des couches lithologiques inclinées ou à des niveaux légèrement différents de celui du Laboratoire souterrain où ont été menées la plupart des expérimentations pourraient avoir un impact sur la nature et l'extension de la zone endommagée. L'IRSN rappelle en outre qu'il convient que l'Andra vérifie que les propriétés mécaniques de la roche hôte ne sont pas localement différentes aux bords de la zone présumée affaissée dans le Nord de la **ZIRA**. L'IRSN estime par conséquent que la demande de l'ASN 2013 D7, relative à la présentation des hypothèses et données qui seront retenues ainsi que des valeurs à retenir pour l'extension de la zone endommagée, reste d'actualité.

En particulier, l'IRSN considère que, dans le dossier de DAC, l'Andra devra prendre en compte l'influence de la profondeur et de la localisation des ouvrages dans son estimation de la nature et de l'extension de la zone endommagée qui leur est attenante. Ce point fait l'objet de l'engagement E11-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

L'Andra [40] indique que la zone endommagée initiale est ensuite susceptible d'évoluer du point de vue de son extension ou de ses propriétés hydrauliques, en lien avec divers phénomènes et sollicitations. L'IRSN examine ce sujet tout d'abord au regard de la thématique du scellement, puis du foisonnement au droit des alvéoles **MAVL**.

**Propriétés hydrauliques des argilites endommagées au droit des zones de dépose des revêtements**

L'Andra, conformément au Guide de sûreté de l'ASN relatif au stockage géologique [3], retient dans la conception de Cigéo de sceller les liaisons surface-fond ainsi que certaines galeries de l'installation souterraine. L'Andra [40] souligne que « *parmi l'ensemble des scellements, en regard de leur position en sortie du stockage, les scellements de liaison surface-fond jouent le rôle le plus important dans la sûreté passive après fermeture* » et prévoit leur emplacement au toit du Callovo-Oxfordien, dans l'USC où les propriétés mécaniques de la roche sont plus favorables à un faible endommagement. L'IRSN estime que **ces bases de conception permettent de tirer le meilleur profit des caractéristiques naturelles de la formation hôte, ce qui est satisfaisant.**

L'IRSN rappelle que l'option de référence des ouvrages de scellement présentée par l'Andra (cf. Figure 22, Figure 23 et Figure 25 du chapitre 2.5.2.1 du présent rapport) prévoit (i) pour les liaisons surface-fond, une dépose totale du revêtement dans l'USC suivie de la mise en place d'un noyau argileux gonflant à base de bentonite et (ii) pour les ouvrages situés au fond, une dépose partielle du revêtement dans l'UA suivie de la mise en place d'un noyau éventuellement gonflant à base d'argilites. L'IRSN souligne que la performance globale de ce type d'ouvrage dépend pour beaucoup des propriétés hydrauliques de la zone d'argilites endommagées présente au droit de la zone de dépose du revêtement. Lorsque la totalité de l'ouvrage de scellement est saturée, ce qui selon l'Andra nécessite quelques milliers d'années, cette zone d'argilites endommagées est saturée et comprimée par sa convergence partiellement empêchée vers le noyau de scellement ainsi que par l'éventuelle pression de gonflement du noyau argileux. Il convient également de noter que l'Andra envisage de réaliser un démonstrateur à l'échelle 1 de scellement dans un diverticule de descenderie durant la phase pilote [39]. L'IRSN rappelle que ce type d'ouvrage (scellement de liaison surface-fond) nécessite plusieurs années après sa mise en place avant de donner des résultats (cf. chapitre 5.4.2) ; d'ici-là l'IRSN estime nécessaire de retenir une démarche prudente sur les performances globales de ce type d'ouvrage (cf. chapitre 8.2.1.3).

L'Andra [40] indique que dans ces conditions (saturées, comprimées...) les mesures hydrauliques faites autour des ouvrages du Laboratoire souterrain montrent l'existence dans l'UA d'un auto-colmatage des fractures lié au gonflement des minéraux inter-stratifiés illite/smectite des argilites et accentué par les contraintes mécaniques éventuellement appliquées sur la paroi de l'ouvrage. Cet auto-colmatage se traduit macroscopiquement par une diminution progressive au cours du temps de la perméabilité de la zone endommagée, notamment au voisinage immédiat de la paroi de l'ouvrage. L'Andra indique que dans la ZFC, cette diminution peut atteindre plusieurs ordres de grandeurs et que dans la ZFd, la perméabilité des argilites endommagées tend vers celle des argilites saines. Ce phénomène que l'Andra appelle « cicatrisation hydraulique » a été particulièrement étudié au Laboratoire souterrain (expérimentation « CDZ » - Compression de l'EDZ) et s'observe également sur échantillons, y compris pour des fractures d'ouverture millimétrique.

Le phénomène d'auto-colmatage en lien avec la présence de smectites est effectivement bien connu dans les milieux argileux (e.g., Rapport AEN n°6184, 2010 [211]). L'IRSN observe cependant que sur la base des mêmes données expérimentales (CDZ et essais sur échantillons), l'Andra [40] considère « *en situation de référence du SEN, une perméabilité à l'eau de  $10^{-11}$  m/s dans la zone de fracturation continue (ZFC) correspondant à une cicatrisation hydraulique "efficace"* » là où le dossier « Ouvrages de fermeture » retenait une valeur de référence avec auto-colmatage de  $10^{-9}$  m/s. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que la valeur de  $10^{-9}$  m/s résultait d'une interprétation prudente de mesures faites dans des chambres de petites dimensions et par conséquent fortement influencées par la présence de fractures, de sorte que le résultat de la mesure traduisait davantage la transmissivité

locale transitoire d'une fracture injectée d'eau que celle d'un milieu poreux continu équivalent saturé ; pour le DOS, l'Andra a réinterprété ces essais à l'échelle de l'ensemble de la zone CDZ [212] : les chambres de mesure ne sont plus analysées individuellement mais le volume d'eau injecté est analysé globalement en intégrant l'ensemble des chambres de mesure, ce qui permet d'intégrer un volume de roche plus grand et d'obtenir un résultat plus proche de la notion de perméabilité équivalente de la zone endommagée telle que retenue pour les calculs de sûreté (cf. Figure 54).

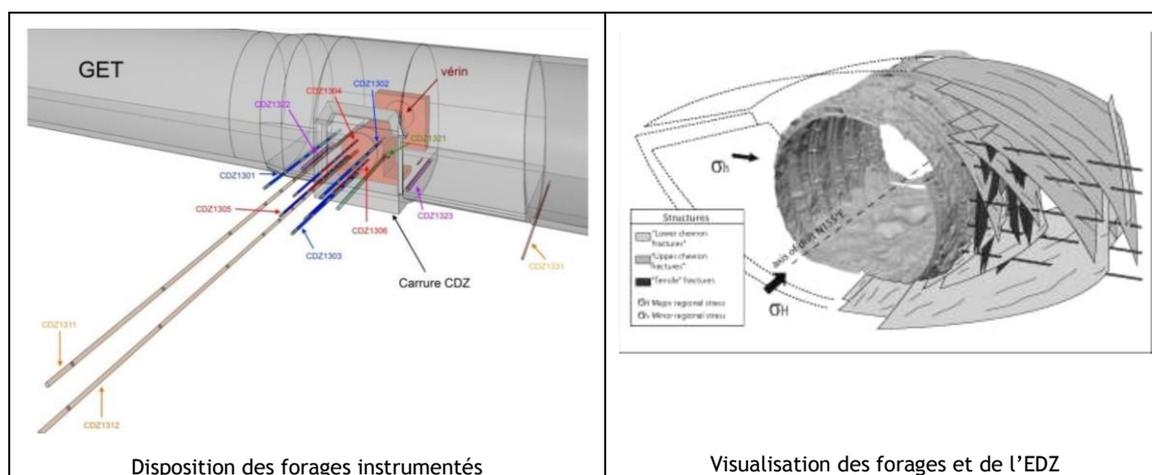


Figure 54 : Schémas relatifs à l'expérimentation CDZ (auto-colmatage de l'EDZ) [212]

L'IRSN note que la cette réinterprétation des essais CDZ se base sur la méthode de Jacob & Lohman (1952 [214]) couramment utilisée en hydrogéologie pour caractériser un aquifère et que quatre essais menés d'octobre 2011 à juin 2012 conduisent ainsi à des perméabilités équivalentes à l'échelle de l'expérimentation CDZ de l'ordre de  $10^{-12}$  à  $5.10^{-12}$  m/s. L'IRSN estime que cette réinterprétation des essais CDZ est pertinente et constate qu'elle conduit à des valeurs de perméabilité cohérentes avec celles observées sur échantillons entre les fractures de la ZFC. L'Andra [40] retient pour la perméabilité de la ZFC au droit des zones de dépose des scellements des valeurs « de référence » ( $10^{-11}$  m/s) et « enveloppe » ( $10^{-10}$  m/s) du SEN (présentant des marges respectivement d'un demi et d'un ordre de grandeur et demi par rapport à la plus haute valeur obtenue,  $5.10^{-12}$  m/s) que l'IRSN estime satisfaisantes à ce stade. L'IRSN considère cependant qu'une étude de sensibilité relative à cette méthode d'interprétation des mesures reste nécessaire pour confirmer que les incertitudes sont bien inférieures aux marges retenues.

Aussi, l'IRSN estime que, dans le dossier de DAC, l'évaluation des valeurs de perméabilité de la zone de fracturation connectée (ZFC) au droit des zones de dépose des revêtements devra être assortie d'une étude de sensibilité à la méthode d'interprétation des mesures utilisée. Ce point fait l'objet de l'engagement E12-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

L'Andra [40] a également identifié différents mécanismes susceptibles d'altérer les propriétés hydrauliques de la zone endommagée initiale (désaturation, opération de dépose du revêtement, rupture différée liée aux déformations viscoplastiques...) et indique que leur impact ne devrait concerner que le voisinage immédiat de la paroi (phénomènes de peau) où la dépose du revêtement permettra de traiter la surface d'argilites altérées (purge, surfacage...). Suite à l'engagement 2014 E1.2 [1] pris à l'issue de l'instruction du dossier « Ouvrages de fermeture », l'Andra s'est attachée à expliquer la fracturation éparsée apparue autour de la niche (-445 m ; cf. Figure 2) six ans après son excavation. L'Andra [116] souligne les très faibles déformations dans ces zones, hormis sous le radier de la

galerie où l'évolution plus marquée entre 2005 et 2011 peut s'expliquer par la configuration géométrique de la galerie au radier. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que d'une part, des essais sur échantillons visant à évaluer dans l'USC la possibilité d'une lente propagation de fissures étaient en cours et que le cas échéant, des simulations numériques pour en évaluer l'impact étaient prévues et que d'autre part, des essais *in situ* visant à caractériser la connectivité de quelques fractures dans la niche à -445 m et l'existence ou non d'un auto-colmatage dans l'USC étaient également en cours. Aussi, pour répondre à cet engagement 2014 E1.2, les éléments relatifs à l'absence d'impact du phénomène de fracturation éparse observé dans la niche (-445 m) sur la possibilité de sceller efficacement les ouvrages de liaisons surface-fond dans l'USC restent attendus pour la DAC. Par ailleurs, l'IRSN souligne les points suivants sur l'endommagement dans l'USC et sur la représentativité de l'essai CDZ.

En premier lieu, dans les évaluations de sûreté présentées dans le DOS [118], les zones endommagées de l'USC et de l'UT ne sont pas représentées en situation « *de référence* » et sont représentées comme une ZFd cicatrisée (i.e.  $10^{-11}$  m/s) en situation « *enveloppe* », ce qui revient à supposer, dans l'USC et dans l'UT, soit l'équivalent d'une cicatrisation hydraulique des zones endommagées similaire à celle de la ZFd de l'UA, soit une absence d'influence de cette zone endommagée sur les propriétés de transport de la roche du fait de son caractère non connecté. Or, l'IRSN observe que les essais dans l'USC sont encore en cours. Les hypothèses retenues par l'Andra restent donc à confirmer.

Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra tenir compte, dans le dossier de DAC, de la cicatrisation hydraulique dans les unités lithologiques USC et UT déduite de l'état des connaissances dont elle disposera. Ce point fait l'objet de l'engagement E13-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

En second lieu, l'IRSN souligne les différences qui pourraient exister entre la galerie expérimentale CDZ et celles d'un véritable stockage tel que Cigéo, en termes de creusement et de soutènement des galeries, de creusement des puits et de dimension des ouvrages.

Concernant le creusement des galeries, la galerie expérimentale CDZ a été creusée avec une machine à attaque ponctuelle alors que les ouvrages de Cigéo destinés à être scellés pourraient être creusés avec d'autres techniques. Ainsi, dans l'UA, l'IRSN observe [116] que le premier retour d'expérience acquis avec une machine à attaque ponctuelle travaillant, à la manière d'un tunnelier, sous une jupe montre que la longueur de « *décousu* » (i.e. la distance non soutenue entre le front de taille et la zone de premier soutènement) conduit « *à une fracturation induite un peu plus importante avec [cette méthode] qu'avec la méthode traditionnelle* ». De plus, l'injection d'un matériau de bourrage entre les voussoirs et la roche peut, en fonction de sa pression et de sa viscosité, s'introduire dans certaines fractures ouvertes [116] et nuire à une cicatrisation hydraulique efficace à long terme. Au cours de la réunion préparatoire, l'Andra a souligné que la structure de cette zone endommagée issue d'un creusement à la manière d'un tunnelier restait néanmoins similaire à celles observées dans les autres galeries, ce qui conforte la possibilité d'appliquer, au moins en partie, les connaissances acquises au Laboratoire souterrain à la zone endommagée attendue autour d'un tunnelier. Par ailleurs, au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que, tant dans l'UA que dans l'USC, les zones avec du coulis dans les fractures pourraient être purgées après dépose du revêtement et qu'aucune ZFC n'est attendue dans l'USC. L'Andra a également rappelé que des démonstrateurs de scellements dans l'UA et l'USC sont prévus dans Cigéo. L'IRSN convient que des infiltrations superficielles de coulis pourraient être purgées après dépose du revêtement mais indique que la profondeur en question dépend de l'ouverture des fractures, des conditions d'injection, etc. **Des essais *in situ* sont donc nécessaires et l'IRSN estime**

que ceux-ci entrent dans le cadre de la demande de l'ASN 2013 D10 [1] à l'Andra « *de définir pour la demande d'autorisation de création, si cette solution de creusement est retenue, le ou les points d'arrêt et les investigations nécessaires permettant de s'assurer de l'absence d'effets réducteurs du creusement sur les ouvrages souterrains et les équipements* ».

Concernant le soutènement des galeries, toujours dans l'UA, l'IRSN observe que l'utilisation de boulons dans la construction des zones à sceller, qui était totalement écartée dans le « Dossier 2005 », est à présent [55] envisagée. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé (i) que les boulons envisagés seraient perpendiculaires à la paroi (et donc au sens de l'écoulement de l'eau le long des ouvrages) et espacés, (ii) qu'il s'agissait de privilégier, le cas échéant, l'utilisation de boulons pleins par rapport à des boulons creux (Swelllex®, Split set®...) afin de minimiser les vides résiduels et (iii) que le boulonnage d'une zone endommagée devrait plutôt en favoriser l'auto-colmatage en limitant l'ouverture des fractures ainsi que le déplacement des blocs formés par ces fractures (effet de clouage). L'IRSN admet que l'utilisation de boulons n'est pas forcément réducteur vis-à-vis de l'auto-colmatage des fractures par gonflement des smectites mais qu'en fonction du mode de mise en place (boulons scellés, déplacements de blocs avant boulonnage...) cela pourrait gêner la refermeture mécanique des fractures et donc dépendre de l'ouverture des fractures en question. En tout état de cause, l'IRSN estime que cela nécessiterait des essais de vérification.

Concernant le creusement des puits, dans l'USC, l'Andra a précisé lors de l'instruction que « *le creusement envisagé pour les puits de Cigéo est à l'explosif, comme pour les puits du Laboratoire souterrain* ». L'IRSN rappelle que déjà en 2000, il s'étonnait [215] que les puits du Laboratoire souterrain soient creusés de cette façon. L'Andra justifiait alors ce choix par le fait que la construction des puits du Laboratoire n'avait pas pour but de démontrer la faisabilité de celle des puits d'une éventuelle installation de stockage mais de donner accès au Callovo-Oxfordien pour y acquérir les données nécessaires à la modélisation sans compromettre les capacités de confinement du site de MHM. L'IRSN souligne que jusqu'en 2014, lors de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture » [30], l'Andra privilégiait encore l'abattage mécanique pour creuser les puits de Cigéo dans le Callovo-Oxfordien au droit des futurs scellements. Ce n'est donc que très récemment que l'Andra a fait ce choix de creuser à l'explosif l'emplacement des futurs scellements de liaison surface-fond qui, parmi l'ensemble des scellements, « *jouent le rôle le plus important dans la sûreté passive après fermeture* » [40]. Sans contester qu'un creusement par tirs adoucis pourrait être suffisant pour limiter l'endommagement, l'IRSN estime que l'Andra n'a pas fait la preuve que le creusement à l'explosif était la manière la plus appropriée de réaliser l'emplacement des futurs scellements les plus importants de l'installation de stockage pour sa sûreté après fermeture.

Enfin, concernant la dimension des ouvrages, l'IRSN observe que les ouvrages de Cigéo que l'Andra envisage de sceller (e.g. tête d'alvéole MAVL, certaines liaisons surface-fond...) ont un diamètre excavé pouvant atteindre le double de celui de la galerie expérimentale CDZ et que si l'Andra prend bien en compte une proportionnalité entre la taille de l'ouvrage et celle de la zone endommagée, elle ne précise pas comment sera pris en compte cet effet d'échelle sur l'ouverture maximale des fractures de la zone endommagée. À cet égard, l'Andra [116] précise qu'en l'état des observations, elle « *ne dispose pas d'élément permettant de mettre en évidence une corrélation entre la densité de fracturation et la taille des ouvrages (principalement à cause du manque de données)* » et que la quantification du processus d'auto-colmatage doit être poursuivie, en particulier dans l'USC, notamment pour savoir jusqu'à quelle ouverture de fracture il se produit. L'IRSN constate que là encore, des essais *in situ* et/ou sur échantillons sont nécessaires.

**En conclusion**, pour ce qui concerne l'évolution de la zone endommagée au droit des zones de dépose de revêtement des ouvrages destinés à être scellés, l'IRSN estime que l'auto-colmatage des fractures, que l'Andra a commencé à quantifier, est bien un phénomène avéré dans l'UA et que la réinterprétation des essais CDZ est pertinente. En revanche, l'auto-colmatage doit encore être confirmé et quantifié dans l'USC et dans l'UT avant d'être pris en compte dans les évaluations de sûreté. Quoi qu'il en soit, l'approche retenue par l'Andra (dépose totale ou partielle du revêtement, traitement des désordres en paroi et attente de l'auto-colmatage de celle-ci) suppose que malgré des différences notables en termes de dimension et/ou de technique de construction des ouvrages (injection de matériaux de bourrage, utilisation de boulons, purge/surfaçage après dépose de revêtement...), la zone endommagée qui sera présente autour des ouvrages destinés à être scellés de Cigéo reste suffisamment similaire à celle présente autour de la galerie expérimentale CDZ pour montrer la même évolution favorable. Autrement dit, l'approche retenue par l'Andra nécessite que soient identifiées les conditions pour lesquelles les observations et résultats expérimentaux de CDZ sont applicables aux ouvrages industriels de Cigéo. À cet égard, l'Andra s'est engagée (2014 E1.1 [1]) à l'issue de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture » [30] à définir pour la DAC comment la zone d'argilites endommagées à la paroi d'un ouvrage à sceller pourra être déclarée acceptable au regard des options de scellement retenues. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que « la zone d'argilites endommagées à la paroi d'un ouvrage à sceller sera traitée en fonction des options de scellement et des performances retenues. Ce point fait notamment l'objet des études APD sur les ouvrages de fermeture. Une vérification des hypothèses sera faite lors de la phase industrielle pilote ». Bien que cet engagement ait été pris pour la DAC, l'IRSN souligne qu'à l'issue du DOS, l'indétermination relative aux « options de scellement » et aux « performances retenues » n'a pas permis de définir les critères d'acceptabilité de la zone endommagée attendue en paroi des ouvrages destinés à être scellés, ni par conséquent les dimensions maximales acceptables de ces ouvrages associées à leurs méthodes de creusement et de soutènement (cf. chapitre suivant 4.5.4.2).

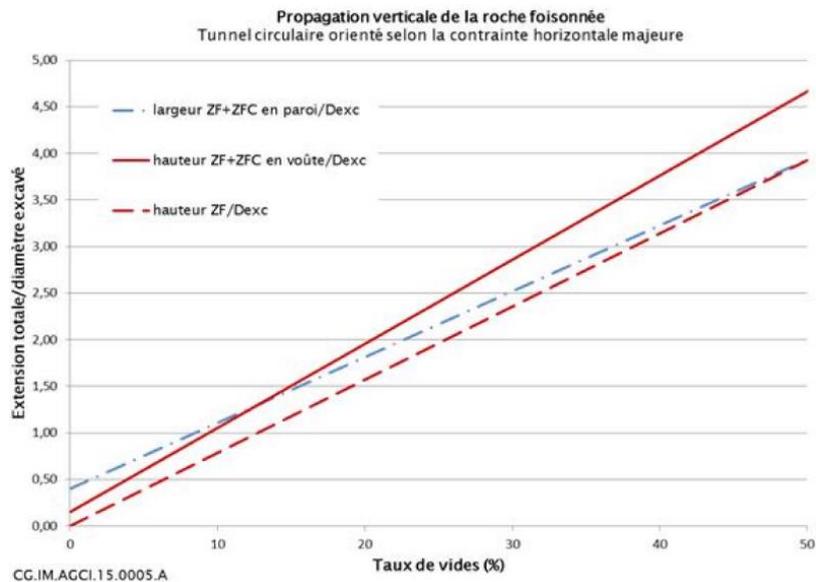
La manière dont l'Andra a pris en compte les incertitudes sur les propriétés mécaniques du Callovo-Oxfordien dans les calculs de sûreté après fermeture est examinée au chapitre 8.2.

#### **Propriétés hydrauliques des argilites au droit des alvéoles (foisonnement<sup>28</sup>)**

Pour atténuer et retarder la migration des solutés à travers le Callovo-Oxfordien après la fermeture du stockage, l'Andra [40] retient comme exigence une épaisseur de garde verticale d'argilites saines d'au moins 50 m au-dessus et en-dessous des différents alvéoles. L'Andra précise [40] que cette épaisseur de garde est déterminée pour chaque alvéole en soustrayant à la garde verticale au-dessus et en dessous de l'ouvrage l'extension verticale maximale de la zone d'argilites endommagées respectivement en voûte et en radier, en soulignant par ailleurs que l'orientation des alvéoles suivant la direction de la contrainte horizontale majeure minimise l'extension verticale de cette zone endommagée initiale (cf. Figure 53). Afin d'éviter que cette épaisseur de garde ne soit compromise à long terme par un possible sur-endommagement des argilites lié à la rupture attendue des revêtements d'alvéoles MAVL ou des chemisage d'alvéoles HA, l'Andra [40] limite autant que possible les vides résiduels et compressibles dans les alvéoles et évalue la relation qui existe entre (i) le taux de vide laissé dans un ouvrage, (ii) l'extension maximale de

<sup>28</sup> Le foisonnement désigne ici l'augmentation apparente de volume d'un matériau excavé et/ou remanié. Cette augmentation de volume s'exprime en pourcentage appelé « taux de foisonnement »

la zone fracturée connectée (ZFC) susceptible d'apparaître autour de celui-ci après la rupture de son revêtement ou chemisage et (iii) le foisonnement de la roche environnante (cf. Figure 55).



**Figure 55 : Estimation des extensions horizontale et verticale de la zone de roche foisonnée (ZF) et de la zone de roche fracturée connectée (ZFC) à partir de la paroi excavée, en fonction du taux de vide [40]. Le taux de foisonnement pris en compte est de 10 % (transmis au cours de l'instruction).**

Ainsi, dans l'hypothèse d'une épaisseur d'argilites de l'ordre de 70 m au-dessus et au-dessous du stockage [40] et compte tenu des taux de vide indiqués par l'Andra lors de l'instruction (12-15 % pour les alvéoles MAVL de 9 m de diamètre excavé, 20-25 % pour les alvéoles MAVL de 5 m et 20-60 % pour les alvéoles HA d'un diamètre excavé de l'ordre du mètre), l'IRSN constate que le cas le plus critique serait celui de l'alvéole MAVL de 9 m de diamètre où un taux de vide de 15 % conduirait à une zone foisonnée et fracturée (ZF+ZFC) en voûte d'une fois et demie le diamètre, ce qui ajouté à la demi-hauteur de l'ouvrage laisserait donc 52 m de garde d'argilites saines<sup>29</sup>. L'IRSN note que cette garde est effectivement supérieure aux 50 m requis mais avec une très faible marge. L'IRSN observe également que pour des alvéoles MAVL d'un diamètre de l'ordre de 12 m (section de 110 m<sup>2</sup> [40]) envisagés pour les tranches ultérieures à la phase pilote au titre des pistes d'optimisation, cette approche nécessite un taux de vide inférieur à 11 %.

Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que la démarche adoptée pour établir la Figure 55 consiste à (i) évaluer le volume de roche foisonnée nécessaire au comblement de l'ensemble des vides présents dans l'alvéole, (ii) analyser différentes hypothèses de propagation de ce volume en paroi, en voûte et en radier et (iii) évaluer, sur la base du retour d'expérience acquis au Laboratoire souterrain, l'extension de la nouvelle zone de roche fracturée connectée (ZFC) susceptible d'apparaître autour de cette zone de roche foisonnée (ZF). Enfin, l'Andra a précisé que pour les évaluations de sûreté, elle considèrerait que cette zone en rupture (ZF+ZFC) et peu soutenue s'auto-colmatait mal et lui attribuait une perméabilité très élevée par rapport à celle de la garde d'argilites saines (supérieure de plus de quatre ordres de grandeur), ce qui est satisfaisant.

L'IRSN observe que la démarche présentée par l'Andra s'appuie sur la notion relativement empirique de « foisonnement » qu'elle veut conservative. L'IRSN observe que cette démarche est relativement récente puisque la

<sup>29</sup> 70 - (1,5 x 9) - (9/2) = 52

notion de foisonnement est absente des dossiers précédents [54][116]. Généralement, les résultats de calculs de foisonnement dépendent beaucoup de la géométrie supposée de la zone foisonnée ainsi que du taux de foisonnement retenu, cette valeur pouvant elle-même être fortement influencée par une présence d'eau. Concernant la géométrie de la zone foisonnée, l'IRSN note que l'Andra [96] fait deux hypothèses (propagation latérale et propagation verticale de la zone foisonnée) dont elle retient l'enveloppe, ce qui est satisfaisant ; néanmoins, l'IRSN relève que l'Andra ne dispose pas d'observation directe de l'évolution d'une zone foisonnée au Laboratoire souterrain. Concernant la valeur du coefficient de foisonnement, l'Andra a précisé pendant l'instruction que des essais sur échantillons d'argilites remaniées/compactées conduisent à des valeurs variant principalement entre 10 et 20 % cohérentes avec les observations faites sur le démonstrateur de remblayage de Richwiller (Haut-Rhin). Les valeurs basses étant pénalisantes pour l'application de sa démarche, l'Andra retient une valeur de 10 % qu'elle considère comme « *raisonnablement pénalisante* » et indique, à titre de comparaison, que les taux de foisonnement évalués au Laboratoire souterrain sont de l'ordre de 50 % lors du transport des déblais et de 40 % lors de leur mise en verses. L'Andra souligne également que le foisonnement des bétons n'est pas pris en compte dans le cas des alvéoles MAVL, ce qui augmente encore le conservatisme de la démarche. L'IRSN convient que la valeur d'un taux de foisonnement de l'ordre de 10 % est très basse par rapport aux valeurs habituellement observées dans la pratique de travaux de terrassement. Cependant, la valeur retenue par l'Andra n'est pas inférieure à la plus basse des valeurs obtenues lors de la réinterprétation des essais sur échantillons auxquels elle se réfère (6,5 % [96]) et n'apparaît donc pas immédiatement comme pénalisante. De plus, l'Andra ne précise pas l'influence que l'eau pourrait avoir sur ce mécanisme. Enfin et surtout, l'IRSN relève que les essais sur échantillons remaniés/compactés auxquels l'Andra se réfère [216] sont des essais Proctor, c'est-à-dire des essais géotechniques de compactage dynamique par impacts, habituellement utilisés pour les terrassements. L'IRSN souligne que les porosités d'argilites remaniées et compactées ainsi obtenues (31 à 35 %) ne sont que très peu représentatives des porosités attendues dans une zone d'argilites fracturées, peu remaniées et recompressées à des valeurs de l'ordre de la contrainte *in situ*, soit 7 MPa effectifs. De la même manière, l'IRSN indique que les matériaux mis en place dans le démonstrateur de Richwiller ainsi que les déblais transportés et mis en verses au Laboratoire souterrain sont également plus remaniés et moins compactés que dans les conditions de l'application que l'Andra en fait. L'IRSN estime par conséquent que le caractère conservatif du taux de foisonnement retenu dans l'application de la démarche retenue par l'Andra n'est pas établi.

En conclusion, l'IRSN estime que la démarche retenue par l'Andra dans le DOS pour évaluer les propriétés hydrauliques des argilites au droit des alvéoles de stockage en tenant compte d'un foisonnement est conservatrice dans son principe mais que le caractère pénalisant du taux de foisonnement retenu n'est pas clairement établi. Compte tenu de la faible marge en termes d'épaisseur de garde résultant de l'application de cette démarche au cas des alvéoles MAVL, l'IRSN suggère que si cette démarche était maintenue pour la DAC, le caractère pénalisant du taux de foisonnement soit justifié sur la base d'essais dédiés.

#### 4.5.4.2 Caractérisation géotechnique du Callovo-Oxfordien

L'Andra ne présente pas un dimensionnement complet des soutènements/revêtements et l'IRSN convient que ceci serait prématuré au stade du DOS. À ce stade, l'Andra indique par exemple que les alvéoles MAVL [39] seront creusés à la machine à attaque ponctuelle avec pose d'un soutènement souple (béton projeté, cales compressibles, boulons...) puis d'un revêtement rigide incluant un radier (cf. Figure 12). Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé son référentiel de sûreté qui comprend notamment les Eurocodes, des guides (ASN, CETU, CEA...) et des

recommandations de l'AFTES. L'Andra a également précisé que la construction d'une galerie de dimensions représentatives d'une portion d'alvéole MAVL (diamètre compris entre 9,45 et 11,65 m, longueur de plusieurs dizaines de mètres suivant la géométrie qui sera présentée à la DAC) est envisagée pour la période 2019-2020 au Laboratoire souterrain avec un suivi de la zone fracturée induite par le creusement ainsi que des contraintes et déformations induites dans les revêtements.

L'IRSN estime que le référentiel de sûreté identifié par l'Andra devrait effectivement permettre de dimensionner correctement les ouvrages souterrains pour les sections types présentées à ce stade (cf. Figure 12). L'IRSN souligne néanmoins que (i) l'accessibilité réduite de certains ouvrages, notamment les alvéoles MAVL, devrait rendre difficile leur surveillance/maintenance pendant la période d'exploitation (cf. chapitre 7.2.9) et que (ii) des incertitudes subsistent sur le comportement de la roche. Sur ce deuxième point l'IRSN a déjà indiqué :

- que les possibilités en matière de simulations numériques du développement d'une zone d'argilites fracturées restent limitées (cf. chapitre 4.5.4.1) ;
- que l'augmentation de profondeur devrait accroître l'endommagement (cf. chapitre 4.5.4.1) ;
- qu'il subsiste des incertitudes quant au comportement de la roche dans des niveaux autres que ceux directement expérimentés au Laboratoire souterrain ainsi que pour des galeries qui recouperaient obliquement les couches lithologiques (cf. chapitre 4.5.1) ;
- qu'il subsiste des incertitudes quant aux effets sur la roche de certains des phénomènes transitoires (cf. chapitre 5.3) dès la phase d'exploitation.

De surcroît, certains ouvrages envisagés dans Cigéo sont de diamètre nettement supérieur (14 m excavés pour la cellule de manutention des alvéoles MAVL, du même ordre pour les galeries de liaison dans le cas d'un stockage de combustibles usés) à ceux creusés au Laboratoire souterrain (maximum 9 m excavés). Enfin, l'IRSN relève que le plan d'architecture générale de Cigéo [210] montre quatre « *croisements dénivelés* » de quelques dizaines de mètres d'entraxe vertical, deux dans la zone de soutien logistique et deux autres à l'entrée de la zone de stockage MAVL. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé qu'il s'agissait de galeries superposées, perpendiculaires, d'environ 8 m de diamètre utile, séparées verticalement d'un peu plus d'un diamètre de paroi à paroi et dont le creusement ferait l'objet d'une surveillance particulière ; compte tenu de la perpendicularité de ces galeries, l'Andra estime que l'impact du creusement de la deuxième galerie par-dessus la première devrait rester limité. L'IRSN considère néanmoins qu'une évolution défavorable de ces galeries, notamment à l'entrée de la zone de stockage MAVL, serait particulièrement dommageable pendant la période d'exploitation et rappelle que l'Andra s'est engagée à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » (2010 E15.5) à préciser pour la DAC le mode de croisement et le dimensionnement des galeries ainsi qu'à vérifier leur adéquation avec les exigences de sûreté en phase après fermeture.

L'IRSN estime par conséquent que Cigéo présente des particularités notables dont l'Andra devrait tenir compte lorsqu'elle appliquera pour la DAC les règles de dimensionnement qu'elle a identifiées. Dans la mesure où l'Andra a retenu un « référentiel de sûreté » pertinent et qu'elle dispose déjà d'un retour d'expérience acquis au Laboratoire souterrain (GCS, GCR, GVA1, GVA2...) et existant d'autre part dans la pratique usuelle des travaux souterrains, l'IRSN considère que la démonstration d'un dimensionnement robuste est accessible. Il appartient donc à l'Andra de présenter pour la DAC un dimensionnement robuste et prudent (au travers d'une bonne définition de cas de charge et de coefficients de sécurité) des ouvrages dits « inaccessibles » (pour des raisons radiologiques) en tenant compte de l'ensemble des phénomènes identifiés et de phénomènes hypothétiques

comme par exemple de la possibilité de gonflement des argilites en cas de venues d'eau malgré l'état *a priori* désaturé attendu de ces ouvrages ventilés.

L'IRSN estime enfin que l'essai de construction d'une portion d'alvéole MAVL envisagé par l'Andra pour 2019-2020 pourrait être l'occasion de consolider son retour d'expérience en matière de construction et d'observation d'ouvrage de dimension décimétrique mais produira ses premiers résultats de quelques à plusieurs années après le dépôt de la DAC.

Par ailleurs, l'IRSN relève que l'Andra ne présente pas d'évaluation des risques liés aux instabilités d'ouvrages souterrains en construction ou achevés. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que « *le dimensionnement retenu dans la conception pour le soutènement des galeries permet d'exclure un effondrement de la galerie en exploitation (dimensionnement des revêtements notamment, tenue au séisme...)*. Par ailleurs, une surveillance /maintenance est assurée pendant l'exploitation ».

Nonobstant un dimensionnement correct des ouvrages, l'IRSN estime que compte tenu de la dangerosité des déchets envisagés et de la durée d'exploitation considérée, les risques d'erreurs humaines, de malfaçons ou de situations particulièrement graves qui ne permettraient pas la remise en état ou la poursuite normale de l'exploitation (catastrophe naturelle, bouleversements socio-économiques...) doivent également être considérés dans ce projet, au regard des conséquences possibles sur la roche hôte et la sûreté à long terme. De plus, ainsi qu'indiqué au chapitre 7.2.4, l'Andra n'a pas évalué les conséquences ni présenté les moyens d'intervention, par exemple en zone dite « inaccessible », pour remettre en état des désordres susceptibles de nuire à la possibilité de mettre en place ou de retirer des colis. Ce point est repris au chapitre 6.2.3 relatif à la démarche d'établissement des scénarios d'évolution altérée.

Enfin, compte tenu de la demande formulée par l'ASN [2] relative à l'adaptabilité de Cigéo à un éventuel stockage de combustibles usés, l'IRSN considère que la vérification de cette adaptabilité doit être apportée à l'échéance de la DAC. Or, l'IRSN observe que le cas des combustibles usés nécessite des hottes de dimensions plus importantes que celles des colis de l'inventaire de référence. L'Andra confirme que les dimensions des ouvrages de l'installation souterraine pourraient être plus importantes (cf. chapitre 2.7.1) afin de permettre le passage des hottes contenant les colis de combustibles usés, mais ne présente pas, au stade du DOS, l'impact d'ouvrages de grande dimension d'une part sur la roche hôte (critères d'acceptabilité de la ZFC, cf. chapitre 4.5.4.1 précédent), d'autre part sur les techniques de construction à retenir. De plus, l'IRSN estime que les croisements de galeries, où les hottes seraient amenées à changer de direction, pourraient également nécessiter un espace supplémentaire (cf. chapitre 2.7.1). Aussi, l'IRSN considère que la vérification de l'adaptabilité de Cigéo au stockage de combustibles usés doit comporter un volet relatif aux risques géotechniques à l'échéance de la DAC.

L'IRSN considère que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les éléments de démonstration relatifs à l'adaptabilité de Cigéo au stockage de combustibles usés au regard des dimensions des ouvrages et de leur impact sur la roche hôte. Ce point fait l'objet de l'engagement E14-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

En tout état de cause, l'IRSN considère que les dimensions actuelles des ouvrages de ZSL et d'accès aux alvéoles de stockage de Cigéo ne sont pas adaptées à la manutention des colis de combustibles usés.

## 4.6 HYDROGEOLOGIE DES COUCHES AQUIFERES

L'Andra a établi un modèle conceptuel hydrogéologique sur la base des données géologiques, hydrogéologiques et hydrogéochimiques, qui constitue une donnée d'entrée de l'évaluation de la maîtrise des risques en exploitation (géotechnique, inondation) et de la surveillance de l'installation de stockage et sur lequel se fondent les modèles hydrogéologiques numériques utilisés pour l'évaluation de la sûreté de l'installation après fermeture. L'ensemble de ces éléments est examiné dans le présent chapitre.

### 4.6.1 CARACTERISATION ET CONCEPTUALISATION DES COUCHES AQUIFERES DU SECTEUR DE MEUSE/HAUTE-MARNE

Ainsi que décrit dans le chapitre 2.1 du présent rapport, les formations sus-jacentes à la roche hôte sont constituées, de haut en bas, des calcaires du Barrois (aquifère à surface libre d'âge Tithonien et Kimméridgien supérieur), du Kimméridgien inférieur (semi-perméable marneux affleurant dans la partie Sud-Est du secteur de [MHM](#)) et des calcaires de l'Oxfordien. Les formations sous-jacentes à la roche hôte sont constituées du Dogger, du semi-perméable du Lias et enfin des formations du Trias. Tous les horizons calcaires rencontrés au niveau du secteur de [MHM](#) (Barrois, Kimméridgien, Oxfordien et Dogger) présentent un certain degré de karstification<sup>30</sup> à l'affleurement, qui disparaît plus ou moins rapidement lors de leur passage sous couverture.

#### 4.6.1.1 Barrois

La formation des calcaires du Barrois constitue un ensemble complexe qui, du fait notamment de la présence de niveaux marneux, présente plusieurs niveaux aquifères. Au droit de la [ZIRA](#), l'Andra distingue [73] :

- une nappe dans les « calcaires sublithographiques » (nappe inférieure), libre au droit de la zone descendrière où cette couche est à l'affleurement (cf. chapitre 2.2.1), avec une épaisseur saturée en eau d'une dizaine de mètres en période de hautes eaux. Au droit de la zone puits, cette nappe d'une vingtaine de mètres d'épaisseur est maintenue captive sous la formation marneuse de la « Pierre Châline » ;
- au-dessus, une deuxième nappe dans les « calcaires de Dommartin » (nappe supérieure), libre au droit de la zone puits.

Plus au Nord, une troisième nappe est présente dans les « calcaires cariés » et « calcaires tachetés », séparée des calcaires de Dommartin sous-jacents par la présence du banc massif de l'« oolithe de Bure ».

Les calcaires, altérés en surface, sont également fracturés et présentent de ce fait des perméabilités comprises entre  $10^{-7}$  et  $10^{-4}$  m/s voire supérieures au droit des zones karstifiées. Alimentées par l'infiltration d'eau pluviale, les différentes nappes s'écoulent vers le Nord et sont drainées par des sources situées dans les vallées de l'Ornain, de l'Ormançon, de l'Orge et de la Saulx (voir sur la Figure 1) qui entaillent les calcaires du Barrois. Elles sont en relation avec les cours d'eau, notamment à la faveur de karsts à l'origine de nombreuses pertes et résurgences.

<sup>30</sup> La karstification est un processus de dissolution des roches carbonatées au contact de l'eau d'infiltration, chargée en gaz carbonique. Cette dissolution élargit progressivement les vides initiaux dans lesquels elle circule (porosité de la roche, fractures, interbanes,...), en façonnant les parois et les agrandit jusqu'à créer de véritables chenaux et cavités qui facilitent l'infiltration et accentuent le processus amorcé.

La connaissance des calcaires du Barrois résulte des premières reconnaissances géologiques conduites entre 1994 et 1996 pour l'implantation du Laboratoire souterrain et de programmes d'investigation complémentaires, menés notamment en 2010 au niveau de l'actuelle zone puits [74]. L'Andra dispose ainsi :

- d'un réseau d'environ 30 piézomètres captant les calcaires du Barrois, qui ont fait l'objet d'un suivi en continu de plus de 15 années pour ceux à proximité de la zone descenderie et d'environ 5 ans pour ceux situés sur la zone puits ;
- d'un suivi d'une quinzaine de sources dans les vallées de l'Orge, de l'Ormançon, de la Saulx et de l'Ornain ;
- d'esquisses piézométriques permettant d'évaluer globalement les sens d'écoulement des eaux souterraines, qui plus localement peuvent être orientés suivant les structures karstiques.

D'un point de vue général, l'IRSN estime que les nombreuses données acquises sur les calcaires du Barrois procurent un état des connaissances satisfaisant à l'échelle régionale.

Pour ce qui concerne l'échelle locale, l'IRSN relève que les calcaires du Barrois ont été considérés jusqu'en 2010 par l'Andra comme un aquifère unique, les piézomètres implantés sur la zone puits n'ayant pas testé individuellement les nappes des calcaires sublithographiques et celle des calcaires de Dommartin. En revanche, les piézomètres réalisés en 2010, qui avaient tous une profondeur de 30 m, ont permis pour certains d'identifier les niveaux piézométriques propres aux calcaires de Dommartin. De ce fait, l'Andra présente dans le [DOS](#) des esquisses piézométriques mêlant des mesures dans les différents niveaux aquifères [194] et d'autres distinguant les deux nappes [53][73] (cf. Figure 56).

Il est à noter qu'avec la réalisation de nouveaux piézomètres dans le cadre des reconnaissances géotechniques, l'Andra disposera de données complémentaires pour la zone puits et la zone descenderie. Aussi, l'IRSN estime qu'il conviendrait que dans le dossier de [DAC](#), les cartes piézométriques des calcaires du Barrois individualisent systématiquement les nappes « inférieure » et « supérieure » et précisent leurs extensions.

L'IRSN observe en outre que d'après certaines mesures réalisées dans des piézomètres postérieurs à 2010, il n'est pas exclu qu'au droit de la zone puits les intercalations marneuses dans les calcaires de Dommartin puissent également individualiser plusieurs niveaux aquifères ; l'IRSN encourage donc l'Andra à poursuivre la caractérisation de la zone puits.

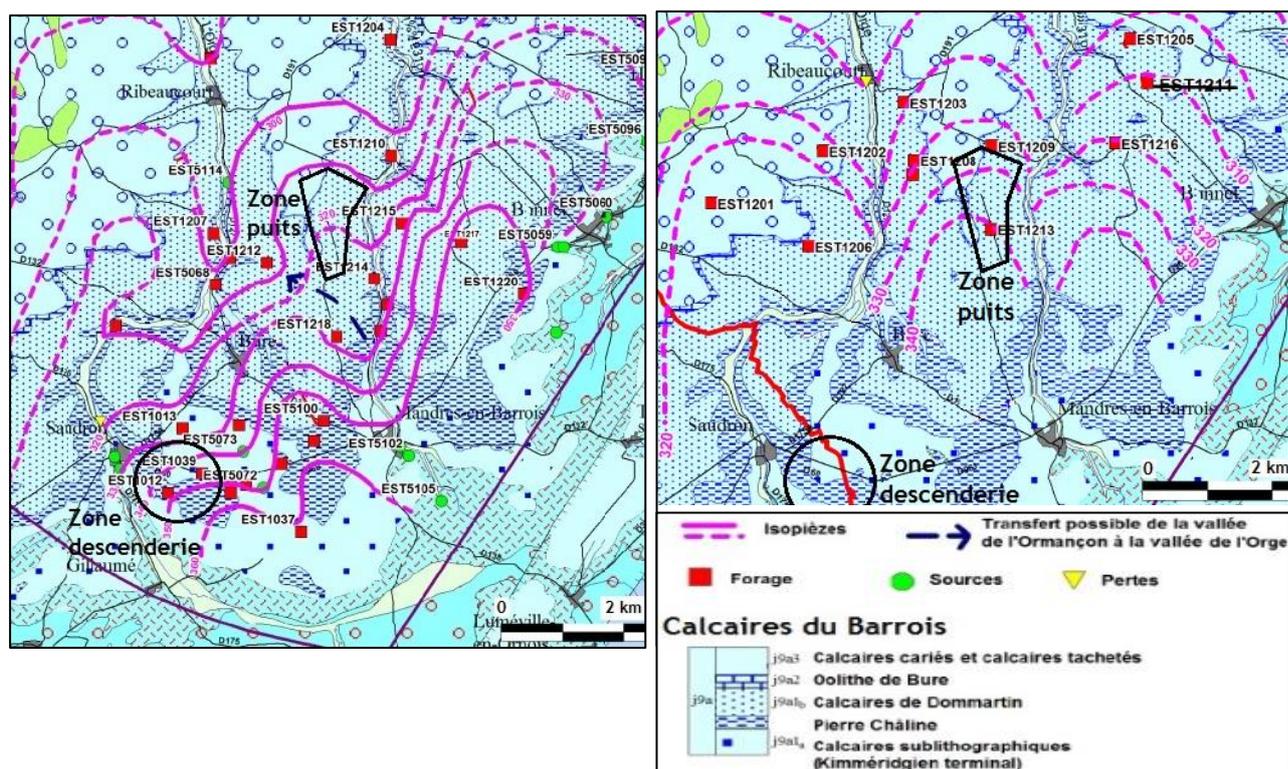


Figure 56 : Esquisses piézométriques des calcaires du Barrois en période de basses eaux. A gauche, calcaires sublithographiques ; à droite, calcaires de Dommartin [73].

Les éléments présentés [39] font apparaître, à l'aval du site, la présence de karsts se traduisant par des pertes et des résurgences dans les cours d'eau circulant à proximité du site (cf. Figure 1 et chapitre 2.2.1). Au cours de la présente instruction, l'Andra a indiqué qu'elle envisageait de caractériser les circulations karstiques associées aux pertes de l'Ormançon et l'Orge, notamment au voisinage de la zone puits, pour identifier d'éventuels transferts entre vallées. L'IRSN suggère qu'une synthèse des pertes et résurgences connues dans les calcaires du Barrois au voisinage du site soit présentée dans le dossier accompagnant la DAC.

Enfin, ainsi qu'indiqué au chapitre 7.3.2 relatif au risque d'inondation d'origine externe dans les installations de surface, les éléments présentés nécessitent d'être complétés dans l'environnement immédiat de ces installations, en particulier par un suivi piézométrique local qui permettra d'acquérir des chroniques piézométriques représentatives du site. Outre ces chroniques piézométriques locales, la présentation dans le dossier accompagnant la DAC du contexte hydrogéologique local au droit des installations serait en outre améliorée si elle était accompagnée de coupes figurant les deux nappes des calcaires du Barrois.

#### 4.6.1.2 Oxfordien

Ainsi que décrit au chapitre 2.1 du présent rapport, d'après les données acquises en forages, l'aquifère de l'Oxfordien présente une transmissivité globale comprise entre  $10^{-7}$  et  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s dans la ZT<sup>31</sup>, et entre  $10^{-3}$  et  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s dans la ZFD [53]. L'Andra a précisé, au cours de l'instruction, avoir retenu des valeurs de porosité cinématique pour l'Oxfordien égales aux porosités totales du modèle pétrophysique (comme pour les autres couches aquifères) et comprises entre 18 et 24 % (et entre 18 et 20 % dans le Dogger) à l'échelle du secteur de MHM. Au

<sup>31</sup> Si l'on excepte la couche marneuse juste au-dessus du Callovo-Oxfordien (perméabilités de  $10^{-11}$  à  $10^{-10}$  m/s), les perméabilités de matrice des couches de l'Oxfordien représentées dans le modèle Andra sont comprises entre  $3.10^{-9}$  et  $9.10^{-7}$  m/s

niveau de la **ZT**, les écoulements sont orientés vers le Nord-Nord-Ouest (Figure 59) avec un gradient hydraulique d'environ 0,4 % [88] et, ainsi que précisé au cours de l'instruction, une vitesse globale de l'ordre de 1 km/100 ka. L'Andra indique qu'au sein de la **ZFD** (cf. chapitre 2.1) orientée Nord Ouest-Sud Est, les fractures ouvertes conduisent à une recharge depuis les affleurements situés au SE et que les lignes piézométriques sont plus incertaines dans cette zone plus transmissive dans laquelle le comportement hydraulique est différent du reste du secteur. L'IRSN rappelle (cf. chapitre 2.1) qu'au Nord de cette zone (i.e., dans la **ZT** et au Nord de celle-ci), les horizons producteurs de l'Oxfordien calcaire sont séparés par des couches marneuses appelées globalement « Série grise », qui peuvent les isoler ou les rendre indépendants hydrauliquement. Or, du fait de l'orientation attendue vers le Nord-Nord-Ouest du panache de radionucléides et toxiques chimiques relâchés au toit du Callovo-Oxfordien, **l'épaisseur et les caractéristiques hydrauliques des marnes de la Série grise retenues *in fine* pour la simulation numérique des écoulements peuvent conduire à un effet de « couverture » locale pour ces solutés et impacter leur migration vers les exutoires** (cf. chapitre 4.6.4.1.2 du présent rapport). La représentation conceptuelle et numérique de cette Série grise par l'Andra est donc plus particulièrement examinée ci-dessous.

Les couches de la Série grise correspondent, selon les forages de la **ZT**, à un, deux ou trois niveaux correspondant sur les logs des forages transmis au cours de l'instruction, à des « marnes » ou « calcaires argileux » d'épaisseur inframétrique à métrique au Sud à plurimétrique au Nord. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction avoir également identifié ces niveaux par reconnaissance géophysique. Ces niveaux sont représentés par deux couches dans le modèle hydrogéologique numérique de l'Andra, appelées « Marnes inférieures à moyennes » et « Marnes supérieures », ainsi qu'illustré sur la coupe en Figure 57. Dans son modèle, l'Andra retient que dans la partie Nord de la **ZT**, les horizons Hp1 à Hp4 constituent la nappe dite de l'Oxfordien moyen et les horizons Hp5, Hp6 et Hp7 constituent la nappe dite de l'Oxfordien supérieur [40] ; ces nappes sont séparées par les Marnes inférieures à moyennes de la Série grise. L'horizon Hp5 est localement isolé de Hp6 et Hp7 par la couche moins épaisse des Marnes supérieures de la Série grise. En allant vers le Sud, les couches marneuses s'amincissent ; l'Andra a précisé au cours de l'instruction leur limite Sud-Ouest, passant à proximité de la bordure Sud **ZIRA**, au-delà de laquelle l'épaisseur négligeable de ce semi-perméable la conduit à ne considérer qu'une seule nappe de l'Oxfordien calcaire. Les limites de ces couches sont présentées sur la Figure 58. Pour les deux couches marneuses de la Série grise, représentées explicitement dans le modèle numérique (cf. Figure 57), l'Andra a indiqué au cours de l'instruction retenir des perméabilités verticales de  $10^{-13}$  m/s et horizontales de  $10^{-12}$  m/s sur la base de diagraphies et de mesures sur débris de forages ainsi que des épaisseurs, comme présenté sur la Figure 58, allant dans la **ZIRA** jusqu'à 80 m environ pour les Marnes inférieures à moyennes et jusqu'à 40 m pour les Marnes supérieures.

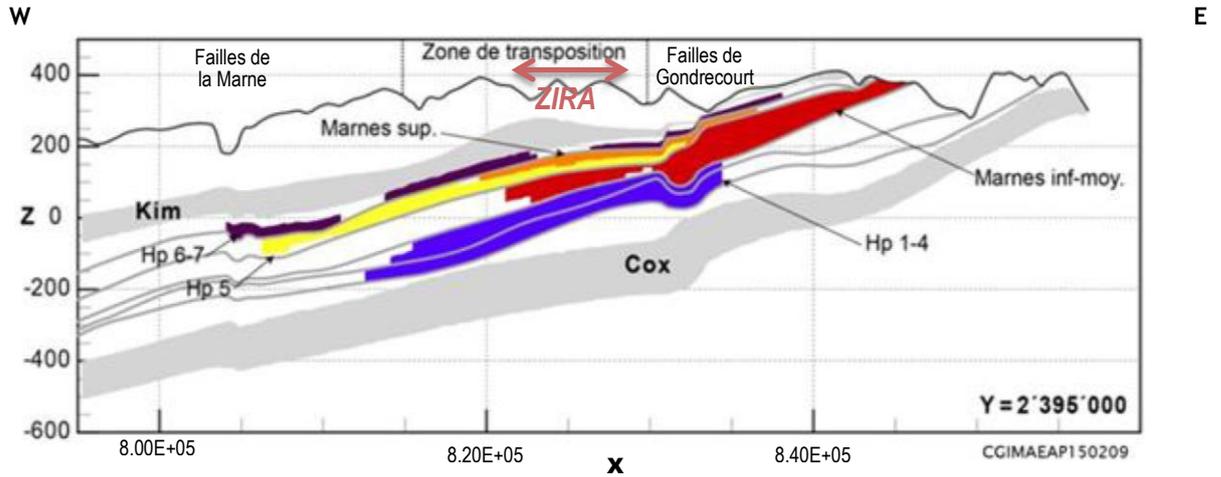


Figure 57 : Coupe Est-Ouest de la géométrie des couches de l'Oxfordien (marnes de la Série grise et horizons producteurs) passant dans la partie Sud de la ZIRA, avec les altitudes en mètres (Z) selon les repères géographiques en Lambert III (X) [39]. Limites des couches représentées dans le modèle numérique de l'Andra en traits gris, sur lesquelles sont placées les couches des horizons producteurs Hp1-Hp4 en bleu, Hp5 en jaune et Hp6-Hp7 en violet, les Marnes inférieures à moyennes en rouge et les Marnes supérieures en orange.

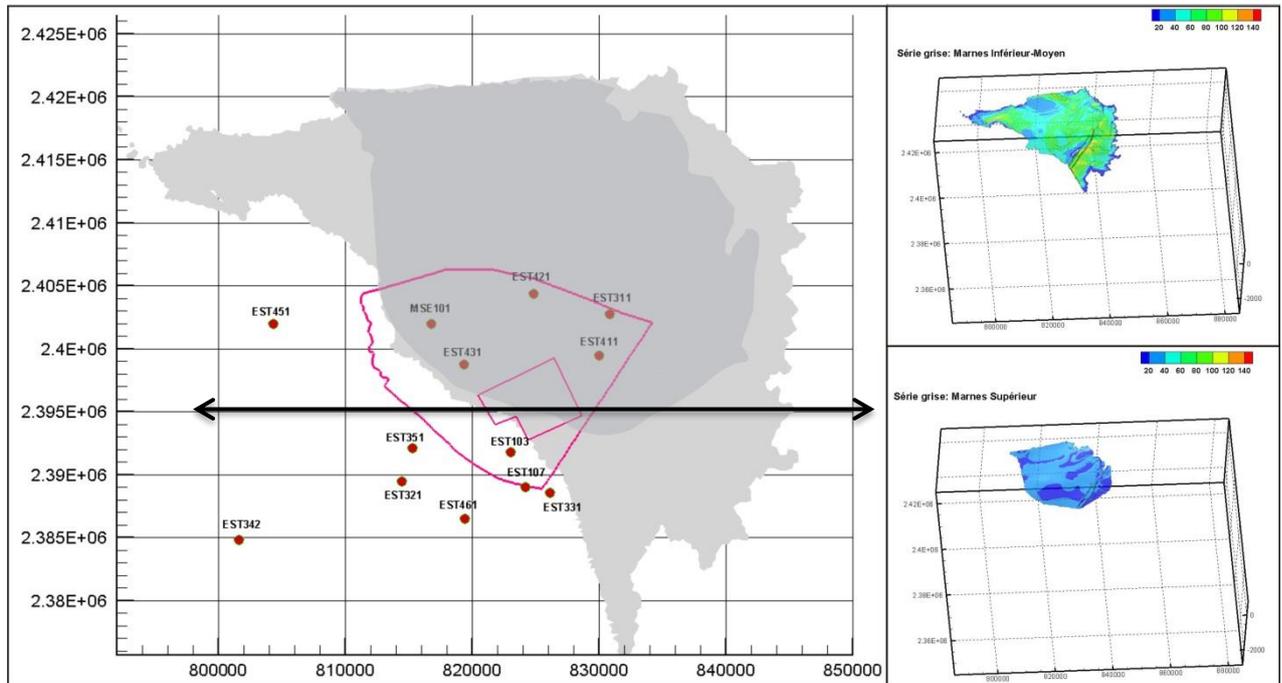


Figure 58 : Représentation de la Série grise dans le modèle numérique de l'Andra. A gauche : carte de l'extension des Marnes inférieures à moyennes en gris clair et des Marnes supérieures en gris foncé (double flèche : position de la coupe en Figure 57). A droite : vue 3D des épaisseurs (mètres) des Marnes inférieures à moyennes en haut et des Marnes supérieures en bas (Andra, transmis au cours de l'instruction)

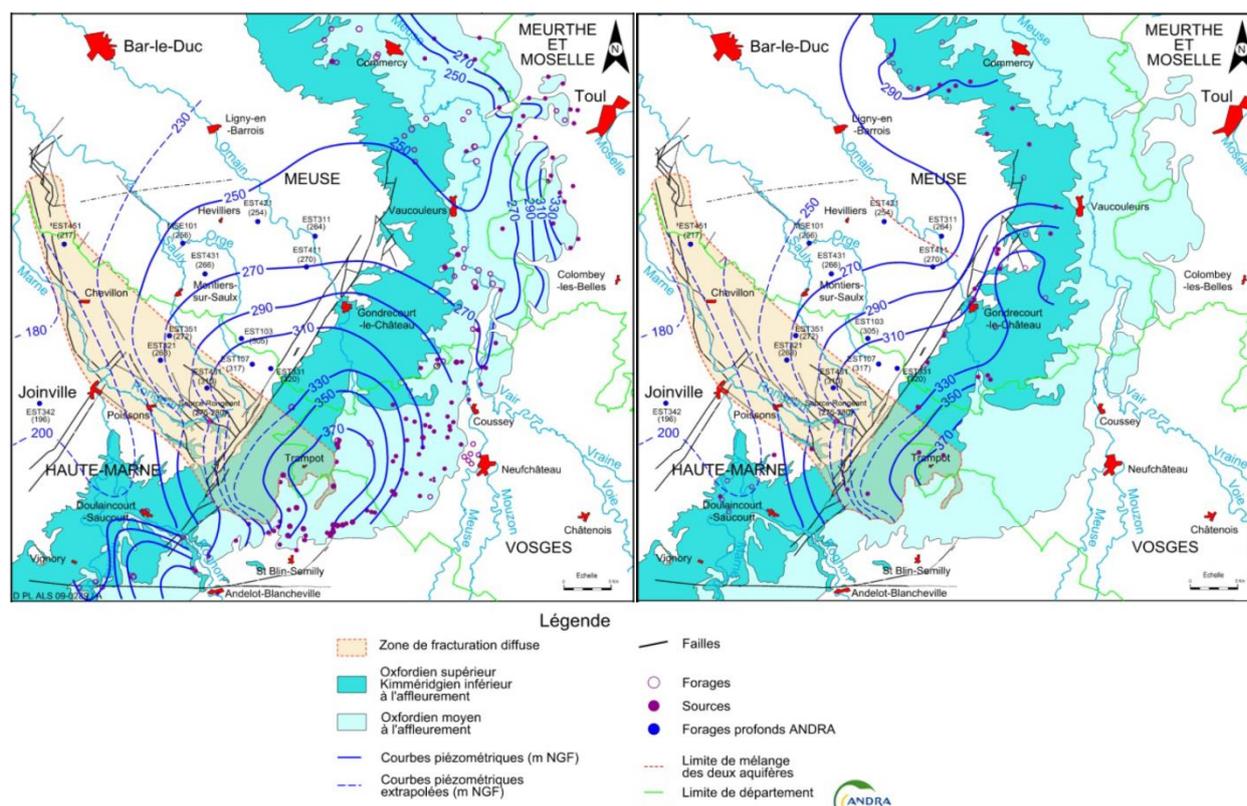


Figure 59 : Esquisses piézométriques de l'Oxfordien moyen (gauche) et de l'Oxfordien supérieur (droite) [53]

La caractérisation hydrogéologique et la représentation conceptuelle de l'Oxfordien présentées par l'Andra n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN, hormis pour ce qui concerne la porosité cinématique et les propriétés de la Série grise.

S'agissant des valeurs de porosité cinématique prises par l'Andra égales à celles de la porosité totale dans les couches aquifères, l'IRSN observe que l'Andra retient les porosités maximales possibles dans les aquifères, ce qui revient à minimiser les vitesses d'écoulement convectif, qui leur sont inversement proportionnelles (cf. chapitre 4.5.2). L'IRSN observe que la valeur « moyenne » des porosités cinématiques généralement mesurées dans les calcaires, tel que cité dans la littérature est autour de 5 % (1 à 5 % pour la craie, plus de 10 % pour un calcaire très fissuré). A défaut de mesures directes de la porosité cinématique aux abords de la ZIRA<sup>32</sup>, le choix de retenir une telle valeur « moyenne » aurait été majorant pour les évaluations de sûreté et aurait conduit à des vitesses d'écoulement trois à quatre fois plus rapides. Aussi, à l'instar des remarques formulées par l'IRSN au chapitre 4.5.2 sur la porosité cinématique du Callovo-Oxfordien, l'IRSN estime que pour la DAC, il conviendrait que l'Andra justifie les valeurs retenues pour la porosité cinématique des couches aquifères, et en tout état de cause retienne des valeurs inférieures aux porosités totales. L'Andra devrait en sus présenter l'impact de l'incertitude résiduelle sur ce paramètre sur son évaluation des vitesses de transfert dans les aquifères. Ceci est repris dans l'engagement E15-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 présenté au chapitre 4.6.1.3 du présent rapport.

S'agissant de la Série grise, l'IRSN observe comme l'Andra que les couches marneuses séparant les niveaux aquifères de l'Oxfordien sont connues de longue date des sédimentologues, notamment dans les subdivisions de l'Oolithe de

<sup>32</sup> Un essai de traçage a été effectué dans l'Oxfordien calcaire en limite Nord de la ZT entre les forages EST311 à EST313 distants de 12 m ; la porosité cinématique du niveau aquifère testé correspondrait à environ 40% de la porosité totale [53].

Saucourt et des Calcaires et Marnes à Serpules par De Loriol et al. (1872 [255]), Stchépinsky (1965 [141]), Mégnien (1980 [244]) ou des calcaires à Astartes inférieurs par exemple par Maubeuge (1974 [245]). Cependant, l'IRSN s'interroge quant à la représentation de ces marnes en termes d'épaisseur, de perméabilité et d'extension dans le modèle de l'Andra, qui semble s'écarter des connaissances qu'elle a acquises.

En premier lieu, l'IRSN constate que les logs des forages de la **ZT** (cf. Figure 1) suggèrent des épaisseurs des couches de la Série grise environ dix fois inférieures à celles prises en compte par l'Andra (cf. Figure 57). Par exemple, une seule couche marneuse de respectivement 3 et 4 m d'épaisseur est identifiée sur les logs des forages EST431 et MSE101 alors que dans le modèle de l'Andra, la Série grise atteint environ 100 m d'épaisseur vers ces forages. Ces couches ont été décrites, plus précisément que dans la littérature ancienne précitée, par Carpentier (2004 [76]) sur la base des forages disponibles à l'échelle régionale et d'observations de terrain : par exemple, les « Marnes inférieures à moyennes » de la Série grise pourraient correspondre à une partie des Calcaires à polypiers de Pagny et aux Marnes silteuses de Maxey et les « Marnes supérieures » pourraient correspondre aux Marnes à huîtres de Pagny. En particulier d'après Carpentier (2004 [76]), celles-ci sont respectivement d'environ 6 et 10 mètres d'épaisseur d'après les forages et observations de terrain en limite Nord de la **ZT** alors que la Série grise atteint approximativement 120 m dans le modèle de l'Andra au niveau de cette limite.

En second lieu, l'IRSN souligne les grandes incertitudes des mesures de perméabilité à partir de débris issus de forages. A cet égard, les perméabilités de  $10^{-12}$  à  $10^{-13}$  m/s retenues semblent particulièrement faibles pour des niveaux décrits dans les logs comme des « marnes » ou des « calcaires argileux ». L'IRSN rappelle par ailleurs qu'en 2005, il indiquait qu'il était possible de simuler la perturbation hydraulique de l'Oxfordien liée au rabattement lors du fonçage des puits du Laboratoire en associant une perméabilité verticale faible des couches séparant les niveaux poreux Hp1-4 et Hp5 à la présence de structures hydrauliquement conductrices. Il est effectivement probable que ces couches de faible épaisseur ne soient pas homogènes en termes de caractéristiques lithologiques et soient de plus localement traversées par des structures drainantes. Il conviendrait donc de prendre en compte ces potentielles hétérogénéités dans l'appréciation des valeurs de transmissivités globales retenues dans la modélisation numérique.

Enfin, concernant, l'extension Sud-Ouest de la Série grise, l'IRSN relève que les données acquises à ce jour dans tous les forages de la **ZT**, y compris ceux situés dans sa partie Nord-Est, n'indiquent pas de charges hydrauliques différentes entre les nappes de l'Oxfordien supérieur et de l'Oxfordien moyen, qui auraient appuyé l'hypothèse de deux nappes indépendantes à cette échelle. Pour leur part, Linard et al. (2011 [71]) ont proposé, en se basant sur les données géochimiques des eaux (cf. chapitre 4.6.2 du présent rapport), une limite Sud-Ouest d'extension de la couche qui sépare les deux nappes (« Marnes inférieures à moyennes ») passant entre les forages EST311 et EST411 (Figure 1) soit plusieurs kilomètres au Nord-Est de la **ZIRA**.

L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que « le programme de forages ZBS (Zira Borehole Survey) envisagé [...] en 2017 ou 2018 permettra d'acquérir des connaissances complémentaires locales pour la conceptualisation géologique et hydrogéologique de l'Oxfordien, notamment en termes de géométrie de la série des marnes grises et de gradient hydraulique vertical entre l'aquifère de l'Oxfordien moyen et l'Oxfordien supérieur ». Au regard des remarques précédentes sur la caractérisation des marnes de la Série grise de l'Oxfordien, l'IRSN estime que l'épaisseur et les propriétés des marnes dans l'Oxfordien, qui peuvent jouer un rôle de barrière hydraulique entre l'Oxfordien moyen et l'Oxfordien supérieur, méritent effectivement d'être précisées. Outre la géométrie des couches marneuses et le gradient hydraulique entre les niveaux aquifères, il conviendrait de compléter, dans ce programme **ZBS**, les connaissances en termes de perméabilités des couches constituant la Série grise. Il apparaît en effet essentiel d'améliorer la connaissance des écoulements souterrains ainsi que l'a demandé l'ASN à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » (2011 R17 [1], recommandation initialement formulée par le **GPD** à l'issue de

l'examen du « Dossier 2005 »), en particulier dans l'Oxfordien. Ce point est repris dans l'engagement E15-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 présenté au chapitre 4.6.1.3 du présent rapport.

L'impact de la prise en compte de cette Série grise dans la simulation numérique hydrogéologique de l'Andra en termes d'effet « couverture » potentiel (maintien des solutés dans le niveau inférieur de l'Oxfordien et éloignement des exutoires) est examiné au chapitre 4.6.4.1.2 du présent rapport.

#### 4.6.1.3 Dogger

Ainsi que décrit au chapitre 2.1 du présent rapport, les mesures de transmissivités du Dogger en forages sont comprises entre  $5.10^{-9}$  et  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s au niveau de la **ZT**, et entre  $10^{-6}$  et  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s dans la **ZFD** [53]). A l'exception de deux forages (EST210 et HTM102, voir sur Figure 1) qui ont fait l'objet d'un test global incluant le Bajocien, ces mesures correspondent au principal horizon producteur, situé dans le Bathonien supérieur (cf. Figure 2). Au niveau de la **ZT**, les écoulements sont davantage orientés globalement vers le Nord-Ouest ; ils sont davantage orientés vers l'Ouest au niveau de la **ZIRA** (Figure 60) avec un gradient hydraulique d'environ 0,1 % [88].

Au sein de la **ZT**, ainsi que précisé au cours de l'instruction, l'Andra considère que « *les vitesses d'écoulement des eaux [sont] plus rapides dans le Dogger (de l'ordre de 5 km/100 ka) que celles dans l'Oxfordien (de l'ordre de 1 km/100 ka)* » ; l'Andra explique ces vitesses notamment par la perméabilité élevée du Bathonien moyen et supérieur ( $10^{-6}$  m/s) mesurée dans le Bathonien supérieur [53] au droit du forage EST432 (Figure 1), correspondant à un « *faciès granulaire de type barrière* »<sup>33</sup> [58]. L'Andra a ajouté que « *le modèle hydrogéologique conceptuel du Dogger intègre les données des forages mais aussi les données géologiques comme la barrière granulaire calcaire dont l'extension se superpose avec le plateau piézométrique caractérisé par un faible gradient hydraulique (0,001 m/m) et impliquant des perméabilités relativement élevées* » (Figure 60). Aussi, de manière générale, les perméabilités du Dogger ( $2.10^{-9}$  à  $4.10^{-6}$  m/s dans la **ZT**, si l'on excepte la couche des Marnes de Longwy de  $10^{-11}$  à  $10^{-10}$  m/s) retenues par l'Andra dans son modèle d'écoulement sont plus importantes que celles de l'Oxfordien (entre  $3.10^{-9}$  et  $9.10^{-7}$  m/s).

---

<sup>33</sup> « Barrière » s'entend ici au sens d'une construction récifale (comme une « barrière de corail »), qui présente une forte porosité, et non pas comme un obstacle hydraulique

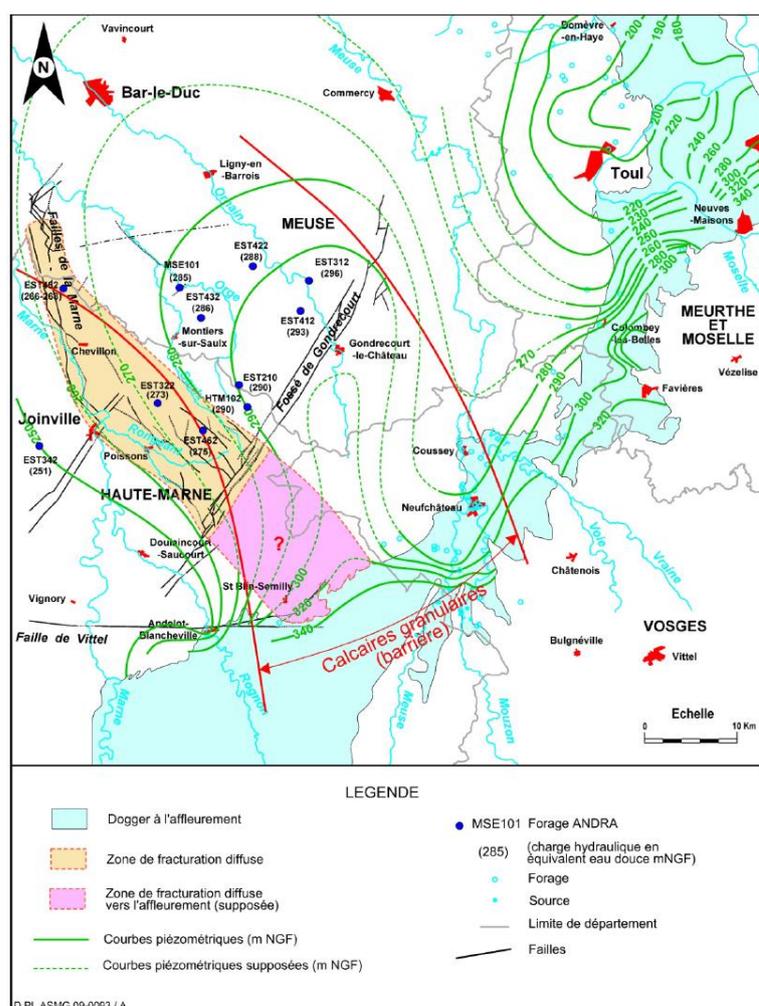


Figure 60 : Esquisse piézométrique du Dogger [53]

L'IRSN convient que les reconstitutions paléogéographiques du Dogger réalisées par divers auteurs (notamment Brigaud *et al.*, 2009 [252]) à partir d'observations de terrain et de forages conduisent à supposer l'existence d'une bande de sédimentation de type « haut fond », c'est-à-dire présentant notamment des calcaires oolithiques<sup>34</sup>, orientée NW-SE au Bathonien supérieur et passant approximativement par la **ZT**. Localement, une absence de cimentation entre les grains oolithiques, ou leur dissolution lors de phases d'émersion passées comme le présentent Brigaud *et al.* (2009 [252]), pourrait effectivement expliquer la présence de zones localement plus transmissives au sein de la **ZT** telles que celle reconnue par le forage EST432. Cependant, comme l'Andra le souligne sur la base des données de sismique 2D et 3D, pour ces « faciès les plus poreux du Dogger [...], l'extension des zones à plus forte porosité est inférieure au kilomètre et elles ne sont pas connectées entre elles » [58]. Ainsi, l'IRSN considère que ces faciès localement très poreux ne sont ni représentatifs de l'ensemble de la couche du Bathonien supérieur, ni extrapolables aux autres niveaux du Dogger, qui d'après les études précitées correspondent à des faciès moins poreux (oolithiques à grains cimentés, calcaires fins ou marnes). Ceci est appuyé par les mesures hydrogéologiques, puisqu'excepté pour le forage EST342, les transmissivités mesurées en forage par l'Andra sont globalement plus élevées dans l'Oxfordien ( $10^{-7}$  à  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s dans la **ZT**,  $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s dans la **ZFD**) que dans le Dogger

<sup>34</sup> Les calcaires oolithiques sont formés de petits grains (oolithes) consistant chacun en un morceau de coquille, un piquant d'oursin ou un cristal (quartz, ...) entouré de couches de calcite. Ils se déposent dans des eaux chaudes très calcaires, potentiellement à proximité de récifs coralliens.

(essentiellement le Bathonien supérieur, cf. ci-dessus), jusqu'à deux ordres de grandeur dans la **ZT**, voire plus dans la **ZFD**, bien que l'on observe pour le Dogger une plus forte dispersion des transmissivités. En outre, Linard et al. (2011 [71]) considèrent, sur la base des données géochimiques des eaux (cf. chapitre 4.6.2 du présent rapport), que les écoulements sont globalement plus lents dans le Dogger que dans l'Oxfordien en raison d'une faible transmissivité des horizons producteurs et d'une probable absence de connectivité des zones les plus transmissives. **Aussi, l'IRSN considère que les transmissivités du Bathonien dans la ZT retenues dans le modèle hydrogéologique de l'Andra devraient davantage refléter les mesures réalisées en forages.**

En revanche, pour ce qui concerne la couche du Bajocien inférieur (« calcaires à polypiers inférieurs »), à laquelle l'Andra attribue, dans la **ZT**, des perméabilités relativement faibles dans son modèle hydrogéologique par rapport aux couches du Bathonien, l'IRSN rappelle que des anomalies présentant un allongement WNW-ESE, attribuées à des corps récifaux par l'Andra, ont été identifiées par la sismique 3D réalisée à l'aplomb du Laboratoire souterrain ainsi que celle réalisée sur la **ZIRA** (cf. chapitre 4.1). L'IRSN observe que de telles formations récifales ont en effet été reconnues dans le secteur [252]. Aussi, si la forte porosité qui caractérise usuellement les corps récifaux n'a pas été cristallisée au cours l'histoire géologique, ceux-ci pourraient constituer des drains locaux. A cet égard, l'engagement pris par l'Andra (2013 E3.3 [1]) de présenter, dans le dossier accompagnant la **DAC**, une analyse des propriétés globales de transport de ces corps récifaux du Bajocien inférieur (cf. chapitre 4.1) et de préciser leur rôle dans le modèle hydrogéologique reste d'actualité.

En outre, d'après les éléments transmis au cours de l'instruction, l'Andra attribue, pour toutes les couches du Dogger sauf celle des Marnes de Longwy, une perméabilité encore plus élevée que pour la **ZT** (d'environ un ordre de grandeur) à la zone située au Sud-Ouest de la **ZFD**, dans laquelle aucune mesure hydrogéologique n'est disponible. L'IRSN estime qu'au regard des connaissances précitées sur la paléogéographie du Dogger, cette zone située au sud de la bande de « haut-fond » correspondrait au Dogger à une sédimentation calcaire lagunaire (plateforme interne) [252], de perméabilité généralement plus faible que les calcaires oolithiques ou récifaux rencontrés dans la **ZT**. **L'IRSN estime donc que l'Andra devrait retenir des perméabilités plus faibles dans la zone au Sud-Ouest de la ZFD que dans la ZT.**

Ainsi, l'IRSN considère que la paramétrisation du modèle hydrogéologique retenue par l'Andra en termes de perméabilités/transmissivités du Dogger n'est pas pleinement cohérente avec la connaissance du secteur de **MHM**. Ce modèle conduit à des vitesses d'écoulement systématiquement plus rapides dans le Dogger qui peuvent être, considérées comme *a priori* pénalisantes. Toutefois, il n'est pas exclu que ce manque de cohérence avec les données acquises sur le terrain puisse conduire à une représentation déformée des directions d'écoulement et à un élément de justification incorrect de l'implantation du stockage en termes de profondeur et de localisation, comme indiqué aux chapitres 4.5.1, 4.6.4.1.2 et 4.6.4.2 du présent rapport. Aussi, compte tenu des remarques formulées ci-avant sur la représentation par l'Andra des couches de l'Oxfordien (cf. chapitre 4.6.1.2) et du Dogger dans les modèles hydrogéologiques,

L'IRSN estime que le modèle hydrogéologique de l'Andra dans le dossier de DAC devra tenir compte, au mieux des connaissances, des propriétés géologiques et hydrogéologiques des formations de l'Oxfordien et du Dogger, en particulier pour représenter :

- les horizons poreux et la Série grise de l'Oxfordien ;
- les unités du Dogger dans la zone de transposition ainsi qu'au-delà jusqu'aux exutoires potentiels de cette formation.

Ce point fait l'objet de l'engagement E15-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

#### 4.6.1.4 Trias

Les niveaux inférieurs de la pile sédimentaire ont été atteints par le forage EST433 de l'Andra (Figure 1). Les données indiquent une salinité de 178 g/L et une charge hydraulique corrigée de cette salinité de 233 m NGF. L'Andra a toutefois précisé au cours de l'instruction que cette valeur de charge hydraulique mesurée dans l'aquifère du Buntsandstein (Trias inférieur) était unique et ne pouvait pas être confirmée et qu'aucune valeur de charge n'avait été obtenue dans les autres aquifères du Trias moyen (Muschelkalk) et du Trias supérieur (Rhétien).

Il est à noter que l'Andra a présenté, au cours de l'instruction, la charge simulée dans l'aquifère du Trias. La simulation fait apparaître une charge d'environ 262 m NGF au niveau du forage EST433, soit supérieure d'une trentaine de mètres à la mesure dans le Buntsandstein. Cette charge hydraulique du Trias n'a cependant pas d'impact notable sur les écoulements dans les aquifères encadrant directement le Callovo-Oxfordien. **Ceci n'appelle donc pas de remarque de la part de l'IRSN.**

#### 4.6.2 *HYDROGEOCHIMIE DES AQUIFERES*

Les analyses géochimiques et isotopiques réalisées par l'Andra sur des eaux prélevées dans les forages du secteur de **MHM** [53] ont pour objectif de consolider le modèle hydrogéologique conceptuel notamment en termes de rôle des différentes couches dans les transferts verticaux et de vitesses d'écoulement horizontales.

Pour ce qui concerne la conceptualisation des transferts verticaux, pour les aquifères sous couverture, l'Oxfordien affiche un faciès bicarbonaté sulfaté magnésien à sodique tandis que le Dogger présente un faciès chloruré sulfaté sodique [53]. Pour chacun de ces aquifères, les valeurs de salinité les plus faibles sont mesurées principalement dans les forages de la **ZFD** [53][72] ; l'Andra les explique par une participation d'eaux météoriques transportées plus rapidement par cette zone fracturée depuis les aires d'affleurement situés à l'Est de la **ZT**. A l'exclusion de la **ZFD**, les eaux de l'Oxfordien et du Dogger sont marquées notamment par une minéralisation et une composition isotopique de l'eau distinctes ; par exemple, la salinité varie entre 1 et 8 g/L pour le Dogger et entre 0,5 et 2 g/L pour l'Oxfordien. L'Andra conclut à l'existence d'une séparation géochimique de ces aquifères par le semi-perméable du Callovo-Oxfordien [53]. Pour les aquifères du Barrois, Kimméridgien, Oxfordien et Dogger situés à proximité ou au niveau des aires d'affleurement, l'Andra observe qu'ils présentent tous un faciès bicarbonaté calcique [53] caractéristique de la dissolution de leurs carbonates par des eaux de pluie acides et avec une faible minéralisation (< 1 g/L). L'Andra conclut au caractère géologiquement « récent » de ces eaux en s'appuyant d'une part sur la correspondance des compositions isotopiques avec celles des eaux météoriques actuelles et d'autre part sur la présence de  $^{14}\text{C}$  dissous ou de  $^{36}\text{Cl}$ , issu de la production atmosphérique par rayonnement cosmique ou des essais nucléaires aériens réalisé depuis la seconde guerre mondiale. **Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

Pour ce qui concerne plus particulièrement la géochimie des eaux de l'Oxfordien, les données acquises dans les forages situés au Nord-Est de la **ZT** (EST311, EST411 et EST421) montrent des phases sulfatées que Linard et al. (2011 [71]) attribuent à de l'anhydrite associée à de la dolomite qui serait située dans le niveau L2c (Oxfordien supérieur). Or ce processus ne s'observe pas dans les niveaux sous-jacents. Ces caractéristiques seraient imputables à la présence des marnes de la Série grise, dont l'épaisseur dans ce secteur permet une différenciation géochimique des eaux de l'Oxfordien supérieur et de l'Oxfordien moyen. Sur la base de ces observations, les auteurs proposent une limite Sud-Ouest pour la couche des marnes de la Série grise passant entre le forage EST311 et les forages EST421/EST411, ces derniers montrant une moindre différenciation. **Ainsi qu'indiqué au chapitre 4.6.1.2, l'IRSN considère que l'Andra devrait tenir compte de ces éléments pour définir l'extension de la Série grise dans son modèle hydrogéologique.**

En outre, sur la base de profils de traceurs naturels (halogénures, molécules de l'eau et d' $^4\text{He}$ ) acquis sur échantillons de forages de la **ZT** et des simulations numériques tentant de les reproduire (e.g., Lavastre et al., 2005 [148]; Mazurek et al., 2008 [149]; Fourré et al., 2011 [150]; Rebeix et al., 2011 [151] et 2014 [152]), l'Andra conclut [53] que la salinité des eaux du Dogger a été acquise par diffusion à partir des niveaux salifères du Trias (Keuper). S'appuyant notamment sur les résultats des travaux de thèse de Bensenouci et al. (2011 [153]; 2014 [154]) via le programme TAPSS 2000 autour du forage EST433 (cf. chapitre 4.2), **l'IRSN est en accord avec cette conclusion. La détermination de l'origine de la salinité des eaux a fait l'objet d'une partie de la recommandation 2011 R5 du GPD à l'issue de l'instruction du « Dossier 2005 », que l'IRSN considère donc comme pouvant être soldée sur ce point particulier.**

Pour ce qui concerne l'estimation des vitesses de transfert dans les aquifères du Dogger et de l'Oxfordien, l'Andra a testé différents outils géochimiques. Les outils permettant une datation relative tels que les isotopes stables de l'eau ont conduit l'Andra à conclure à une période d'infiltration différente des eaux du Dogger et de l'Oxfordien sans toutefois pouvoir en déduire leur temps de résidence, c'est-à-dire l'âge des eaux depuis leur infiltration en zone d'affleurement. L'Andra a également testé des outils de datation au moyen d'isotopes radioactifs (e.g.,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  ...) ou radiogéniques (e.g.,  $^4\text{He}$ ) qui sont issus d'une production atmosphérique par rayonnement cosmique ou par un processus d'activation ou de décroissance radioactive en subsurface, ou encore des activités humaines. L'Andra ne présente cependant pas de conclusion de ces études [53] en termes de temps de résidence. L'IRSN convient de la difficulté inhérente à l'utilisation de ces traceurs, qui cumulent parfois plusieurs sources, ce qui nécessite d'utiliser des modèles de correction pour remonter à leur concentration ou activité initiale (par exemple pour le  $^{14}\text{C}$ , pour lequel les estimations d'âge des eaux ne sont donc pas utilisables en l'état des connaissances). En outre, le  $^3\text{H}$  et dans une certaine mesure le  $^{14}\text{C}$  ont une demi-vie trop courte pour se trouver en quantité mesurable dans les eaux des aquifères, hormis à proximité de leurs aires de recharge. Les études réalisées par l'Andra au moyen du  $^{36}\text{Cl}$  et de l' $^4\text{He}$  sont en revanche utilisables et examinées ci-dessous.

Concernant le  $^{36}\text{Cl}$ , l'IRSN souligne que seules les eaux présentant une fraction suffisante de chlore d'origine atmosphérique par rapport au chlore provenant des sels (cf. ci-dessus); ainsi, seules les eaux de l'Oxfordien dans la **ZFD** peuvent être datées avec une bonne fiabilité, le Dogger étant davantage salé. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que les indicateurs géochimiques de temps de résidence pour l'aquifère de l'Oxfordien estimés au droit des forages EST331 et EST351, situés dans la **ZFD** (voir Figure 1), sont cohérents avec les âges moyens estimés à partir du champ d'écoulement de son modèle numérique (cf. chapitre 4.6.4.1.2), respectivement de 190 ka et 400 ka. L'IRSN observe que cet âge des eaux de l'Oxfordien est cohérent avec les gammes de temps de résidence issues des travaux de Lavastre et al. (2010 [77]) basés sur la combinaison des différents indicateurs ( $^{36}\text{Cl}$ ,  $^4\text{He}$ , gaz nobles), évalués à 130-180 ka au niveau de EST331 avec une aire d'affleurement située à 11 km à l'Est, et à 360-800 ka au

niveau de EST351 à 23 km de ces affleurements. L'IRSN observe cependant que les vitesses sont susceptibles de varier du simple au double selon les tronçons de cette ligne de courant reliant la zone d'infiltration aux forages EST331 et EST351, ce qui est principalement dû à la complexité du schéma hydrogéologique des aquifères. **L'IRSN estime en conclusion que la comparaison des temps de résidence des eaux estimés à partir du  $^{36}\text{Cl}$  et de la modélisation numérique est satisfaisante mais mériterait d'être poursuivie pour les autres forages de la ZFD.**

Concernant l' $^4\text{He}$ , l'Andra a comparé les teneurs obtenues par dégazage de carottes de forages ou dans les eaux porales à celles estimées à partir des teneurs en U et en Th contenues dans la roche. Une modélisation 2D simplifiée des profils de l' $^4\text{He}$  [53] prenant en considération la production/accumulation-transport diffusif vertical au niveau des forages EST432 et EST422 situés dans le Nord de la ZT (cf. Figure 1) a permis, par comparaison aux mesures sur échantillon, d'estimer le temps de résidence des eaux de l'Oxfordien de 300 à 600 ka et 800 ka à 1,4 Ma respectivement pour ces deux forages (Fourré et al., 2011 [150]). Ces temps de résidence dans le Nord de la ZT apparaissent cohérents avec ceux obtenus dans la ZFD par le  $^{36}\text{Cl}$  (cf. ci-dessus). Le temps de résidence des eaux du Dogger obtenu par l'Andra [53] par l' $^4\text{He}$  pour ces forages EST432 et EST422 est respectivement d'environ 0,55 Ma et 1,5 Ma (Fourré et al., 2011 [150]) ; les travaux effectués par Battani et al. (2011 [155]) à partir de coefficients de diffusion différents semblent conforter ces résultats. L'IRSN observe que Lavastre et al. (2010 [77]) ont conclu que la datation directe par  $^4\text{He}$  dans le Dogger ne pouvait être totalement fiable car l'hypothèse de l'évolution dans un système clos était infondée : l' $^4\text{He}$  serait composé d'un mélange comprenant i) les sels et gaz dissous apportés par échange diffusif depuis l'encaissant argileux (Lias et Callovo-Oxfordien), ii) les espèces aqueuses obtenues dans l'aquifère par réactions de dissolution/précipitation et iii) les eaux d'origine météorique de composition variable infiltrées en période glaciaire-interglaciaire. Bien que cette méthode reste à ce jour la seule estimation disponible du temps de résidence de l'eau de l'aquifère Dogger, **l'IRSN convient de la difficulté à obtenir des estimations fiables de temps de résidence des eaux du Dogger.**

Pour conclure, l'IRSN souligne l'important travail d'acquisition et d'interprétation de données hydrogéochimiques accompli par l'Andra pour estimer des âges des eaux, malgré des résultats peu nombreux (une seule ligne de courant examinée avec le  $^{36}\text{Cl}$ ), ou requérant un examen plus approfondi (nécessité d'examiner les hypothèses pour l' $^4\text{He}$ ) pour être comparées aux âges qui peuvent être déduits des simulations numériques. Malgré les difficultés précitées, l'acquisition de données concernant les isotopes radioactifs ( $^{36}\text{Cl}$ ) et radiogéniques ( $^4\text{He}$ ), ainsi que l'exploration d'autres indicateurs de temps de résidence relatifs, directs ou indirects tels que ceux précités, mériterait d'être poursuivie en vue de mieux apprécier la cohérence du modèle hydrogéologique avec ces estimations déduites de la chimie des eaux, en vertu de l'objectif de l'Andra « *de vérifier la cohérence et la robustesse du modèle d'écoulement vis-à-vis des données disponibles* » (chapitre 4.6.4.1.2).

### 4.6.3 MODELE CONCEPTUEL HYDROGEOLOGIQUE

L'Andra a établi un modèle conceptuel hydrogéologique sur la base des données géologiques, hydrogéologiques et hydrogéochimiques présentées ci-avant. Outre les aspects conceptuels des différentes couches aquifères décrits dans le chapitre 4.6.1, ce modèle conceptuel hydrogéologique [58][88] 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 de MHM. Pour ce qui concerne la piézométrie des encaissants, les charges du Dogger sont plus importantes que celles de l'Oxfordien dans la

majeure partie du secteur et génèrent un gradient d'écoulement ascendant. Il existe cependant, dans la partie Sud du secteur, une zone où ce gradient est inversé. La limite d'inversion de ce gradient, orientée approximativement Est-Ouest, passe au milieu de la **ZIRA**. Outre les remarques formulées dans les chapitres précédents sur la conceptualisation des couches du Dogger et de l'Oxfordien calcaire, l'IRSN n'a pas de commentaire sur ces aspects généraux du modèle conceptuel hydrogéologique de l'Andra, qui reflète correctement l'état des connaissances. L'Andra considère cependant dans son modèle conceptuel que les failles n'ont pas de propriétés hydrauliques différentes des couches qu'elles traversent, tout en étudiant le rôle possible de ces failles dans sa modélisation numérique à l'échelle du secteur ; ce point est examiné dans le chapitre 4.6.4.1 suivant.

#### **4.6.4 MODELISATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS**

En se basant sur le modèle conceptuel examiné ci-avant, l'Andra a construit un modèle numérique hydrogéologique régional (chapitre 4.6.4.1.1) puis local (chapitre 4.6.4.1.2) et a procédé à leurs calages successifs, c'est-à-dire cherché, par un ajustement des paramètres hydrauliques, à reproduire au mieux les données acquises par les forages (notamment les charges hydrauliques). Le modèle local obtenu est appelé modèle « *de référence* » ; il représente les écoulements « à l'actuel » et est examiné par l'IRSN au chapitre 4.6.4.1.2. Les paramètres hydrogéologiques intégrés dans le modèle « *de référence* » font l'objet d'une analyse approfondie dans le chapitre 4.6.1 précédent ; aussi, ils ne sont pas commentés à nouveau ci-après. Sur la base de ce modèle et des connaissances acquises sur l'évolution géodynamique passée du secteur, l'Andra a développé un modèle des écoulements futurs, appelé modèle « *géoprospectif* », examiné au chapitre 4.6.4.2.

##### **4.6.4.1 Modélisation numérique des écoulements souterrains « à l'actuel »**

La modélisation numérique des écoulements souterrains a été réalisée par l'Andra à l'échelle du bassin de Paris. Un modèle « *de secteur* », correspondant à une zone de 80 km × 170 km centrée sur le site de **MHM** et s'étendant à l'Est jusqu'aux affleurements, a été extrait de ce modèle régional, en retenant les valeurs des différents paramètres hydrogéologiques du modèle régional comme données d'entrée aux bords du modèle de secteur. Ce modèle de secteur vise à déterminer plus précisément l'emplacement des exutoires actuels situés à proximité de la **ZIRA**, ainsi que les vitesses de transfert et temps d'arrivée à ces exutoires.

Le modèle régional de l'Andra [88] a été révisé depuis celui présenté dans le cadre du « Dossier 2005 ». Il couvre une superficie plus importante (350 000 km<sup>2</sup>), allant jusqu'aux affleurements du Trias en bordure du bassin de Paris. A l'instar de celui de 2005, il représente 27 couches allant du Trias inférieur (Buntsandstein) au Tertiaire supérieur, mais dont les limites ont été affinées depuis 2005 sur la base des données du BRGM. En outre, le décalage des couches par les failles majeures est maintenant géométriquement représenté. Le maillage est composé de prismes de dimension horizontale proche de 1650 m.

Le modèle de secteur de l'Andra [88] représente également 27 couches allant du Buntsandstein au Crétacé basal : la plupart de ces couches sont les mêmes que dans le modèle régional, à la différence des couches supérieures qui ne sont pas présentes en **MHM** et du Lias, du Dogger et de l'Oxfordien qui y sont représentés par davantage de couches. Le Dogger calcaire, le Callovo-Oxfordien et l'Oxfordien calcaire sont respectivement subdivisés en 6, 2 et 6 couches (Figure 57). La taille des mailles est d'environ 250 m.

L'IRSN tient à saluer les efforts réalisés par l'Andra pour améliorer la précision géométrique de ses modèles hydrogéologiques régional et de secteur.

#### 4.6.4.1.1 Simulations à l'échelle du bassin de Paris

Pour ce qui concerne les simulations numériques des écoulements souterrains « à l'actuel » réalisées à l'échelle du bassin de Paris, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que les failles sont considérées comme hydrauliquement « transparentes », c'est-à-dire qu'elles ne présentent pas de différence de transmissivité avec le milieu qu'elles traversent. L'Andra [88] a calé son modèle sur la base de 1255 mesures de charges réparties sur l'ensemble du système aquifère multicouche notamment avec les charges hydrauliques mesurées dans les aquifères de l'Albien et du Dogger. A l'issue du calage, l'écart moyen entre les valeurs simulées et charges mesurées au niveau des forages est de 9 m. L'IRSN convient que c'est au niveau de ces deux couches aquifères que le calage en charges doit être en priorité réalisé car ce sont les mieux reconnues dans le centre du bassin de Paris, en raison du nombre important de forages, et considère satisfaisante la qualité du calage des charges hydrauliques à cette échelle.

L'IRSN constate cependant que l'Andra n'a pas vérifié si à cette échelle de modélisation, les valeurs retenues des principaux paramètres hydrogéologiques pour caler les charges hydrauliques conduisent à également à une répartition des salinités cohérente avec les valeurs de salinité mesurées dans le bassin de Paris. Or, la répartition des salinités à l'échelle régionale est davantage renseignée que celle des charges hydrauliques, notamment dans le Dogger au centre du bassin et dans les aquifères du Trias dans la zone Est du bassin. A cet égard, l'IRSN considérait déjà, lors de l'examen du « Dossier 2005 », qu'un calage simultané du modèle en charge et en salinité tendait à montrer qu'un rôle drainant de certaines grandes failles régionales (faille de Bray-Vittel, faille de Metz...) devait être pris en compte dans le modèle hydrogéologique pour simuler la répartition des salinités dans le bassin de Paris. En effet, ainsi que mis en évidence à plusieurs reprises dans la bibliographie (e.g., Matray et al., 1994 [249] ; Wei et al., 1990 [250] ; Gonçalves et al. 2003 [251] ; de Hoyos et al., 2010 [86]), la salinité du Dogger dans le centre et l'Ouest du bassin est issue des formations salifères du Trias après avoir migré notamment par convection à travers la faille de Bray. Aussi, l'IRSN estime que le calage simultané des données de charges et de salinités à l'échelle du bassin de Paris pourrait conduire l'Andra à réviser son modèle conceptuel qui considère actuellement les grandes failles à l'échelle régionale comme hydrauliquement transparentes. Un tel exercice permettrait de contraindre davantage les hypothèses de calage du modèle en le rendant *in fine* plus représentatif du comportement réel des écoulements à cette échelle.

Aussi, à ce stade, l'IRSN n'est pas en mesure de confirmer que le calage effectué à l'échelle régionale par l'Andra conduit à un modèle d'écoulement suffisamment contraint pour être fiable. Or, les conditions aux limites de son modèle de secteur découlent directement de ce modèle régional. L'IRSN observe cependant que depuis 2005, les multiples forages réalisés par l'Andra dans la ZT lui ont permis d'acquérir des données hydrauliques supplémentaires dans le secteur, permettant de caler un modèle hydraulique local pour lequel les données de bord, conférées par le modèle régional, ne devraient pas avoir un impact aussi important que par exemple pour le modèle du « Dossier 2005 ».

Il convient également d'ajouter que l'Andra a indiqué avoir effectué des premières modélisations de transport de traceurs naturels même si elle ne les a pas présentées au cours de l'instruction. Sur ces premiers résultats, l'Andra a précisé que pour l'échelle locale, « *les premiers résultats des modélisations de transport de traceurs naturels, montrent des vitesses dans le Dogger un peu moins élevées et qui restent supérieures à celles de l'Oxfordien* ». L'IRSN estime que ces résultats confirment que le calage du modèle sur la seule base des données de charges hydrauliques pourrait être insuffisant et encourage donc l'Andra à prendre en compte l'ensemble des données disponibles, telles que le sel ou d'autres traceurs naturels, afin de contraindre au maximum le modèle

d'écoulement. Enfin, une telle modélisation permettra de solder la recommandation 2011 R5 du GPD à l'issue de l'instruction du « Dossier 2005 », de préciser le rôle hydraulique des structures principales identifiées. Lors de la réunion préparatoire, l'Andra a précisé qu'« *au regard des incertitudes conceptuelles et paramétriques, à l'échelle du bassin de Paris, les résultats de ces modélisations ne sont pas de nature à améliorer le calage au droit du secteur. En effet, l'Andra estime que les modèles de transport ne peuvent pas contraindre le calage d'un modèle d'écoulement car ils cumulent plus d'incertitudes que le modèle d'écoulement lui-même* ». L'IRSN est en désaccord avec ce point car la représentativité du modèle numérique régional de l'Andra serait en tout état de cause accrue si elle vérifiait, avec un même jeu de paramètres hydrauliques, que ce modèle reproduit correctement les charges et les salinités mesurées au centre du bassin de Paris. Dans le cas contraire, il conviendrait que pour la DAC, l'Andra montre que les données de calage imposées par son modèle régional ne contraignent pas de manière importante les bords du modèle de secteur dans le calage de ce dernier. Ces points feront l'objet d'une attention particulière par l'IRSN lors de l'examen du dossier de DAC.

#### 4.6.4.1.2 Simulations à l'échelle du secteur de Meuse/Haute-Marne

Le modèle de secteur a été divisé, en vue de son calage, en blocs présentant chacun une paramétrisation distincte. Pour l'Oxfordien et le Dogger, le secteur est divisé respectivement en 7 et 8 blocs dont un correspondant approximativement à la ZT, un au Sud-Ouest de la ZFD, un au Nord et un à l'Est de la ZT, les autres correspondant aux aires d'affleurement. En complément de ces blocs, l'Andra a ajouté des paramètres relatifs aux failles prises individuellement.

L'Andra a précisé, au cours de l'instruction, la méthodologie de calage des charges hydrauliques qu'elle a mise en œuvre : l'Andra a d'abord procédé au calage de son modèle d'écoulement en considérant que les failles du secteur, incluant la ZFD, n'avaient pas de rôle hydraulique (failles considérées comme « transparentes »), et a ensuite réalisé une analyse de sensibilité à la présence et à la transmissivité des failles du secteur. Le modèle retenu pour le DOS est le scénario dont le jeu de failles dégradait le moins son calage initial. Ce modèle « *de référence* » est calé avec une erreur moyenne de 3,6 m dans l'Oxfordien (en considérant la charge moyenne simulée sur tous les niveaux de cet aquifère) et de 1,9 m dans le Dogger (cf. Tableau 13 ci-dessous).

	Charge Oxfordien (m NGF)			Charge Dogger (m NGF)		
	Mesurée	Calculée	Écart	Mesurée	Calculée	Écart
MSE101	256	249	-6,7	285	283	-2,0
EST107/HTM102	317	312	-5,6	290	291	0,6
EST103/EST210/Labo	305	299	-5,8	290	290	0,0
EST311/EST312	264	267	3,2	296	292	-3,5
EST342	196	196	-0,2	251	256	5,3
EST321/EST322	268	268	0,2	272	270	-2,7
EST331	320	319	-0,9			
EST351	272	276	3,8			
EST411/EST412	270	276	5,8	293	293	0,4
EST421/EST422	254	258	4,1	288	289	1,4
EST431/EST432	266	266	0,5	286	285	-0,9
EST451/EST452	217	221	4,0	267	266	-1,1
EST461/EST462	305-310	299	-5,6	275	276	1,2
Ecart moyen			3,6			1,9

Tableau 13 : Résultats du calage Andra (modèle « *de référence* »)

A l'issue du calage (décrit ci-après), le modèle « *de référence* », retenu par l'Andra pour les simulations numériques des écoulements souterrains « à l'actuel » à l'échelle du secteur de **MHM** (cf. Figure 1), attribue les rôles suivants aux failles du secteur de **MHM** (cf. Figure 61) :

- les failles de Joinville et de Gondrecourt (pour sa partie Nord), qui sont orientées perpendiculairement à la contrainte tectonique majeure (NE), ont un rôle de barrière hydraulique (perméabilités de la formation géologique traversée diminuées de deux ordres de grandeur) sur toute la colonne stratigraphique (hormis dans deux couches triasiques, dans le Callovo-Oxfordien et dans le Kimméridgien où elles sont « transparentes », c'est-à-dire de même perméabilités que le milieu traversé) ;
- les failles de la Marne, de Poissons et de Brouthières, comprises dans la **ZFD**, orientée parallèlement à la contrainte tectonique majeure (NW), ont un rôle drainant (perméabilités augmentées de trois ordres de grandeur dans les semi-perméables du Trias, du Lias, du Callovo-Oxfordien et du Kimméridgien ainsi que dans le Dogger, l'Oxfordien et le Portlandien dans leur globalité, et augmentées de deux ordres de grandeur dans les aquifères du Trias et les formations crétacées) ;
- les failles de Gondrecourt dans leur partie Sud (située dans la **ZFD**) ont un rôle drainant également (perméabilités augmentées d'un ordre de grandeur sur toute la colonne stratigraphique, sauf dans le Callovo-Oxfordien et le Kimméridgien où elles sont augmentées de deux ordres de grandeur).

S'agissant du rôle des failles retenu dans le modèle « *de référence* », l'IRSN considère pertinent que l'Andra retienne un modèle hydrogéologique de secteur attribuant un rôle hydraulique aux failles. Le fait d'attribuer un rôle drainant aux failles orientées Nord-Ouest/Sud-Est est en effet cohérent avec le fait que la contrainte tectonique principale, orientée dans cette direction, pourrait favoriser l'ouverture des failles. Il est cependant à noter que dans le modèle de l'Andra, la limite Sud-Est de la **ZFD** s'interrompt au niveau des failles de Gondrecourt, contrairement aux derniers résultats de cartographie structurale compilés par l'Andra [56] qui montrent que les failles de la **ZFD** poursuivent plus à l'Est en direction des aires de recharge des aquifères de l'Oxfordien et du Dogger (cf. chapitre 4.1). La conséquence pourrait être une sous-estimation locale des vitesses de transfert des eaux des aquifères depuis leur zone de recharge jusqu'à la **ZIRA**. La mise en cohérence du modèle hydrogéologique de l'Andra avec son modèle structural sur ce point est donc un élément attendu pour la **DAC**.

En outre, les mesures piézométriques dans les forages de la **ZFD**, en particulier EST451/452 et EST461/462 (Figure 1), ont conduit l'Andra à considérer, dans son modèle hydrogéologique, des propriétés spécifiques à cette zone (cf. chapitre 2.1 du présent rapport). L'Andra représente en effet, dans son modèle « *de référence* », la **ZFD** par une « fracturation mineure » [40] (failles de longueur d'ordre kilométrique). Elle a précisé au cours de l'instruction avoir généré statistiquement cette représentation sur la base des directions des failles majeures dans le secteur et des mesures de fracturation effectuées aux affleurements de l'Oxfordien et du Dogger et sur les parois des puits d'accès au Laboratoire souterrain de **MHM**. Les failles dans le Kimmeridgien sont « ouvertes » au niveau de la **ZFD** pour favoriser les transferts entre le Barrois et l'Oxfordien dans cette zone, en accord avec les données géochimiques des eaux de ces deux aquifères acquises dans les forages de la **ZFD** (cf. chapitre 4.6.2). **L'IRSN estime que cette représentation de la ZFD est satisfaisante.**

S'agissant du calage réalisé à l'échelle du secteur, l'IRSN relève que le modèle « *de référence* » retenu par l'Andra, à l'issue d'une analyse de sensibilité au rôle des failles [88], attribue un rôle hydraulique à celles orientées

Nord Ouest - Sud Est au détriment de la qualité du calage initial de ce modèle qui considérait des failles transparentes. L'IRSN considère effectivement que les failles jouent très probablement un rôle hydraulique. La dégradation du calage l'amène donc à s'interroger sur le bien-fondé de la méthodologie de calage mise en œuvre par l'Andra. L'IRSN estime ainsi qu'il aurait été plus judicieux de réaliser un premier calage dans lequel les perméabilités de matrice, des failles et de la ZFD pouvaient varier simultanément. En effet, la modélisation réalisée par l'IRSN montre qu'il est possible, avec une paramétrisation différente de celle de l'Andra en termes de perméabilités de matrice et de failles (mais aussi de porosités, ainsi qu'évoqué ci-avant), d'obtenir un modèle correctement calé en charges hydrauliques avec des vitesses d'écoulement dans l'Oxfordien plus élevées que celles de l'Andra au niveau de la ZT. Le détail de ces résultats est présenté en Annexe T11.

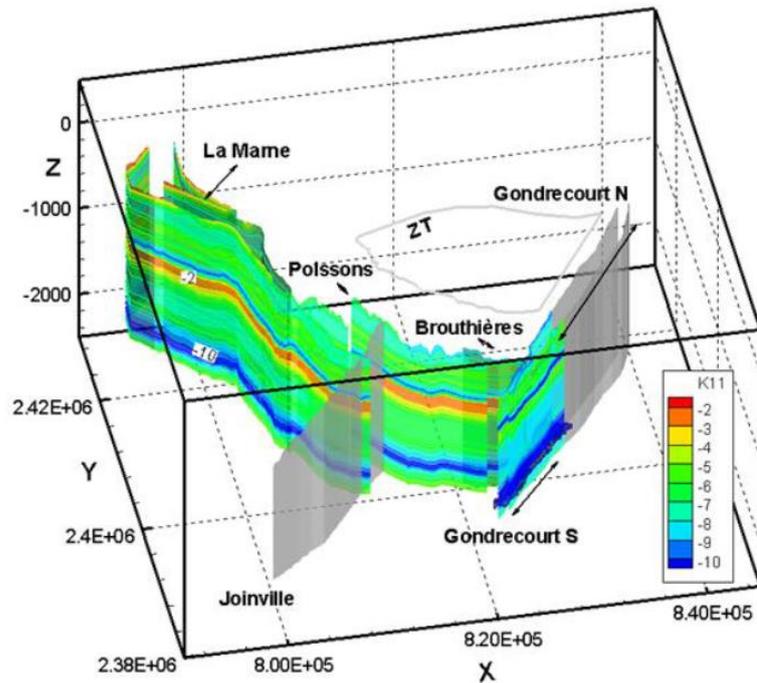


Figure 61 : Failles majeures retenues à l'échelle du secteur de MHM (échelle de couleur pour les failles jouant un rôle drainant : perméabilités en  $10^x$  m/s ; en gris : failles dont la perméabilité a été réduite, jouant un rôle de barrière hydraulique) [88]

Les cartes piézométriques simulées pour les aquifères de l'Oxfordien supérieur, de l'Oxfordien moyen et du Dogger sont présentées en Figure 62 où elles sont comparées aux cartes piézométriques issues des mesures.

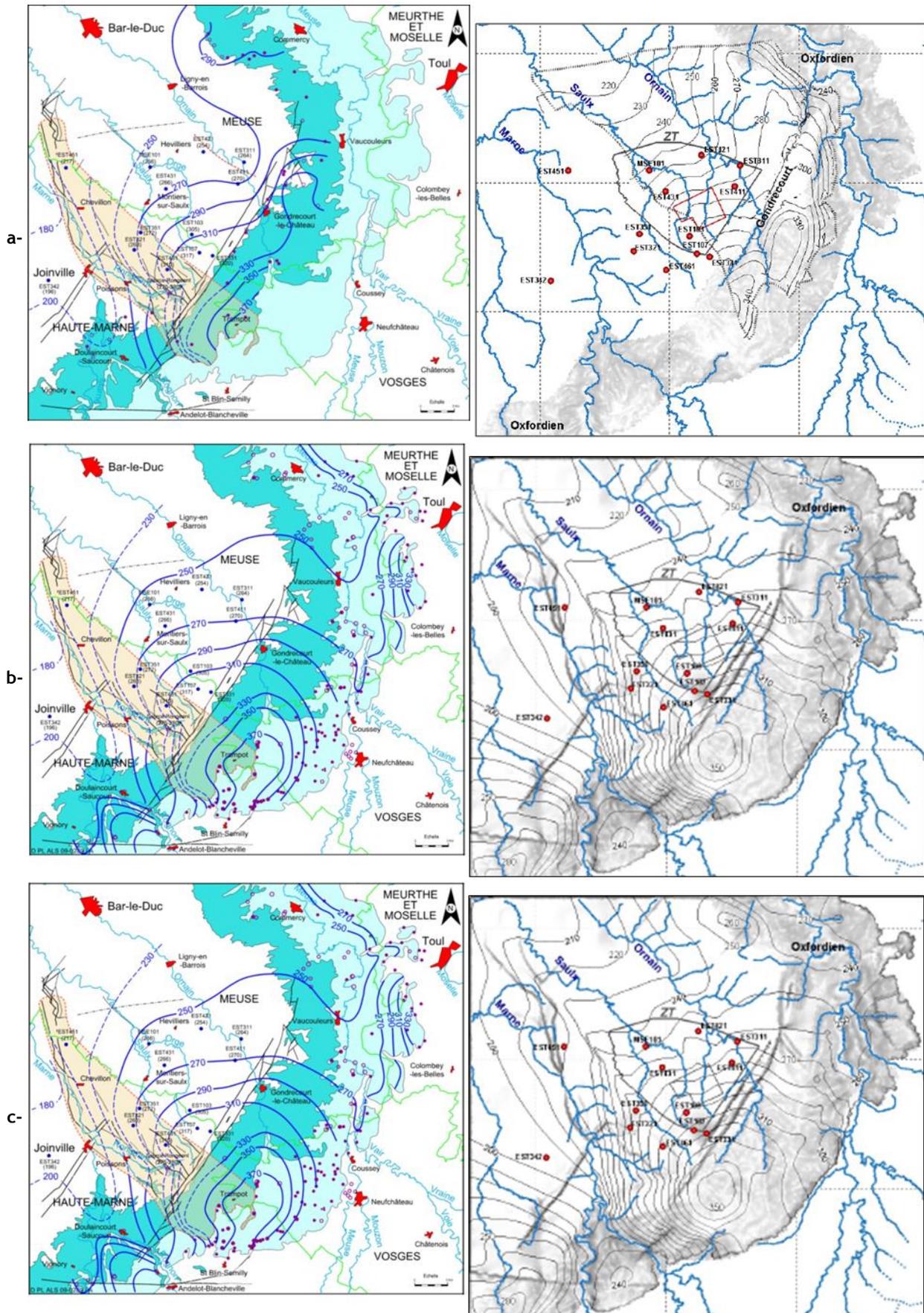


Figure 62 : Comparaison entre charges hydrauliques mesurées (gauche) et simulées (droite). a- Oxfordien supérieur ; b- Oxfordien moyen ; c- Dogger [53][88]

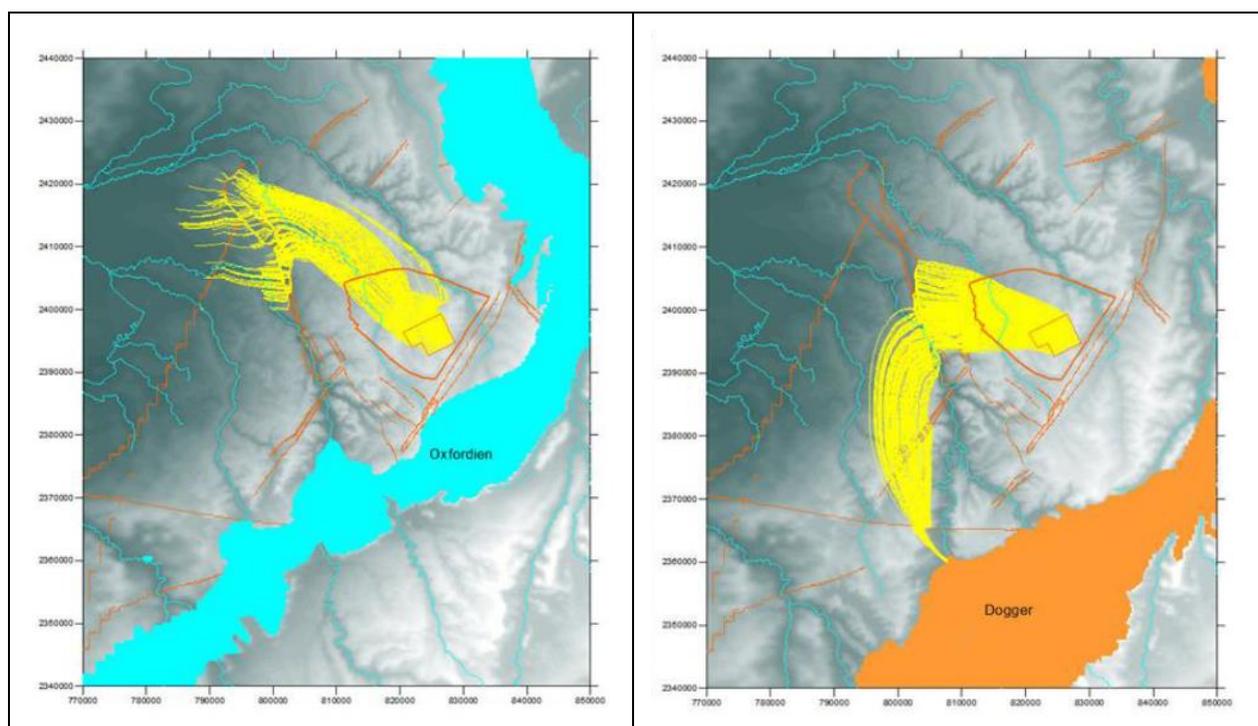


Figure 63 : Trajectoires du panache de particules dans l'Oxfordien moyen (gauche) et dans le Dogger (droite) [88]

S'agissant des directions d'écoulement obtenues par l'Andra au niveau de la **ZT**, l'IRSN constate d'une manière générale qu'elles sont conformes à celles issues de la piézométrie mesurée pour les deux aquifères de l'Oxfordien ainsi que pour l'aquifère du Dogger. L'IRSN relève à cet égard une amélioration de la représentation des écoulements dans le Dogger par rapport à 2005 dans cette zone. Dans le détail toutefois, l'IRSN constate que les charges hydrauliques simulées dans l'Oxfordien supérieur ne sont pas convenablement calées sur les données issues des mesures ; à titre d'illustration, un écart de 13 m est observé au niveau du forage EST411 (Figure 62). L'IRSN estime que la cause pourrait venir de la représentation faite par l'Andra du semi-perméable des marnes de la Série grise dans le modèle, notamment sa très faible perméabilité et son épaisseur pluridécamétrique, jugées excessives par l'IRSN (chapitre 4.6.1.2). L'IRSN appelle l'attention sur le fait que cette représentation peut avoir une influence notable sur les simulations de transfert de particules émises depuis la **ZIRA** à la base de l'Oxfordien, en empêchant potentiellement ces particules de rejoindre les zones d'exutoire où l'Oxfordien pourrait affleurer dans les scénarios géoprospectifs (cf. chapitre 4.6.4.2).

S'agissant des trajectoires des particules émises sur toute la **ZIRA** dans les couches aquifères encaissantes du modèle « de référence » de l'Andra, les trajectoires convectives calculées sur une période d'un million d'années se dirigent, dans l'Oxfordien, avec une vitesse de transfert d'environ 1 km par 100 ka sur la **ZT**, vers la zone Nord des failles de la Marne (cf. Figure 63). L'Andra précise toutefois qu'au bout d'un million d'années (durée prise en compte par l'Andra pour l'évaluation du transfert de particules), le pic du panache de particules n'atteindrait pas cette zone située à une dizaine de kilomètres au Nord de la **ZIRA**, étant donné qu'elle y retranche le temps nécessaire à la traversée du Callovo-Oxfordien par diffusion. Pour cette raison, l'Andra ne retient pas, dans son évaluation de sûreté, de scénario de pompage dans l'Oxfordien au niveau des failles de la Marne alors que leur transmissivité, plus importante dans le reste du secteur, permettrait un pompage avec un débit suffisant pour exploiter cet aquifère. Au vu des incertitudes qui subsistent dans le modèle hydrogéologique présenté par l'Andra concernant les vitesses de transfert simulées, notamment du fait des valeurs de porosité cinématique qu'elle retient, de la

représentation de la Série grise (cf. chapitre 4.6.1.2) et de la méthode utilisée pour le calage des mesures de charges, l'IRSN considère qu'il ne peut être exclu que des radionucléides et toxiques chimiques relâchés dans l'Oxfordien atteignent la zone transmissive associée aux failles de la Marne et que le scénario précité d'exploitation d'eau devrait être étudié. Ce point est repris au chapitre 8.2.1 relatif à l'évaluation de sûreté après fermeture.

Dans le Dogger, les trajectoires aboutissent dans le modèle de l'Andra à un exutoire situé à environ 70 km au sud de la ZIRA (cf. Figure 63). L'Andra a précisé au cours de l'instruction que cet exutoire était atteint entre 200 et 400 ka. L'IRSN observe que les vitesses de transfert simulées dans cet aquifère sont donc encore plus importantes que celles considérées par l'Andra dans son modèle conceptuel (« de l'ordre de 5 km/100 ka » ; cf. chapitre 4.6.1.3), alors même que l'IRSN les estimait excessives au regard des connaissances acquises sur le secteur de MHM. Aussi, l'IRSN estime que l'apparition d'un exutoire local pour le Dogger au Sud de la ZIRA dans le modèle de l'Andra pourrait être lié aux vitesses surestimées dans cet aquifère.

Il est par ailleurs à noter que l'Andra ne présente pas les résultats de trajectoires de particules qui auraient pu atteindre l'aquifère superficiel du Barrois. Or, dans la modélisation numérique de l'IRSN, du fait que les particules transitant dans l'Oxfordien atteignent plus rapidement les failles de la Marne, celles-ci atteignant le Barrois via les failles de la Marne en moins d'un million d'années. L'analyse par l'Andra des trajectoires de particules dans le Barrois est donc également attendue pour la DAC.

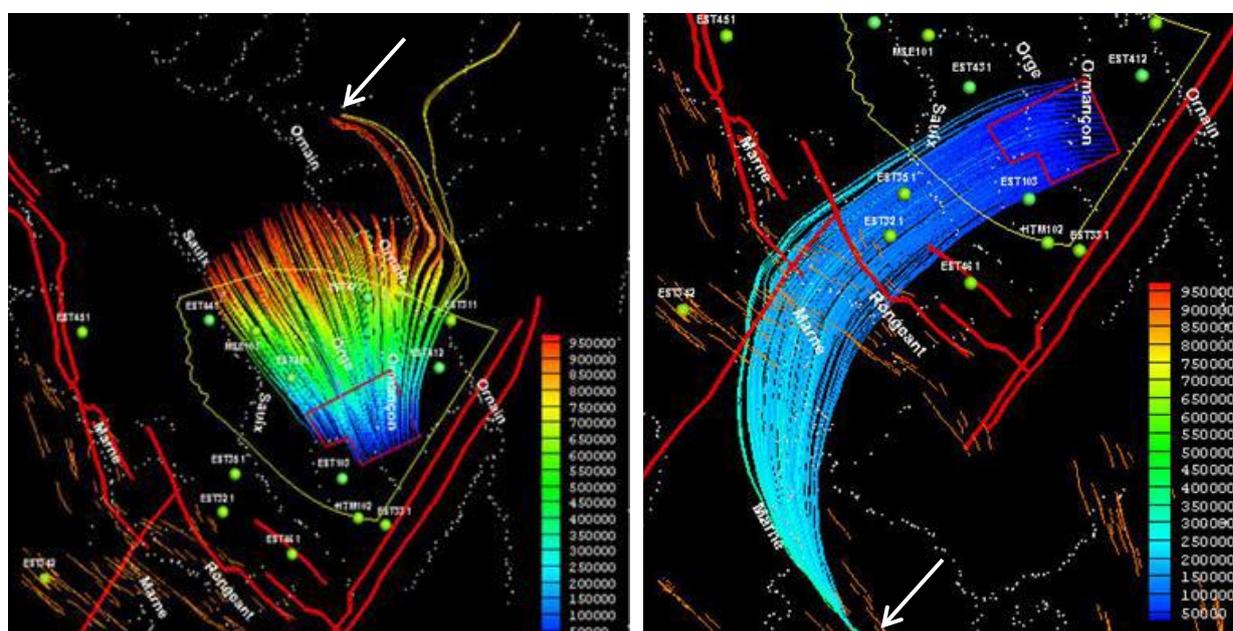
En conclusion, l'IRSN estime, au vu de ses propres simulations, que les temps de transfert à l'échelle du secteur pourraient être notablement inférieurs à ceux estimés par l'Andra pour ce qui concerne l'aquifère de l'Oxfordien, et que des exutoires de surface peuvent apparaître pour cet aquifère ainsi que dans le Barrois au niveau des zones de failles et ce, en moins d'un million d'années. A l'inverse, l'IRSN estime probablement excessives les vitesses de transfert simulées par l'Andra dans le Dogger et émet donc des doutes sur l'apparition d'un exutoire dans le prochain million d'années. Etant donné que le modèle hydrogéologique de l'Andra sert de base à l'évaluation de l'impact radiologique, l'IRSN considère qu'il conviendrait que pour la DAC, l'Andra révise ce modèle hydrogéologique en tenant compte des remarques précédentes sur les propriétés géologiques et hydrogéologiques des formations de l'Oxfordien et du Dogger (cf. engagement E15-2017, chapitre 4.6.1.3) ainsi que sur les calages régional et de secteur (chapitre 4.6.4.1.1 et ci-dessus). L'IRSN revient sur ces aspects à l'issue de l'examen, dans le chapitre 4.6.4.2 suivant, des simulations prenant en compte l'évolution géoprospective.

#### **4.6.4.2 Modélisation numérique des écoulements souterrains « géoprospectifs »**

Pour ce qui concerne l'estimation de l'évolution des écoulements à long terme, l'Andra s'appuie [88] sur une modélisation hydrogéologique « géoprospective », qui vise à représenter les évolutions géodynamiques susceptibles de se produire au cours du prochain million d'années et à évaluer leur influence sur les écoulements (vitesses de transfert, localisation des exutoires en surface). Ces évolutions géodynamiques possibles correspondent à une surrection du secteur de MHM, dont l'ampleur et la variabilité spatiale sont examinées au chapitre 4.3 ; selon l'importance de cette surrection, le relief préexistant, le climat et la nature des roches à l'affleurement, une érosion plus ou moins intense des plateaux et des rivières (par incision) est attendue. Les simulations « géoprospectives » des écoulements ont été réalisées à partir de modèles hydrogéologiques « à l'actuel » (cf. chapitre 4.6.4.1 et ci-dessous), modifiés selon deux scénarios d'évolution géomorphologique différents, tous deux

considérant une évolution naturelle du climat. L'Andra précise que la prise en compte d'une évolution perturbée du climat (*i.e.*, réchauffement d'origine anthropique) sera réalisée pour la DAC.

Le premier modèle d'évolution géomorphologique dit « *maximaliste* » se base sur la carte de surrection « *maximaliste* » décrite au chapitre 4.3, considérée par l'Andra comme enveloppe de l'évolution probable du secteur de MHM, et a été effectué sur la base de son modèle hydrogéologique tel que calé au stade de 2009. Cette simulation géoprospective conduit à l'apparition d'un exutoire de l'Oxfordien dans la vallée de l'Ornain à 750 ka, ainsi que présenté sur la Figure 64. Sur cette figure (ainsi que la suivante), les particules sont émises dans l'Oxfordien et le Dogger à quatre temps successifs ( $t=0$  ka, 100 ka, 200 ka, 300 ka et 400 ka) prenant en compte le temps nécessaire à la traversée du Callovo-Oxfordien par les solutés [88]. Ce scénario fait apparaître un exutoire de l'Oxfordien dans la vallée de l'Ornain ainsi qu'un exutoire du Dogger identique à celui identifié dans la configuration « à l'actuel » (Figure 63). Comme pour le modèle d'écoulement « à l'actuel », les particules émises dans l'Oxfordien n'atteignent pas la zone Nord des failles de la Marne au bout d'un million d'années de simulation.



Le second modèle dit « *phénoménologique* » se base sur la carte de surrection « réaliste » décrite au chapitre 4.3, et est pour sa part appliqué au modèle hydrogéologique « de référence » calé en 2012 (cf. chapitre 4.6.4.1 précédent). L'Andra indique que ce scénario ne fait pas apparaître d'exutoire local de l'Oxfordien sur la durée du million d'années affectée aux simulations, ni dans la vallée de l'Ornain en raison d'une incision insuffisante pour mettre l'Oxfordien à l'affleurement, ni dans la vallée de la Marne (Figure 65). Pour le Dogger, outre l'exutoire atteint dans la configuration « à l'actuel », un deuxième exutoire apparaît dans la vallée de la Manoise, à une dizaine de kilomètres à l'Est de l'autre l'exutoire (chapitre 4.6.4.1.2).

En termes d'évolution du gradient vertical à travers le Callovo-Oxfordien (lié aux différences de charges entre les encaissants), d'après l'Andra [80], l'iso-gradient zéro qui sépare la zone à gradient ascendant de la zone à gradient descendant forme à l'actuel à une ligne Est-Ouest passant par le milieu de la ZIRA (cf. chapitre 4.5.2). Dans le cas du modèle d'évolution géomorphologique « maximaliste », l'iso-gradient zéro se déplace vers le Nord et au bout d'un million d'années, la ZIRA se trouve en zone à gradient descendant. Pour modèle dit « phénoménologique », cet iso-gradient n'est déplacé que de quelques centaines de mètres au Nord de son emplacement à l'actuel.

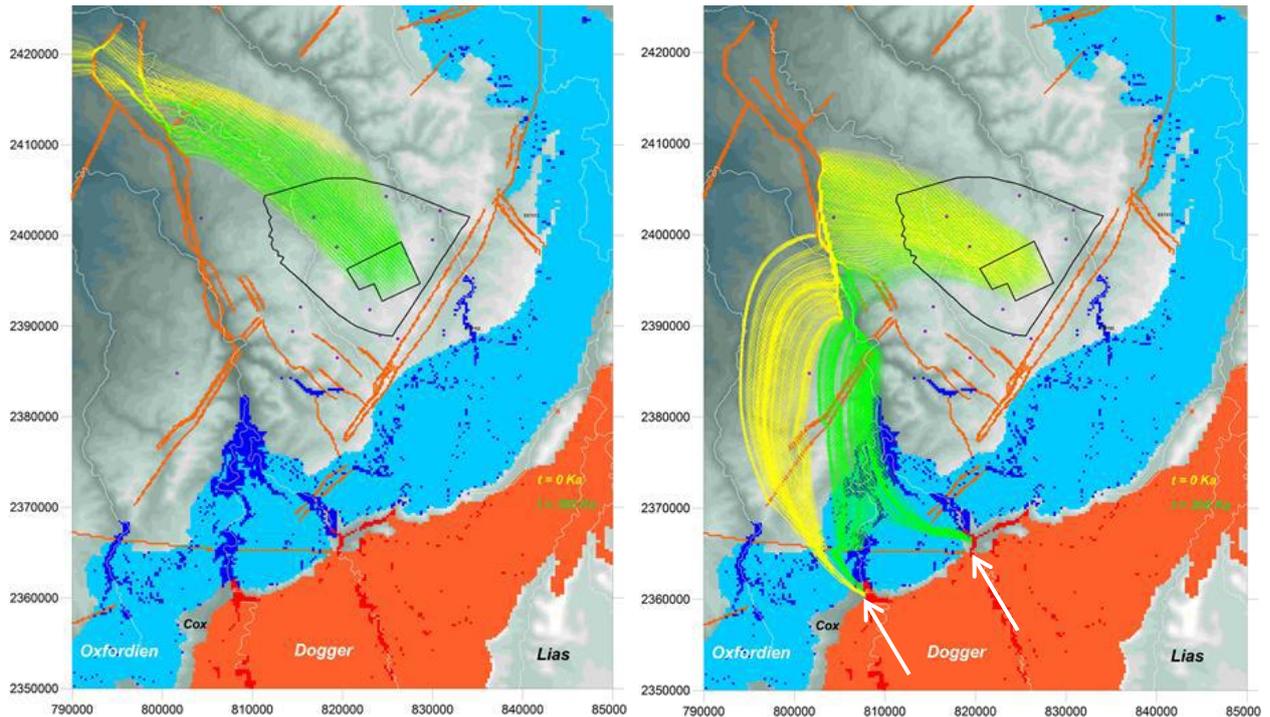


Figure 65 - Directions des particules, dans l'Oxfordien à gauche et dans le Dogger à droite, dans la configuration à l'actuel (jaune) et en configuration géoprospective à 1 Ma (vert) dans le modèle d'évolution géomorphologique « *phénoménologique* » [88]. Les flèches blanches indiquent les exutoires.

Sur la base des résultats obtenus avec le modèle d'évolution géomorphologique « *phénoménologique* », l'Andra retient [40] « *l'absence de modification significative des écoulements dans l'Oxfordien et le Dogger sur le prochain million d'années par rapport à l'actuel [ce qui] conduit à considérer le modèle hydrogéologique consolidé sur toute la période d'évaluation, sans distinction de l'actuel et du long terme* ». L'Andra ne retient donc pas la possibilité d'apparition d'exutoire au niveau de l'Oxfordien sur le prochain million d'années.

L'IRSN rappelle, ainsi qu'indiqué au chapitre 4.3, qu'il considère que le modèle dit « *réaliste* » de surrection comporte trop d'incertitude et que l'Andra devrait retenir la carte dite « *maximaliste* » pour les simulations hydrogéologiques destinées à supporter l'évaluation d'impact prenant en compte l'évolution géodynamique future de site de **MHM**. En particulier, l'Andra a présenté les valeurs d'érosion et d'incision utilisées dans les deux scénarios géoprospectifs au cours de l'instruction. Ces valeurs, notamment l'incision des rivières dans le secteur de **MHM**, conditionnent l'échéance de mise à l'affleurement de l'Oxfordien, ce qui influe de manière significative sur le calcul d'impact radiologique étant donné que celui-ci est directement basé sur les temps d'atteinte des exutoires locaux. En particulier, d'après les cartes d'incision des modèles « *phénoménologique* » et « *maximaliste* » transmises au cours de l'instruction, les valeurs d'incision dans la vallée de l'Ornain au Nord de la **ZT** où la couverture du Kimméridgien ne présente plus localement qu'une épaisseur de l'ordre de la trentaine de mètres (autour de la ville de Ligny-en-Barrois, Figure 1), sont respectivement de 20-30 m et 30-40 m pour le prochain million d'années. Il apparaît donc difficile, au regard des incertitudes existant sur ce paramètre, de ne pas retenir que l'incision de l'Ornain atteindra l'Oxfordien d'ici un million d'années dans le scénario dit « *réaliste* ». Pour sa part, l'IRSN identifie, dans le cadre de sa propre modélisation hydrogéologique géoprospective prenant en compte le scénario « *maximaliste* » de l'Andra, plusieurs exutoires distincts de l'Oxfordien qui sont atteints avec des temps de transferts compris entre 50 et 400 ka (cf. Annexe T11). A l'inverse, l'IRSN n'identifie pas d'exutoire au Dogger dans sa modélisation géoprospective.

Enfin, pour ce qui concerne la zone d'inversion de gradient hydraulique vertical à travers le Callovo-Oxfordien, l'IRSN observe que celui-ci est fortement dépendant du choix du modèle d'évolution géoprospective. Or, le gradient est un paramètre important dans le choix de localisation de l'installation souterraine et des liaisons surface-fond. Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devrait tenir compte de l'incertitude relative à l'extension de la zone à gradient ascendant à travers le Callovo-Oxfordien dans son évaluation de sûreté, d'autant plus que d'après les simulations réalisées par l'IRSN (Annexe T11), l'aquifère de l'Oxfordien pourrait présenter des exutoires locaux en surface, atteints plus rapidement que l'exutoire du Dogger actuellement mis en évidence par l'Andra.

En conclusion, l'IRSN constate qu'il reste encore des incertitudes importantes, notamment en termes de vitesses d'écoulement dans le Dogger et d'évolution géodynamique, qui peuvent conduire, selon les hypothèses retenues, à des évaluations différentes en termes de localisation des exutoires naturels de l'Oxfordien et de temps de transfert associés. Aussi, il apparaît nécessaire à ce stade de retenir des hypothèses suffisamment conservatives dans l'évaluation de sûreté pour être enveloppes de ces exutoires et temps de transfert possibles. Par conséquent, l'IRSN estime qu'il conviendrait de retenir le modèle « enveloppe » d'écoulement géoprospectif dit « *maximaliste* » pour l'évaluation d'impact du stockage.

## 5 EVOLUTION DES COMPOSANTS DU STOCKAGE

Ce cinquième chapitre présente l'examen par l'IRSN de la représentation, dans l'évaluation de la sûreté de l'installation, de l'évolution des principaux composants du stockage due aux perturbations (mécaniques, chimiques, hydriques et thermiques) qui sont susceptibles de les affecter au cours de l'exploitation puis après la fermeture. Comme dans le chapitre précédent portant sur les connaissances du site de [MHM](#), la pertinence des phénomènes et valeurs retenus par l'Andra pour les scénarios « *de référence* » et « *enveloppe* » le cas échéant est examiné au regard des connaissances disponibles. Cet examen porte successivement sur le comportement à long terme des colis, puis sur l'évolution des composants en acier, des bétons et enfin des matériaux argileux.

### 5.1 COMPORTEMENT DES COLIS APRES FERMETURE DU STOCKAGE

Dans le présent chapitre portant sur le comportement à long terme des colis de déchets en conditions de stockage, les principaux éléments fournis par l'Andra concernant les conteneurs de stockage des déchets [HA](#) et [MAVL](#), ainsi que la démarche d'établissement des modèles de relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques, sont tout d'abord présentés en tant qu'éléments de contexte. L'IRSN examine ensuite, pour chaque typologie de déchets et à la lumière des connaissances phénoménologiques actuelles sur leur comportement en conditions de stockage, les modèles de relâchement susmentionnés ainsi que les paramètres associés retenus par l'Andra pour l'évaluation de sûreté.

#### 5.1.1 CONTENEURS DE STOCKAGE

Concernant les fonctions de sûreté des colis de stockage des déchets [HA](#) et [MAVL](#) [89][90] après fermeture du stockage, aucune fonction n'est attribuée par l'Andra au conteneur du colis primaire. En revanche, les déchets ainsi que l'éventuelle matrice peuvent contribuer à la fonction « *limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage* ». A cet égard, la performance des déchets ou de la matrice est traduite par un ou plusieurs modèles de relâchement des radionucléides et toxiques chimiques.

Les conteneurs de stockage des déchets [MAVL](#), en béton pour la majorité des familles de colis et en acier pour une minorité d'entre elles, ne se voient attribuer par l'Andra aucune fonction de sûreté après fermeture du stockage<sup>35</sup>. Toutefois, l'Andra rappelle notamment [40] que le béton constitutif de la majorité des conteneurs de stockage de colis de déchets [MAVL](#) contribue au confinement des déchets en maintenant un pH basique. Une telle condition permet notamment de favoriser la passivation des déchets métalliques (et donc de limiter leur corrosion et le relâchement des radionucléides) et de favoriser de faibles valeurs de solubilité de certains éléments dès lors qu'ils sont relâchés (tels que le nickel, le cobalt, l'américium, le curium, le neptunium ou le plutonium).

Les fonctions de sûreté attribuées aux colis de stockage des déchets [MAVL](#) après fermeture et présentées ci-avant ne considèrent que la solution de stockage de référence consistant à placer les colis primaires de déchets [MAVL](#) dans un conteneur de stockage dit « de référence » (cf. chapitres 2.2.3.1 et 3.4.1) . Les solutions consistant à placer les colis primaires de déchets [MAVL](#) dans un conteneur de stockage dit « renforcé vis-à-vis du confinement » ou bien à les stocker directement dans l'alvéole de stockage ne sont pas traitées par l'Andra au stade du [DOS](#). Au cours de la

<sup>35</sup> Tout au plus l'Andra leur confère une intégrité mécanique estimée à ce stade à 1000 ans [40].

réunion préparatoire, l'Andra a indiqué que le conteneur de stockage dit « renforcé vis-à-vis du confinement » n'aurait aucune fonction après fermeture, à l'instar du conteneur de stockage dit « de référence ».

Les conteneurs de stockage des déchets HA en acier non allié à bas carbone, contribuent à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage ». S'agissant en particulier des colis de déchets HA vitrifiés, l'Andra retient à ce stade que le conteneur de stockage doit être étanche à l'eau tant que l'activité liée aux radionucléides de courte et moyenne périodes n'a pas suffisamment décré et que la température à cœur du verre est supérieure à 50°C pour les colis de déchets HA0 (colis de déchets HA moyennement exothermiques) livrés avant 2075 et 70°C pour les colis de déchets HA1/HA2 (colis de déchets HA fortement exothermiques) livrés au-delà de 2075. L'Andra précise [40] que l'exigence de valeur de température plus élevée retenue pour les colis de déchets HA1/HA2 s'explique par les progrès des connaissances, d'une part déjà disponibles pour la DAC, d'autre part attendus dans les prochaines décennies, sur le comportement du verre nucléaire et celui des radionucléides pour des températures supérieures à 50°C. L'Andra indique [40] en l'état actuel de la conception des quartiers HA1/HA2 du projet, que la température de 70°C à cœur des verres HA1/HA2 est atteinte moins de 500 ans après la fermeture de Cigéo. L'Andra évalue la perte d'étanchéité du conteneur de stockage de colis de déchets HA à 4 300 ans en situation de référence du SEN. En situation enveloppe, il est retenu une durée d'étanchéité conventionnelle égale à 500 ans.

Les examens par l'IRSN de l'évolution des conteneurs en acier et de la valeur de 70°C à cœur des verres HA1/HA2 au-delà de laquelle l'étanchéité à l'eau du conteneur de stockage des colis de déchets HA1/HA2 doit être vérifiée sont présentés respectivement aux chapitres 5.2 et 5.1.7.2 du présent rapport.

Pour ce qui concerne les colis de déchets HA non vitrifiés<sup>36</sup> et les colis de déchets MAVL vitrifiés (dans le cas d'un stockage des colis déchets MAVL vitrifiés en tant qu'intercalaires dans les alvéoles de stockage HA), l'Andra fait l'hypothèse que la durée d'étanchéité des conteneurs de stockage est du même ordre de grandeur que celle du conteneur de stockage des colis de déchets HA vitrifiés.

S'agissant du cas particulier des conteneurs de stockage des combustibles usés, l'Andra considère que le matériau constitutif est de même nature que celui du conteneur de stockage de colis de déchets HA mentionné *supra* [47]. La conception de ce dernier serait en effet reconduite en la transposant à la géométrie des assemblages de combustibles usés. Par ailleurs, ce conteneur de stockage aurait pour fonction de retarder l'arrivée de l'eau au contact des combustibles usés.

### 5.1.2 DEMARCHE D'ETABLISSEMENT DES MODELES DE RELACHEMENT

Le référentiel du comportement des colis de déchets HA et MAVL de 2012 de l'Andra [172] présente l'ensemble des connaissances élémentaires sur le comportement des déchets (combustibles usés, déchets vitrifiés, déchets salins, matériaux métalliques, etc.) obtenu au travers des études de recherche et développement menées par l'Andra et les producteurs. Ces connaissances servent de base aux modèles de relâchement des radionucléides et toxiques chimiques selon une approche phénoménologique par type de matériau (matériaux métalliques, verres, etc.) [89]. Sur la base de ces modèles de relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques [89] ainsi que sur les connaissances fournies par les producteurs sur les différentes familles de colis en termes de caractérisation des

---

<sup>36</sup> Notamment déchets technologiques issus des ateliers de vitrification.

déchets pour fournir les modèles de relâchement des radionucléides et toxiques chimiques pour chacune des familles de colis, l'Andra a établi des modèles de comportement par familles de colis [90]. Dans certains cas, les familles de colis sont découpées en sous-familles pour traduire des caractéristiques différentes, notamment selon les campagnes de production. Enfin, à partir de ces documents [89] [90], l'Andra a établi les modèles [91][92] sur lesquels s'appuie *in fine* l'évaluation de sûreté après fermeture<sup>37</sup>. Concernant les colis pour lesquels à ce jour il n'existe aucun modèle ou le modèle n'est pas applicable dans les conditions du stockage, un modèle dit « labile » est retenu. En cas de modèle applicable, l'analyse du niveau de connaissance (au regard des expérimentations conduites et des incertitudes propres au modèle ou aux conditions de stockage) conduit l'Andra à retenir soit un modèle *phénoménologique*, soit un modèle « *conservatif* ». Enfin, la stratégie de choix des paramètres associés au modèle de relâchement considéré repose sur une analyse de la connaissance de ces paramètres. Une bonne connaissance des paramètres, étayée notamment par des expérimentations, conduit à retenir des paramètres dits « *phénoménologiques* ». En revanche, si la connaissance est moins étayée ou davantage entachée d'incertitudes, l'Andra retient des paramètres dits « *maximaux* ». Pour mémoire, les précédents modèles avaient été fournis par l'Andra au stade du « Dossier 2005 ». Depuis, l'ASN a demandé (2014 D26 [1]) que le DOS présente « [*Les hypothèses prises pour [l']évolution à long terme [des déchets à stocker]*] ». L'IRSN estime que les éléments présentés par l'Andra dans le DOS permettent de solder cette demande. Dans les chapitres qui suivent, l'IRSN examine, pour chaque typologie de déchets, les modèles et paramètres retenus par l'Andra pour l'évaluation de sûreté.

### 5.1.3 COLIS DE DECHETS SALINS NON BITUMES

Les déchets salins non bitumés correspondent à la famille de colis de déchets COG-430 (colis C5). Il s'agit de près de 10 000 m<sup>3</sup> de boues de coprécipitation actuellement entreposées dans deux cuves et cinq silos de l'installation STE2 d'AREVA NC à La Hague. Ces boues contiennent des sels insolubles (immobilisant la majeure partie des radionucléides) à hauteur d'environ 80 % et des sels solubles, essentiellement sulfates et nitrates de sodium, à hauteur d'environ 20 %. Comme indiqué au chapitre 3.1.3, AREVA NC envisage la reprise des boues, le séchage puis le compactage en pastilles de dimension centimétrique à conditionner dans un conteneur en acier inoxydable. Les vides seraient comblés par du sable. Les colis primaires de déchets salins non bitumés sont prévus d'être placés (à raison de 4 colis primaires) en conteneur de stockage en béton n'ayant pas de fonction de sûreté après fermeture du stockage puis stockés en alvéole MAVL.

#### 5.1.3.1 Phénoménologie d'altération des sels non bitumés

L'Andra indique [89] qu'en l'absence de matrice de blocage, l'évolution à long terme des déchets salins non bitumés est uniquement pilotée par la resolubilisation en milieu cimentaire des sels déshydratés lors du procédé de traitement par séchage. Dans le cadre de l'instruction relative à la spécification de production du colis C5 et à son acceptabilité dans un stockage géologique, l'IRSN a relevé que les études transmises par AREVA NC concernant le comportement chimique des boues dans les conditions du stockage après fermeture montrent que les sels radioactifs contenus dans le colis C5 conservent globalement leur caractère insoluble en eau cimentaire.

<sup>37</sup> Au stade du DOS, l'Andra n'intègre pas la quantification de l'impact lié à la présence de toxiques chimiques dans l'évaluation de sûreté [40].

### 5.1.3.2 Modèles de relâchement et paramètres associés

L'Andra propose, en référence pour les déchets salins non bitumés, un modèle de relâchement reposant sur la solubilité des sels et retient comme hypothèse que tous les radionucléides sont associés aux sels solubles [89]. En outre, l'Andra associe tous les sels solubles au  $\text{NaNO}_3$ , sel possédant la plus haute solubilité en eau pure à 25°C (921 g.L<sup>-1</sup>). S'agissant de la solubilité retenue pour le  $\text{NaNO}_3$ , dont la valeur considérée correspond à celle dans une eau à pH=7 (non représentative des conditions alcalines du stockage), l'Andra indique que des premières évaluations ne montrent pas d'évolution notable dans une eau à pH=13.

Par ailleurs, l'impact du panache salin sur les matériaux cimentaires (une attaque sulfatique des bétons est attendue pouvant provoquer leur dégradation et gonflement) ainsi que sur les argilites du Callovo-Oxfordien (les propriétés d'échange cationique et d'exclusion anionique peuvent être modifiées par les importantes forces ioniques attendues, pouvant altérer les performances de rétention dans la roche des radionucléides) est examiné par l'IRSN au chapitre 5.4.3.2 relatif à la perturbation saline.

L'IRSN observe que des essais de lixiviation en eau cimentaire sur des boues montrent que les sels insolubles, auxquels sont associés la quasi-totalité des radionucléides, conservent un caractère insoluble. Associer l'ensemble de l'inventaire radiologique au seul sel soluble  $\text{NaNO}_3$  qui possède par ailleurs la plus haute limite de solubilité est ainsi majorant. L'IRSN considère donc que les hypothèses prises par l'Andra dans la définition du modèle de relâchement des déchets salins non bitumés sont satisfaisantes. Toutefois, l'IRSN note que la valeur considérée à ce stade pour la solubilité du  $\text{NaNO}_3$  correspond à celle dans une eau à pH=7 (non représentative du stockage) et estime que l'Andra devrait justifier dans le dossier de DAC la valeur de la solubilité du nitrate de sodium finalement retenue dans le modèle de relâchement des déchets salins non bitumés.

### 5.1.4 COLIS DE DECHETS SALINS BITUMES

Les déchets salins bitumés correspondent aux familles de colis de déchets COG-020A, COG-420 A/F/G, CEA-1000, CEA-1010, CEA-1020 et CEA-1021. Il s'agit de boues de coprécipitation séchées, enrobées dans une matrice bitume puis conditionnées dans des fûts en acier munis de couvercles sertis. Ces boues contiennent des sels dont la nature est identique à celle décrite au chapitre 5.1.3 précédent. Les colis primaires de déchets salins bitumés sont prévus d'être placés (à raison de 4 colis primaires) en conteneur de stockage en béton n'ayant pas de fonction de sûreté après fermeture du stockage puis stockés en alvéole MAVL.

#### 5.1.4.1 Phénoménologie d'altération des déchets salins bitumés

L'évolution à long terme des déchets salins bitumés est pilotée en premier lieu par l'évolution sous eau de la matrice bitumineuse dans les conditions attendues d'un alvéole MAVL resaturé. L'Andra présente [92] les mécanismes considérés :

- adsorption des molécules d'eau à la surface du bitume ;
- diffusion de l'eau dans le bitume ;
- reprise d'eau par les sels et solubilisation dès que l'activité chimique de l'eau dans le bitume atteint une valeur seuil ;
- gonflement local autour des sels solubles dû à la formation de poches de solutions salines ;
- formation d'une zone altérée, perméable à toutes les espèces ;

- relâchement des sels solubles par transfert dans la zone perméable selon un phénomène diffusif ;
- relâchement des sels peu solubles ;
- relâchement des radionucléides limité par leur transfert diffusif ainsi que par leur concentration à saturation dans la zone perméable.

#### 5.1.4.2 Modèles de relâchement et paramètres associés

S'agissant de l'établissement d'un modèle de relâchement des radionucléides depuis les déchets salins bitumés, l'Andra propose deux approches [89][92]. La première approche est basée sur la modélisation de tout ou partie des phénomènes précités (cf. chapitre 5.1.4.1) à l'aide du code de calcul COLONBO développé par le CEA à des fins d'analyse de sûreté en entreposage et décrit au chapitre 5.1.4.2.1 ci-après. La seconde approche considérée, dans le cas où les modèles implémentés dans le code de calcul ne sont pas jugés applicables, consiste à considérer un relâchement de radionucléides uniquement piloté par la solubilité des sels solubles, à l'instar du modèle de relâchement établi pour les déchets salins non bitumés (cf. chapitre 5.1.3.2).

L'Andra indique que pour les colis compatibles avec la gamme de validité du modèle COLONBO (teneur en sels solubles), ce modèle est appliqué tant que la géométrie du colis est maintenue (estimé par l'Andra à 1000 ans après fermeture). Au-delà, le modèle reposant uniquement sur la solubilité des sels solubles est appliqué. Pour les colis dont les teneurs en sels solubles n'entrent pas dans le domaine de validité du modèle COLONBO, le modèle reposant uniquement sur la solubilité des sels solubles est directement appliqué après fermeture.

##### 5.1.4.2.1 Modèle reposant sur le code de calcul COLONBO

Pour établir un modèle de relâchement en vue de l'évaluation de sûreté après fermeture, l'Andra a fait le choix d'utiliser le modèle COLONBO en retenant une phénoménologie simplifiée, en regard des mécanismes de dégradation précités au chapitre 5.1.4.1. Seul le modèle de dégradation du code COLONBO est retenu, modèle qui considère que tous les radionucléides présents dans la zone perméable sont relâchés du colis. Ce modèle suppose également que les radionucléides sont associés au sel soluble  $\text{NaNO}_3$  (nitrate de sodium), dont la solubilité est prise égale à  $921 \text{ g.L}^{-1}$  (en cohérence avec la valeur retenue au chapitre 5.1.3.2). Le relâchement des radionucléides est alors directement lié à l'avancée du front de dissolution des sels solubles (tous assimilés à  $\text{NaNO}_3$ ) qui ne dépend que de l'activité chimique de l'eau d'une solution composée de ces sels solubles (0,74 pour  $\text{NaNO}_3$ ) et du coefficient de diffusion effectif de l'eau dans la zone perméable formée par la dissolution de ces sels. La cinétique de formation de la zone altérée dans le code COLONBO est liée à la diffusion de l'eau dans le bitume qui, dans un modèle de diffusion classique (de type loi de Fick), est linéairement dépendante de la racine carrée du temps. Selon les hypothèses conservatives précitées, le taux de relâchement annuel des radionucléides s'écrit :

$$\tau(\text{an}^{-1}) = \frac{\alpha}{\sqrt{s} \cdot \sqrt{t}}$$

où  $\alpha$  est une constante,  $s$  la teneur en sels solubles, et  $t$  le temps en années.

L'Andra indique que la valeur du coefficient  $\alpha$  a été calibrée par des calculs réalisés par le CEA, pour des enrobés bitumés de 30 cm de rayon contenant 13 % de sels solubles, avec une hypothèse d'eau pure constamment renouvelée au contact du bitume. Ces calculs aboutissent à un relâchement de 90 % des sels solubles, assimilés à  $\text{NaNO}_3$ , en 10 000 ans. Via ces évaluations la cinétique de relâchement s'exprime numériquement par :

$$\tau(\text{an}^{-1}) = \frac{1,62 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{s} \cdot \sqrt{t}}$$

et la fraction cumulée relâchée (FCR) s'exprime numériquement par :

$$FCR = \frac{3,245 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{s}} \sqrt{t}$$

L'Andra souligne par ailleurs que l'applicabilité du modèle reposant sur le code de calcul COLONBO présente des restrictions :

- la possible remise en cause de la linéarité à la racine carrée du temps du fait d'anciennes études réalisées par le CEA pour lesquelles des relâchements proportionnels au temps et non à sa racine carrée étaient observés. Néanmoins le CEA considère aujourd'hui que ces essais n'étaient pas représentatifs du comportement de boues bitumées industrielles ;
- l'existence de colis de déchets salins bitumés dont la teneur massique en sels solubles sort du domaine de validité s'étendant sur une gamme de teneurs en sels solubles comprises entre 2% et 22% ;
- la non prise en compte de la présence de bulles de gaz qui peuvent offrir un chemin préférentiel au transfert gravitaire de l'eau au sein de la matrice, plus rapide que sous un régime purement diffusif.

Dans l'option du modèle COLONBO retenue, la cinétique de relâchement des radionucléides à l'échelle d'un colis ne dépend en définitive que de la cinétique d'altération du bitume au contact de l'eau. Le relâchement depuis la zone altérée est considéré instantané et son ampleur est pilotée par la solubilité du nitrate de sodium, auquel est associée l'intégralité des radionucléides.

L'IRSN estime que l'hypothèse selon laquelle tous les radionucléides sont associés au sel soluble  $\text{NaNO}_3$  (sel possédant la plus haute solubilité en eau pure à 25°C) donne un caractère conservatif au terme source radiologique issu de la zone altérée du bitume. Néanmoins, l'IRSN souligne que le conservatisme de l'évaluation de la cinétique d'altération du bitume n'est pas démontré. En effet, comme mentionné *supra*, la présence de chemins préférentiels (fracturation et dégradation de la matrice bitumée sous l'effet de son auto-irradiation, bulles de gaz de radiolyse coalescées) pour le transfert de l'eau au sein de la matrice peut accélérer la cinétique d'altération. De plus, les modèles mathématiques de diffusion de l'eau dans la matrice étant établis en une dimension, il apparaît que le modèle d'altération ne peut rendre compte d'une altération à la fois radiale et axiale du bitume. **Compte tenu de ces éléments, l'IRSN estime que l'utilisation du modèle COLONBO ne garantit pas le conservatisme du terme source radiologique évalué pendant les 1000 premières années après fermeture, pour les colis dont la teneur en sels solubles est compatible avec la validité de ce modèle.**

#### 5.1.4.2.2 Modèle reposant sur la solubilité des sels

Le modèle considéré par l'Andra, pour les déchets salins bitumés, reposant sur la solubilité des sels, est en tout point identique à celui établi pour les colis de déchets salins non bitumés, modèle que l'IRSN estime satisfaisant (cf. chapitre 5.1.3.2). En conséquence, l'IRSN estime que le modèle reposant uniquement sur la solubilité des sels devrait être utilisé pour l'ensemble des colis bitumés, directement après fermeture.

### 5.1.5 PROBLEMATIQUE DES GONFLEMENTS LIES AUX DECHETS SALINS BITUMES ET NON BITUMES

Les phénomènes de gonflement des colis de déchets salins bitumés ou des conteneurs de stockage de colis de déchets salins non bitumés sont connus et significatifs en termes d'effet potentiel sur la roche hôte. En particulier,

et comme mentionné au chapitre 5.1.4.1, un gonflement de la matrice bitume est attendu du fait de la formation de poches de solutions salines consécutives à la diffusion de l'eau dans la matrice. L'Andra [195] mentionne que des essais de gonflement sous eau de colis bitumés belges menés par le SCK-CEN amènent à ce stade à considérer une pression de gonflement maximale s'exerçant sur les ouvrages d'un alvéole MAVL de 20 MPa. L'IRSN observe que cette valeur est issue de Mariën et al. (2012) [200] qui mentionne en outre que la pression de gonflement des enrobés bitumés belges peut atteindre des valeurs théoriques maximales de l'ordre de 43 MPa. L'IRSN considère donc que des effets mécaniques conséquents sur la roche hôte peuvent s'exercer, puisque la pression lithostatique de la roche sur la galerie est évaluée à environ 12 MPa. Au cours de l'instruction l'Andra a indiqué attendre les résultats des essais des producteurs d'enrobés bitumés français pour statuer sur ce sujet, précisant que les études portant sur les pressions de gonflement exercées par les enrobés bitumés stockés dans Cigéo seront remises à échéance de la DAC. Ce sujet sera donc examiné par l'IRSN lors de l'examen de la DAC.

Par ailleurs, s'agissant des colis de déchets salins non bitumés (colis type C5), l'IRSN souligne que la diffusion du panache de sulfates issu des boues réagit avec les composants du conteneur de stockage en béton pour former de l'ettringite. L'IRSN estime que l'augmentation de la teneur en ettringite pourra entraîner des processus de gonflement du conteneur de stockage et des ouvrages de soutènement des alvéoles MAVL (cf. chapitre 5.4.3.2), pouvant générer des contraintes mécaniques sur la roche hôte. Dans le cadre de l'instruction relative à la spécification de production du colis C5 et à son acceptabilité au stockage géologique (cf. rapport IRSN [197]), l'Andra a indiqué que les vides laissés dans les alvéoles MAVL pourraient suffire pour une expansion libre des matériaux cimentaires, sans toutefois apporter d'éléments quantitatifs sur cette expansion. Ce sujet est examiné au chapitre 5.4.3.2 relatif à la perturbation saline par les déchets MAVL.

### 5.1.6 COLIS DE DECHETS METALLIQUES

Les colis de déchets métalliques sont constitués principalement de déchets de structure issus des parties métalliques des assemblages combustibles utilisés en réacteur ou de déchets activés sous flux neutronique issus d'éléments activés en réacteur [92]. Les métaux présents dans ces colis sont des alliages en zirconium des coques produites par cisailage des crayons de combustible lors des opérations de traitement, de l'acier inoxydable provenant notamment des embouts des assemblages combustibles traités et de l'inconel provenant des petites pièces de structure des assemblages (ressorts de grilles par exemple). Une grande part de l'inventaire radiologique des déchets métalliques est constituée de produits d'activation ( $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ , etc.). Le reste de l'inventaire radiologique correspond aux produits de fission, implantés par recul dans la face interne des gaines combustibles ou contenus dans les dépôts et résidus après les opérations de retraitement, ainsi qu'aux actinides constitutifs des éléments du combustible qui n'ont pu être récupérés par les opérations de retraitement. Les radionucléides autres que les produits d'activation présents dans les colis de déchets métalliques sont associés à des déchets pouvant être, d'une part des matériaux non métalliques (carbure de bore, pyrex, matière organique, etc.), d'autre part des alliages métalliques présents de façon globalement minoritaire (alliage AIC notamment). Ils peuvent parfois s'apparenter à une contamination (produits de fission inclus dans la zircone, dépôts solides résiduels présents à la surface des coques, fines de tailles inférieures au millimètre, etc.). Deux modes différents de conditionnement sont actuellement utilisés pour le colisage de ces déchets. Les déchets métalliques peuvent être compactés (sans matrice cimentaire) avant d'être conditionnés en conteneur de type CSD-C. Ce conditionnement concerne les familles COG-070, COG-100, COG-110, COG-120, COG-450, COG-530, COG-540 et COG-550). Les déchets métalliques peuvent également être bloqués dans une matrice cimentaire puis conditionnés en conteneur métallique ou en béton. Ce conditionnement concerne les

familles de colis de déchets COG-040, CEA-1050, CEA-1060, EDF-080 et EDF-090. Le conditionnement des déchets non encore produits est à l'étude. Les colis primaires de déchets métalliques sont prévus d'être placés (à raison de 1 à 4 colis primaires) en conteneur de stockage en béton n'ayant pas de fonction de sûreté après fermeture du stockage puis stockés en alvéole [MAVL](#).

### 5.1.6.1 Phénoménologie d'altération des déchets métalliques

En stockage, les radionucléides provenant de l'activation des éléments constitutifs des différents alliages métalliques (alliages de zirconium, aciers inoxydables et alliages de nickel) ne peuvent être relâchés préalablement à l'altération des pièces par corrosion. Leur relâchement repose, d'après l'Andra [92], sur les phénomènes suivants :

- oxydation (corrosion du métal) résultant d'un processus électrochimique mettant en jeu une réaction d'oxydation du métal ;
- formation et dissolution d'une couche d'oxyde en surface du métal ;
- migration éventuelle des radionucléides au sein de la couche d'oxyde.

Deux modèles de corrosion généralisée sont proposés pour traduire ces phénomènes :

- un modèle « phénoménologique » pour lequel le relâchement des radionucléides est contrôlé par la corrosion du métal et la dissolution de l'oxyde passivant ou la migration des radionucléides au sein de cette couche ;
- un modèle « conservatif » qui ne prend en compte que la corrosion du métal et néglige l'effet potentiel de la couche d'oxyde.

L'Andra précise néanmoins que les « *paramètres phénoménologiques permettant de rendre compte de la dissolution de l'oxyde ou de la migration des différents radionucléides au sein de l'oxyde ne sont pas connus à ce stade des études* ». Aussi, le modèle de relâchement « *conservatif* » basé sur les vitesses de corrosion des éléments métalliques est retenu. En supposant que l'activité est répartie de manière uniforme sur l'épaisseur de la pièce métallique considérée, l'Andra montre que le modèle est uniquement fonction de la vitesse de corrosion du métal  $V_{\text{corr}}$  et de l'épaisseur de la pièce métallique contenant des produits d'activation. Pour ce qui concerne les vitesses de corrosion, EDF a conduit des essais sur des alliages de zirconium [89]. Les résultats de ces essais tendent à montrer une vitesse de corrosion de l'ordre de  $3,2 \text{ nm.an}^{-1}$  dans des milieux cimentaires dits « nominal » (pH 12,5, à 20 °C et 50 °C) et « carbonaté » (pH 9, à 20 °C). L'Andra indique qu'après quelques années d'exposition dans les milieux alcalins à basse température (20 et 50 °C), les vitesses de corrosion des alliages de zirconium devraient se situer autour de  $1 \text{ nm.an}^{-1}$ . A court terme (< 2 ans), les vitesses de corrosion mesurées sont inférieures à  $10 \text{ nm.an}^{-1}$ . Les études montrent par ailleurs que la nature des alliages de zirconium, le phénomène de corrosion localisée, l'irradiation, la température et le pH de la solution n'influent pas sur les vitesses de corrosion, en particulier du fait des conditions anoxiques et du débit de dose attendu lorsque l'eau arrivera au contact des déchets. S'agissant des aciers inoxydables et des alliages de nickel, les études présentées par l'Andra montrent que les vitesses de corrosion sont inférieures à  $10 \text{ nm.an}^{-1}$ , quelles que soient les conditions de températures (essais menés à 20 et 50 °C) et de pH (9 et 12,5). Différents phénomènes sont susceptibles de modifier les vitesses de corrosion. L'Andra indique que les nuances des alliages, la radiolyse, le pH et le risque de corrosion localisée n'influent pas sur la vitesse de corrosion, et que l'effet de la température sur les vitesses de corrosion reste faible sur la plage considérée (entre 30 °C et 50 °C). Enfin, l'Andra précise ne pas disposer de données consolidées permettant d'évaluer la corrosion des matériaux considérés au contact de déchets organiques.

Pour le cas particulier des alliages de zirconium, l'Andra précise que leur corrosion en réacteur conduit à la formation d'une couche d'oxyde épaisse (zircone) en faces interne et externe des coques. Les radionucléides piégés au sein de la zircone sont susceptibles d'être relâchés en stockage soit par dissolution de la zircone, soit par migration au sein de la couche d'oxyde. L'Andra indique toutefois que les données obtenues à ce jour sur ces mécanismes n'intègrent pas l'effet du passage en réacteur, des opérations de traitement et de conditionnement (cisailage, acide nitrique, compactage, etc.) et des perturbations en stockage [89]. De fait, un relâchement instantané des radionucléides est proposé [92].

S'agissant de la contamination surfacique des déchets métalliques, aucune description phénoménologique n'est proposée par l'Andra.

#### **5.1.6.2 Modèles de relâchement et paramètres associés**

Pour les pièces métalliques activées en alliages de zirconium, aciers inoxydables et alliages de nickel, le modèle de relâchement « conservatif » mentionné précédemment est retenu. Pour ce qui concerne les vitesses de corrosion, l'Andra retient pour chacun des alliages métalliques (alliages de zirconium, aciers inoxydables et alliage de nickel) la valeur maximale observée en eau cimentaire. Pour ce qui concerne les épaisseurs des pièces, l'Andra retient pour les alliages de zirconium l'épaisseur des coques sans les couches d'oxydes. Pour les aciers inoxydables et les alliages de nickel il existe différentes pièces d'épaisseurs et de formes différentes, plus ou moins proche du flux neutronique en réacteur. L'Andra fait l'hypothèse que toute l'activité en produits d'activation est concentrée dans les plus petites pièces proches du flux neutronique : ressorts intérieurs en Inconel et tubes de gainage en acier inoxydable. S'agissant des produits d'activation contenus dans les fines de cisailage et dans les éclats infra-millimétriques, l'Andra retient un relâchement labile du fait de leur faible taille et de leur surface spécifique. A cet égard il est indiqué [90] qu'AREVA retient comme valeur majorante, sur la base des données de dimensionnement et de fonctionnement des ateliers de conditionnement des coques et embouts compactés, une teneur en fines et éclats de 5,6 % de la masse totale d'alliage de zirconium. Enfin, compte tenu du fait que le niveau de connaissance sur cette teneur est jugé moyen, un facteur de marge de 2 est retenu en sensibilité.

Pour ce qui concerne le reste de l'inventaire (contamination surfacique, radionucléides situés dans la zircone, dans les alliages métalliques tels que l'AIC présents de façon minoritaire ou encore dans des matériaux non métalliques tels que le carbure de bore, le pyrex ou les matières organiques) un modèle de type labile est retenu au stade du [DOS](#).

*In fine*, l'Andra retient pour les colis de déchets métalliques compactés et cimentés deux modèles de relâchement en fonction du niveau de connaissance des déchets et de leur phénoménologie d'altération :

- le modèle conservatif par corrosion pour une partie de l'inventaire des familles de colis COG-100, COG-110, COG-120 et EDF-080 ;
- le modèle labile pour la famille COG-070 (CSD-C HAO), du fait de la présence de matières organiques, pour les familles COG-450, COG-530, COG-540 et COG-550 en raison de l'absence de dossiers de connaissances à ce stade, pour la famille COG-040 pour couvrir les incertitudes liées à la présence d'un joint en silicone, pour les familles CEA-1050, CEA-1060 et EDF-090, car les épaisseurs des pièces ne sont pas connues. De plus il existe un risque de couplage galvanique pour les familles CEA-1050 (entre le graphite et les autres matériaux) et CEA-1060 (entre l'aluminium et le magnésium).

Les paramètres retenus en référence pour les familles de colis pour lesquelles le modèle par corrosion est applicable sont rassemblés dans le Tableau 14 ci-après.

Familles de colis de déchets	Valeurs retenues pour les paramètres associés au modèle de corrosion des éléments métalliques					Matériaux pour lesquels un modèle labile est retenu	
	Vitesse de corrosion		Epaisseur				
	Alliage de zirconium	Acier inoxydable, alliage de nickel	Alliage de zirconium	Alliage de nickel	Acier inoxydable		
Déchets métalliques compactés	COG-100	20 nm.an <sup>-1</sup>	10 nm.an <sup>-1</sup>	0,5 mm	0,3 mm	1,5 mm	Contamination surfacique, zircone, fines et éclats (5,6 % de la masse totale d'alliage de zirconium)
	COG-110A	20 nm.an <sup>-1</sup>	10 nm.an <sup>-1</sup>	0,5 mm	0,3 mm	1,5 mm	Contamination surfacique, zircone, fines et éclats (5,6 % de la masse totale d'alliage de zirconium)
	COG-110B	20 nm.an <sup>-1</sup>	10 nm.an <sup>-1</sup>	Zirlo : 0,515 mm M5 : 0,543 mm	0,3 mm	1,5 mm	Contamination surfacique, zircone, fines et éclats (5,6 % de la masse totale d'alliage de zirconium)
	COG-110C	20 nm.an <sup>-1</sup>	10 nm.an <sup>-1</sup>	Zircaloy 4 : 0,5 mm Zirlo : 0,515 mm M5 : 0,543 mm	0,3 mm	1,5 mm	Contamination surfacique, zircone, fines et éclats (5,6 % de la masse totale d'alliage de zirconium)
	COG-120	20 nm.an <sup>-1</sup>	10 nm.an <sup>-1</sup>	Zircaloy 4 : 0,5 mm Zirlo : 0,515 mm M5 : 0,543 mm	0,3 mm	1,5 mm	Contamination surfacique, zircone, fines et éclats (5,6 % de la masse totale d'alliage de zirconium)
Déchets métalliques cimentés	EDF-80	-	10 nm.an <sup>-1</sup>	-	4,3 mm	0,5 mm	Contamination surfacique, pyrex, AIC, B4C

Tableau 14 : Paramètres retenus en référence pour les déchets métalliques dans le cas où le modèle par corrosion est applicable [92]

L'IRSN considère que le modèle par corrosion utilisé par l'Andra pour traduire le relâchement des produits d'activation contenus dans les alliages métalliques est applicable. En outre, l'Andra retient des valeurs de vitesses de corrosion qui apparaissent enveloppes de celles déterminées par les études présentées dans le **DOS** et disponibles dans la littérature, ce qui est satisfaisant. Pour le reste de l'inventaire, l'Andra retient un relâchement instantané dès l'arrivée de l'eau au contact des déchets (modèle de relâchement dit labile). Compte tenu des incertitudes résiduelles quant aux phénomènes de relâchement, l'IRSN considère ce modèle de relâchement satisfaisant. S'agissant en particulier de la teneur en fines et éclats infra-millimétriques pour lesquels le modèle labile s'applique, l'IRSN note, d'une part qu'AREVA ne considère pas de fines et éclats provenant des pièces en acier inoxydables ou en alliage de nickel, d'autre part que la valeur annoncée ne tient pas compte de l'impact du compactage sur la proportion de fines et éclats. L'IRSN estime donc qu'il conviendrait que l'Andra confirme pour la **DAC** la teneur en fines et éclats infra-millimétriques pour laquelle un modèle labile s'applique.

### 5.1.7 COLIS DE DECHETS VITRIFIES HA

Les déchets vitrifiés dans les usines de Marcoule et de La Hague sont essentiellement des solutions **HA** contenant des produits de fission, des actinides mineurs et des produits d'activation, issues du retraitement des combustibles usés. Ces solutions sont évaporées, puis les résidus solides sont calcinés et mélangés à haute température avec de la fritte de verre. *In fine*, le verre obtenu est coulé dans un conteneur primaire en acier inoxydable. Les déchets provenant des opérations de vidange du four de vitrification, les calcinats issus des campagnes de nettoyage du calcinateur ainsi que les effluents générés par les recherches conduites sur les combustibles sont également conditionnés par vitrification. Les différentes familles de colis de déchets vitrifiés **HA** se distinguent notamment par la nature des

solutions conditionnées, les caractéristiques des verres produits (puissance thermique, teneur en actinides, fritte de verre, etc.) ainsi que le type de conteneur primaire. Les colis primaires de déchets vitrifiés HA sont placés (à raison de 1 ou 2 colis primaires) dans un conteneur de stockage en acier non allié bas carbone ayant pour objet de retarder l'arrivée de l'eau au contact de la matrice vitreuse, puis stockés en alvéole HA.

### 5.1.7.1 Comportement intrinsèque du verre

S'agissant du comportement intrinsèque du verre, l'Andra précise [89] que seules la cristallisation, l'auto-irradiation et les contraintes thermo-mécaniques emmagasinées lors de son élaboration sont susceptibles d'induire des modifications de ses caractéristiques physico-chimiques. Pour ce qui concerne la cristallisation, l'Andra considère que le processus peut être négligé dans le cas des colis produits ou en cours de production sous assurance qualité compte tenu des dispositions technologiques retenues. Dans le cas des verres dits « anciens », des incertitudes subsistent du fait du manque de données. S'agissant de l'auto-irradiation, aucun effet néfaste n'a été observé jusqu'à des doses cumulées de  $10^{19}$  a/g. Les modifications induites tendent à diminuer la fragilité du verre et à augmenter sa résistance à la fissuration. Selon l'Andra, la production d'hélium associée aux désintégrations  $\alpha$  n'a aucune conséquence sur le comportement mécanique du verre jusqu'à des teneurs correspondant à une durée de vie de plusieurs millions d'années. Concernant la fracturation, l'Andra rappelle qu'elle résulte du relâchement des contraintes accumulées dans le verre lors de son élaboration. Ainsi, l'augmentation du nombre de coulées ou le procédé de vitrification en creuset froid peuvent induire une diminution de la fissuration du fait d'un refroidissement moins sévère. Le taux de fracturation a été évalué au moyen d'études physiques (tomographie et tri granulométrique) et numériques (modèle d'endommagement thermo-mécanique).

L'IRSN convient du faible risque de cristallisation des verres produits dans des conditions maîtrisées telles que le refroidissement rapide et le maintien des colis primaires à des températures inférieures au domaine de cristallisation du verre compris entre 630° et 1200°C [172]. Les données disponibles dans la littérature montrent par ailleurs que les évolutions du verre par auto-irradiation sont essentiellement dues aux noyaux de recul lors des désintégrations  $\alpha$  et conduisent à une augmentation de la plasticité et de la ténacité du verre et donc de sa résistance à la fissuration. A cet égard, d'après des études récentes menées par dynamique moléculaire, cette modification de propriétés mécanique serait liée à l'évolution structurale du matériau. De plus, aucun impact d'une forte incorporation d'hélium dans le verre n'a en effet été mis en évidence. S'agissant de la fracturation, les études conduites ces dernières années apportent des éléments nouveaux en comparaison du « Dossier 2005 ». En particulier, le développement d'un modèle d'endommagement basé sur des données récentes relatives aux propriétés thermo-mécaniques du verre constitue une avancée notable.

### 5.1.7.2 Phénoménologie d'altération des déchets vitrifiés HA

Les nombreuses recherches conduites sur les verres HA de type R7T7<sup>38</sup> ont conduit à la description phénoménologique par l'Andra de l'altération du verre sous eau [40][89][172], résumée ci-après. Dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage, l'eau au contact du verre entraîne son altération et conduit au relâchement des radionucléides et toxiques chimiques. Dans un premier temps, le verre s'altère à une vitesse initiale  $V_0$

<sup>38</sup> Les verres R7T7 désignent les verres produits dans les installations de vitrification UP2 et UP3 de l'établissement AREVA NC de La Hague selon les spécifications 300 AQ 016 (famille de colis COG-140) et 300 AQ 060 (COG-800). Par extension, sont couvertes les familles de colis de déchets vitrifiés entrant dans le domaine de composition spécifiée R7T7 (CEA-350, COG-200, COG-810, COG-820 et COG-830). Enfin, les familles à produire COG-880, COG-890 et COG-900 sont assimilées aux verres R7T7.

dépendante de la température et du pH. Durant cette phase, l'eau pénètre dans le réseau vitreux selon un processus d'hydratation lié à un échange entre les protons de la solution et les alcalins du verre (interdiffusion). En parallèle, se produit l'hydrolyse du réseau vitreux qui pilote l'altération du verre et se produit à l'interface couche hydratée/solution. Une diminution de la vitesse d'altération est ensuite observée. Celle-ci s'explique par l'atteinte de conditions de saturation en silicium de la solution environnante, ce qui conduit à une diminution de l'affinité de la dissolution du verre et à la formation d'une pellicule d'altération à sa surface qui joue le rôle d'une barrière diffusionnelle. Elle se forme par condensation/recondensation et précipitation des espèces en solution. Dans un troisième temps, l'altération du verre se poursuit à une vitesse stabilisée moins élevée dite vitesse résiduelle  $V_R$  dépendante de la température. Ce régime est contrôlé par la limitation de l'affinité réactionnelle, la diffusion de l'eau au sein de la pellicule d'altération et la précipitation de phases secondaires qui entretient l'altération du verre en consommant du silicium. Le temps de passage d'un régime de vitesse initiale à un régime de vitesse résiduelle est directement lié à la quantité de silicium en solution. Il dépend donc des conditions d'environnement. En particulier, la corrosion des composants métalliques du stockage libère du fer dont une partie va diffuser dans l'argilite et une autre va former des silicates de fer avec le silicium issu du verre puis d'autres produits de corrosion. La consommation du silicium par le fer et les produits de corrosion intervient au détriment de la formation de la pellicule d'altération protectrice [89]. Le verre s'altère donc en vitesse initiale tant qu'il reste du fer métal ou des produits de corrosion non saturés en silicium. Dans un dernier temps, une reprise d'altération conduisant à une vitesse d'altération pouvant atteindre des valeurs proches mais inférieures à la vitesse initiale est possible. Cette reprise d'altération peut être observée dans des conditions de température ou de pH élevés, favorables à la précipitation de certaines phases secondaires (de type zéolithe) qui s'accompagne d'une consommation des espèces constitutives de la pellicule d'altération. L'ensemble des étapes susmentionnées sont illustrées sur la Figure 66 ci-après.

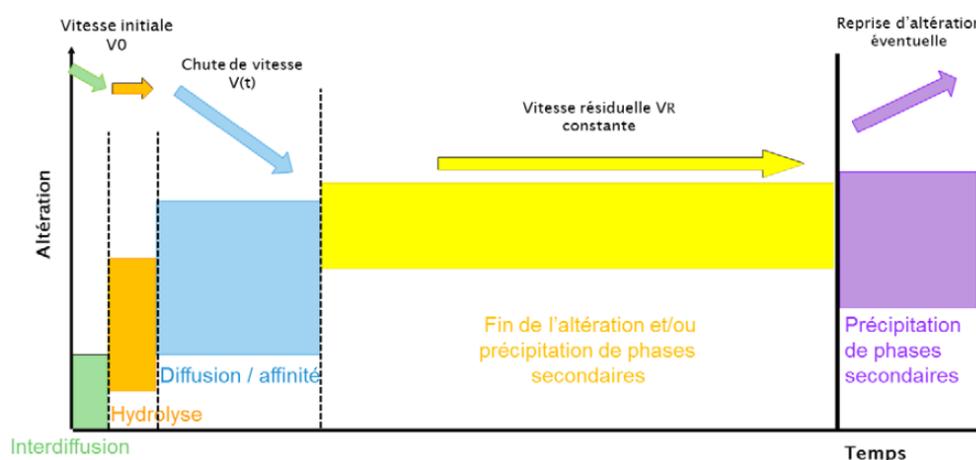


Figure 66 : Illustration des différents régimes d'altération du verre sous eau au cours du temps [40]

Le modèle phénoménologique GRAAL (Glass Reactivity taking into Account Layer), développé par Frugier et al. (2008) [173], permet de reproduire l'altération du verre en intégrant une interphase réactive passivante (IRP) qui constitue à la fois une zone réactive vis-à-vis de la solution lixiviant le verre et une barrière diffusive vis-à-vis du transfert de l'eau et des espèces [89].

L'Andra fait mention d'importants programmes réalisés afin d'acquérir des données phénoménologiques couvrant des conditions représentatives du stockage géologique, milieu argileux notamment. Les études montrent que les vitesses initiales mesurées en eau de site et milieu renouvelé sont jusqu'à cinq fois plus élevées que celles mesurées

en eau pure du fait de la présence de calcium. Le calcium peut conduire à la formation de sites métalliques rendant les liaisons Si-O du verre plus facilement hydrolysables. Par ailleurs, l'Andra indique [89] que le pH de l'eau du site et la disponibilité du magnésium en solution ont une incidence sur le régime de chute de vitesse et sur la vitesse résiduelle. La précipitation de phases magnésiennes (possible au-delà d'un certain pH) peut entretenir l'altération du verre en consommant du silicium. Toutefois, une fois le magnésium consommé, la vitesse résiduelle mesurée en eau de site est du même ordre que celle mesurée en eau pure. Les expérimentations en présence de produits de corrosion mettent en évidence un maintien sur des périodes plus longues de la vitesse initiale avant l'amorce d'une chute de vitesse. En présence de fer, un comportement complexe lié au couplage chimie-transport est observé.

De manière générale, il ressort des études que les processus d'altération des verres du domaine de composition R7T7 dépendent fortement de la composition du verre et des conditions d'environnement (pH, température, espèces en solution, renouvellement, etc.).

S'agissant de l'impact de l'irradiation, les études réalisées jusqu'à présent sur des verres dopés ou soumis à des irradiations externes n'ont pas mis en évidence de différences significatives avec celles conduites sur des verres inactifs aussi bien en régime de vitesse initiale qu'en régime de vitesse résiduelle. Enfin, pour ce qui concerne la transposabilité de la phénoménologie d'altération à l'ensemble des déchets vitrifiés, elle est appréciée par l'Andra au regard du niveau de connaissance des différents verres.

L'Andra précise [40] que l'altération des déchets vitrifiés pourrait débuter sous eau (conditions saturées) ou sous vapeur d'eau (conditions non saturées). En présence d'une humidité relative importante, une couche d'eau se forme à la surface du verre et conduit à son altération [89]. Selon l'Andra, l'altération par la vapeur d'eau conduit à une vitesse d'hydratation  $V_{hydr}$  dépendante de la température, toujours inférieure à la vitesse initiale sous eau  $V_0$ . Toutefois, l'Andra indique que l'absence d'échange avec l'extérieur entraîne une augmentation du pH et des concentrations en espèces dissoutes au sein de la couche. La formation de phases secondaires est ainsi largement favorisée et les précipités peuvent piéger le silicium et concourir au maintien de vitesses d'altération élevées. L'Andra souligne par ailleurs que les résultats obtenus sont difficilement transposables aux verres n'appartenant pas au domaine de composition R7T7 et que l'effet de la radiolyse de l'eau est à évaluer. Enfin, les conséquences de l'altération par la vapeur d'eau sur l'altération ultérieure sous eau ont été peu étudiées.

La quantité de verre altéré, et donc le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques, dépend de la vitesse d'altération du réseau vitreux et de la surface réactive du verre. La surface totale d'un bloc de verre est la somme de sa surface externe et de la surface développée par les fissures en son sein. La surface réactive est quant à elle la surface réellement accessible à l'eau. Aussi, l'Andra distingue le taux de fracturation théorique d'un verre (lié à la surface totale) du taux de fracturation utile (lié à la surface accessible à l'eau). Les études montrent que ce dernier dépend du régime d'altération. Le taux de fracturation utile est plus faible en régime de vitesse initiale ( $\tau_0$ ) qu'en régime de vitesse résiduelle ( $\tau_R$ ). En régime de vitesse initiale, seules les surfaces facilement accessibles à l'eau s'altèrent en  $V_0$ . Les autres surfaces s'altèrent à des vitesses inférieures propres aux milieux plus confinés où l'atteinte de conditions de saturation se fait très rapidement. Ainsi, seules la surface externe du verre et une partie du réseau de fissures participent de manière significative au relâchement. En régime de vitesse résiduelle, toutes les surfaces accessibles à l'eau s'altèrent en  $V_R$ . Dans ces conditions, toutes les surfaces accessibles à l'eau participent de manière équivalente au relâchement. Des études de lixiviation à l'échelle 1 ont été conduites pour déterminer les taux de fracturation utile en régimes de vitesse initiale et de vitesse résiduelle. Il faut noter que le taux de fracturation utile en altération par la vapeur d'eau n'est pas connu à ce stade. Le taux de fracturation n'est

pas considéré par l'Andra comme variable dans le temps. S'agissant de l'évolution de la fracturation du verre, l'Andra précise que l'augmentation par fissuration chimique ou corrosion sous contrainte n'a pas à ce jour été mise en évidence expérimentalement (hors conditions hydrothermales). La diminution par colmatage des fissures est en revanche un phénomène qui a déjà été observé à long terme, sur des analogues naturels ou archéologiques [172]. Par ailleurs, l'évolution de la fracturation d'un verre sous les contraintes lithostatiques prévalant en conditions de stockage a également été simulée. Aucune modification significative de l'endommagement n'a été constatée.

Le modèle d'altération des déchets vitrifiés HA présenté par l'Andra [89] prend en compte la phase d'altération par la vapeur d'eau puis la phase d'altération sous eau et considère un relâchement des radionucléides et toxiques chimiques congruent à l'altération de la matrice vitreuse en régimes de vitesse initiale et de vitesse résiduelle. Lors de l'altération par la vapeur d'eau, il n'y a pas de relâchement des radionucléides et toxiques chimiques qui sont piégés dans la couche d'eau formée à la surface du verre (absence d'échange avec l'extérieur). Les radionucléides et toxiques chimiques concentrés dans la couche d'eau sont en revanche instantanément relâchés lors de l'atteinte de conditions saturées. La Figure 67 ci-après illustre l'évolution de la vitesse d'altération du verre et de la vitesse de relâchement des radionucléides et toxiques chimiques en fonction du temps [40].

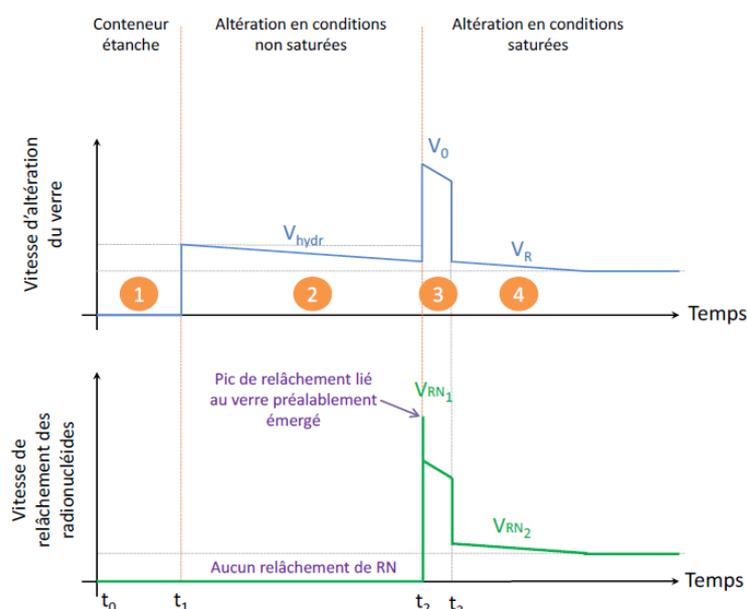


Figure 67 : Illustration de l'évolution de la vitesse d'altération du verre et de la vitesse de relâchement des radionucléides et toxiques chimiques en fonction du temps [40]

S'agissant de la conception des alvéoles HA, l'Andra envisage la mise en place d'un matériau de remplissage de type cimento-bentonitique à l'extrados du chemisage en acier (cf. chapitre 2.2.3.2). Ainsi que précisé au chapitre 5.2.1, l'introduction de ce matériau vise à réduire des effets liés à la phase transitoire oxydante sur la corrosion des aciers. Un programme de recherche et développement initié en 2015 par l'Andra vise à vérifier que le pH sera proche de la neutralité dans l'alvéole et que les perturbations chimiques induites sur le verre seront limitées au moment de l'arrivée de l'eau à son contact.

L'IRSN observe que les études rapportées par l'Andra [171] utilisées dans le DOS présentent peu d'éléments nouveaux par rapport au « Dossier 2005 » quant à la phénoménologie d'altération du verre sous eau pure en régime de vitesse initiale. En particulier, le processus d'hydratation étroitement lié au mécanisme d'interdiffusion reste peu étudié en tant que tel. A ce sujet, l'IRSN note que Hellmann et al. (2015 [174]) doute du phénomène

d'interdiffusion et propose un mécanisme de dissolution-reprécipitation interfaciale. Toutefois, eu égard au faible enjeu en comparaison avec l'hydrolyse du réseau vitreux, l'IRSN estime que cette incertitude a peu d'impact sur le modèle d'altération.

Un travail important a par ailleurs été engagé depuis le « Dossier 2005 » pour apprécier l'effet d'une eau représentative du stockage et le modèle GRAAL permet de reproduire l'altération d'un verre de composition R7T7 en eau argileuse. Néanmoins, il ne permet pas aujourd'hui de simuler l'altération du verre au voisinage de matériaux d'environnement tels que le fer, les produits de corrosion ou l'argilite [89]. **Aussi, l'IRSN estime que les études devraient se poursuivre pour préciser l'influence des matériaux d'environnement sur la phénoménologie d'altération des verres, notamment pour ce qui concerne le passage d'un régime de vitesse initial à un régime de vitesse résiduelle.**

Pour ce qui concerne l'exigence de température au cœur du verre au moment de l'arrivée de l'eau à son contact (cf. chapitre 5.1.1), l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que l'élévation de ce critère de 50°C à 70°C pour les colis de déchets HA1/HA2 dans le DOS est associée à l'acquisition de données complémentaires sur le comportement au-delà de 50°C des verres nucléaires et des radionucléides. Sur le comportement des verres nucléaires, des études ont été lancées dès 2014 pour préciser l'influence de l'eau de site sur l'altération des verres à 70°C et les premiers résultats apparaissent conformes au comportement attendu. **L'IRSN estime qu'il conviendrait que l'Andra dispose d'ici la DAC de l'ensemble des résultats expérimentaux permettant de justifier la valeur cible de 70°C à cœur du verre au-delà de laquelle l'étanchéité à l'eau du conteneur de stockage de colis de déchets HA1/HA2 doit être assurée.**

S'agissant de la fracturation, l'IRSN relève que les études conduites ces dernières années apportent un grand nombre d'éléments nouveaux en comparaison avec le « Dossier 2005 ». En particulier, l'étude des fissures accessibles à l'eau d'un bloc de verre à l'échelle 1 constitue une avancée notable. Néanmoins, cette étude n'a été réalisée qu'en eau pure. Or, la notion de taux de fracturation utile en régime de vitesse initiale est liée à l'atteinte rapide d'un équilibre dans les espaces très confinés. L'IRSN considère que le temps d'atteinte de ces conditions, ainsi que les tailles de fissures concernées, sont fortement dépendants du pH et des espèces en solution. **Aussi, l'IRSN estime que l'intérêt de procéder à des essais de lixiviation échelle 1 en eau de site et en présence de matériaux d'environnement devrait être évalué par l'Andra pour la DAC.** Pour ce qui concerne l'altération du verre au sein de fissures, l'IRSN souligne la nécessité d'améliorer la description des couplages entre les réactions chimiques et le transport en vue de la prédiction des quantités de verre altéré à l'échelle d'un bloc de verre.

Par ailleurs, la description de l'altération par la vapeur d'eau constitue une grande différence par rapport au « Dossier 2005 » même si les données phénoménologiques sont encore peu nombreuses et que les conséquences de l'altération par la vapeur d'eau sur l'altération ultérieure sous eau ont été peu étudiées. **L'IRSN considère que l'Andra devrait présenter dans le dossier de DAC les résultats des développements et acquisitions de données visant à améliorer la compréhension des phénomènes d'altération des verres par la vapeur d'eau et de l'impact de celle-ci sur l'altération ultérieure sous eau.**

Pour ce qui concerne le relâchement des radionucléides, l'IRSN estime que l'hypothèse d'un relâchement congruent à la dissolution du verre est pénalisante. En effet, les données expérimentales montrent que certains éléments, dont les actinides, sont bien retenus dans la pellicule d'altération. Les études ne permettent toutefois pas d'identifier les processus [89] et ne couvrent pas les conditions attendues en stockage ni la présence de complexants en solution.

Enfin, pour ce qui est de la mise en place d'un matériau de remplissage ciment-bentonitique à l'extrados du chemisage en acier des alvéoles HA, l'IRSN souligne que les études présentées sur l'altération des verres en milieu cimentaire portent essentiellement sur les verres MAVL de type CSD-B (cf. chapitre 5.1.8.2). La phénoménologie d'altération apparaît identique à celle observée en eau pure mais les résultats disponibles montrent un effet potentiellement défavorable d'un environnement cimentaire sur la vitesse d'altération initiale et la formation de la pellicule d'altération. Dans certains cas, une reprise d'altération a même été observée. Compte tenu de l'ensemble des éléments mentionnés ci-avant,

L'IRSN estime que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les résultats des développements et acquisitions de données pour l'établissement des modèles de relâchement des colis de déchets vitrifiés HA, en particulier ceux visant à :

- préciser l'influence des matériaux d'environnement sur la phénoménologie d'altération des verres, notamment pour ce qui concerne le passage d'un régime de vitesse initiale à un régime de vitesse résiduelle ;
- justifier l'élévation de 50°C à 70°C de la température cible au cœur du verre au moment de l'arrivée de l'eau à son contact ;
- améliorer la compréhension des phénomènes d'altération des verres par la vapeur d'eau et de l'impact de celle-ci sur l'altération ultérieure sous eau ;
- démontrer l'absence d'effet défavorable du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage en acier des alvéoles HA sur le comportement à long terme des déchets vitrifiés.

Ce point fait l'objet de l'engagement E17-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

### **5.1.7.3 Modèles de relâchement et paramètres associés**

L'Andra précise [91] que les modèles de relâchement retenus au stade du DOS sont applicables pour un milieu saturé où il est considéré la présence d'eau sous forme liquide pour l'ensemble des composants. Aussi, la phase d'altération par la vapeur d'eau n'est pas prise en compte et il est retenu une altération sous eau dès le départ. L'IRSN convient qu'il est préférable à ce stade de retenir des conditions saturées dès le début de l'altération, compte tenu du manque de connaissances quant à la phase d'altération du verre par la vapeur d'eau pour les différents colis de déchets vitrifiés (cf. chapitre 5.1.7.2). Néanmoins, l'IRSN considère, pour la même raison, qu'il est difficile d'apprécier le conservatisme de cette hypothèse en termes de vitesse d'altération. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que le caractère enveloppe de cette hypothèse sera étayé pour la DAC.

L'Andra présente trois modèles de relâchement en fonction du concept de stockage, du niveau de connaissances des déchets et de leur phénoménologie d'altération :

- un modèle de type labile correspondant à un relâchement instantané pour les familles de colis présentant une faible résistance à la lixiviation ou pour lesquelles les données disponibles (composition du verre, surface accessible à l'eau) ne permettent pas de paramétrer un modèle ;
- un modèle «  $V_0.S$  » fondé uniquement sur la vitesse initiale pour les familles de colis pour lesquelles l'atteinte d'une vitesse résiduelle n'a pas été observée ou pour lesquelles les données disponibles ne sont pas suffisantes ;

- un modèle «  $V_0 \rightarrow V_R$  » fondé sur l'atteinte d'une vitesse résiduelle pour les familles de colis pour lesquelles l'atteinte d'une vitesse résiduelle a été observée et pour lesquelles les données disponibles sont suffisantes.

L'Andra reprend pour la vitesse initiale  $V_0$  la formule empirique proposée dans le « Dossier 2005 » intégrant, par rapport à la vitesse initiale  $V_{0,T_0}$  mesurée expérimentalement une dépendance à la température et aux pH basiques :

$$V_0 = V_{0,T_0} \times e^{-\frac{E_a}{R}(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \times 10^{n \times \max\{pH-7;0\}}$$

avec  $E_a$  l'énergie d'activation,  $R$  la constante universelle des gaz parfaits et  $n$  la constante de dépendance au pH. Cette expression a été validée expérimentalement pour des pH compris entre 7 et 10. Sur la base d'essais de lixiviation conduits exclusivement sur des verres MAVL de type CSD-B (cf. chapitre 5.1.8.2), l'Andra étend ce domaine de validité à des pH proches de 14. L'IRSN estime que la transposabilité à l'ensemble des déchets vitrifiés n'est pas acquise compte tenu du fait que les processus d'altération des verres dépendent fortement de la composition du verre (cf. chapitre 5.1.7.2). **De plus, dans la perspective de la mise en place d'un matériau de remplissage cimento-bentonitique à l'extrados du chemisage de l'alvéole HA, l'IRSN considère que l'Andra devrait démontrer que l'impact de celui-ci sur les conditions d'altération de l'ensemble des verres est bien couvert par les modèles de relâchement.**

Une formule « simplifiée » de la vitesse initiale  $V_0$  est par ailleurs proposée pour une altération en milieu argileux. Seule la dépendance en température est conservée et un coefficient correcteur  $k_0$  traduit l'impact de l'eau de site par rapport à l'eau pure (ce coefficient vaut 1 lorsque la vitesse initiale a été mesurée en eau de site) :

$$V_0 = k_0 \times V_{0,T_0} \times e^{-\frac{E_a}{R}(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$$

Pour ce qui concerne la vitesse résiduelle  $V_R$  la formule tient compte, comme au stade du « Dossier 2005 », de la dépendance à la température et traduit par ailleurs l'impact de l'eau de site (notamment de l'effet de la concentration en magnésium) par rapport à l'eau pure au moyen du coefficient correcteur  $k_R$ <sup>39</sup>.

$$V_R = k_R \times V_{R,T_R} \times e^{-\frac{E_a}{R}(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R})}$$

Les formules de vitesses initiale et résiduelle sont applicables pour des températures comprises entre 25°C et, respectivement, 100°C et 50°C. S'agissant en particulier de la vitesse résiduelle, l'IRSN note que des essais de lixiviation conduits depuis 2005 ont permis d'étendre le domaine de validité de la formule empirique retenue à des températures inférieures à 50°C, ce qui est de nature à réduire les approximations faites dans le cadre du « Dossier 2005 ».

Dans le cas de l'application du modèle «  $V_0 \rightarrow V_R$  », l'Andra retient des hypothèses maximisant le temps de passage du régime de vitesse initiale au régime de vitesse résiduelle. En particulier, l'Andra ne prend pas en compte le silicium apporté par l'eau du site et assimile les produits de corrosion à de la sidérite (ce qui conduit à la masse maximale de produits de corrosion). L'Andra a par ailleurs indiqué, au cours de l'instruction, considérer qu'environ la moitié du fer libéré par la corrosion des composants métalliques migre dans le Callovo-Oxfordien et ne participe pas à la consommation du silicium. Enfin, afin de couvrir l'ensemble des incertitudes relatives au temps de passage

<sup>39</sup> Les coefficients correcteurs  $k_0$  et  $k_R$  s'appliquent à des régimes de vitesse pour lesquels les mécanismes réactionnels ne sont pas les mêmes. Aussi l'IRSN observe que ces coefficients n'ont pas forcément la même valeur.

du régime de vitesse initiale au régime de vitesse résiduelle, une étude de sensibilité est retenue par l'Andra en considérant uniquement un modèle  $V_0.S$ .

L'Andra retient le maintien d'une vitesse initiale tant qu'il reste du fer métal ou des produits de corrosion non saturés en silicium dans le milieu, ce qui conduit à un temps de passage d'environ 7 000 ou 30 000 ans selon la famille de colis considérée. L'IRSN remarque que les études relatives au temps de passage d'un régime de vitesse initial à un régime de vitesse résiduelle ont été réalisées au moyen de produits de corrosion simulés qui apparaissent plus réactifs que ceux rencontrés dans les conditions de stockage. De plus, l'Andra ne prend pas en compte la notion de disponibilité du fer et des produits de corrosion en champ proche du verre (ni un éventuel effet « protecteur » pour le verre du conteneur primaire en acier inoxydable vis-à-vis des espèces de l'environnement). Or le couplage chimie/transport a été mis en évidence par des études dites « intégrales » sur des systèmes poudre de verre/fer et/ou produits de corrosion/argilites. Enfin, la part de fer qui diffuse dans le Callovo-Oxfordien devra être précisée. **Compte tenu des incertitudes ci-avant, l'IRSN estime qu'il conviendrait que l'Andra affine l'estimation du temps de passage d'un régime de vitesse initiale à un régime de vitesse résiduelle à la lumière des résultats obtenus à l'issue des recherches qu'elle s'est engagée à mener pour la DAC** (cf. chapitre 5.1.7.2 précédent).

Pour ce qui concerne le choix des paramètres génériques des modèles, l'Andra indique que la température retenue est déduite de la décroissance thermique de la matrice vitreuse dans les conditions de stockage. Les surfaces accessibles à l'eau sont quant à elles définies comme le produit de la surface géométrique initiale du bloc de verre par le taux de fracturation utile. L'Andra considère constante au cours du temps la surface géométrique, ce qui conduit à maximiser la valeur de la surface accessible à l'eau. S'agissant des paramètres intrinsèques du verre, l'Andra privilégie en référence les valeurs de paramètres issues d'expérimentations ou de modélisations représentatives du domaine de composition de verre de la famille (notamment les valeurs issues de mesures représentatives des conditions de stockage). En sensibilité, l'Andra retient des valeurs de paramètres maximisant les cinétiques d'altération (valeurs maximales mesurées ou valeurs phénoménologiques majorées de l'écart-type ou de l'incertitude).

### 5.1.7.3.1 Choix des modèles et des paramètres en milieux argileux et cimentaire

L'Andra retient en milieu argileux [91] :

- le modèle labile pour la famille CEA-1190 (verres de laboratoire), du fait des incertitudes relatives à la caractérisation du verre ainsi que pour les sous-familles COG-810B (verres de vidange) et COG-820B (verres de calcinats) en raison de la faible résistance à la lixiviation de la fritte de verre employée ;
- le modèle «  $V_0.S$  » pour les familles COG-150 (verres UMo), CEA-200 (verres PIVER Sicral et Phénix) ainsi que pour les sous-familles CEA-1080-SAN-55-20-20 et CEA-1080-SPNM' correspondant à certains verres AVM produits hors assurance qualité ;
- le modèle «  $V_0 \rightarrow V_R$  » pour l'ensemble des familles appartenant au domaine de composition des verres R7T7, pour les familles à produire dont la composition théorique est très proche de celles des verres R7T7, pour les familles à produire pour lesquelles il est fait l'hypothèse que les performances du verre seront similaires à celles des verres du domaine de composition R7T7 ainsi que pour certaines familles ou sous-familles du domaine de composition des verres AVM.

Pour ce qui concerne le choix des paramètres associés aux modèles de relâchement ci-dessus, l'IRSN observe notamment que l'Andra retient, en référence et en sensibilité, la valeur de 5 pour les coefficients correcteurs  $k_0$  et

$k_R$  traduisant l'impact de l'eau de site par rapport à l'eau pure, respectivement sur les vitesses initiale et résiduelle d'altération. S'agissant de la vitesse initiale d'altération des verres du domaine de composition R7T7, les études montrent qu'elle peut rapidement diminuer en milieu faiblement renouvelé ou en l'absence de contact direct avec les matériaux de l'environnement. De plus, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que le conteneur primaire en acier inoxydable pouvait constituer une barrière vis-à-vis de l'environnement réactif. *In fine*, la vitesse initiale à considérer est notée  $V_{0, \text{eau de site}}/x$  avec  $V_{0, \text{eau de site}}$  la vitesse initiale mesurée en eau de site et milieu renouvelé, et  $x$  qui dépend du renouvellement et de l'effet du conteneur primaire. L'Andra retient, sur la base « d'un avis d'expert », une vitesse initiale de  $V_{0, \text{eau de site}}/10$  en référence et  $V_{0, \text{eau de site}}/3$  en sensibilité. Pour ce qui concerne la sous famille CEA-1080-SPNM', un taux de cristallisation important du verre ne peut être exclu et aucune donnée n'est à ce jour disponible quant à sa cinétique d'altération [90]. Aussi, l'Andra suppose constante la vitesse initiale d'altération (en ne prenant pas en compte l'effet de la décroissance thermique) et propose de retenir le taux de fracturation utile le plus élevé déterminé sur l'ensemble des verres étudiés. De plus, l'Andra retient pour cette sous famille une étude de sensibilité en considérant un modèle labile.

En milieu cimentaire, le modèle «  $V_0 \rightarrow V_R$  » est exclu du fait du risque de reprise d'altération. L'Andra retient le modèle «  $V_0.S$  » pour les familles ou sous-familles pour lesquelles un modèle «  $V_0.S$  » ou «  $V_0 \rightarrow V_R$  » était retenu en milieu argileux, à l'exception de la famille CEA-200 et la sous-famille CEA-1080-SPNM' pour lesquelles un relâchement labile est considéré du fait d'un manque de connaissance. Dans un tel environnement, la formule proposée dans le « Dossier 2005 » intégrant une dépendance aux pH basiques s'applique (cf. chapitre 5.1.7.2). Pour ce qui concerne le choix des paramètres associés aux modèles de relâchement, l'Andra distingue les milieux cimentaires dits « classique » et « bas pH ».

L'IRSN estime que le choix des modèles de relâchement des déchets vitrifiés HA en milieux argileux et cimentaire est cohérent avec l'état des connaissances actuelles. De manière générale, le choix des paramètres associés aux modèles de relâchement apparaît pertinent à ce stade. Néanmoins, s'agissant des coefficients correcteurs  $k_0$  et  $k_R$ , l'IRSN note, d'une part que le caractère majorant de la valeur de 5 retenue par l'Andra devrait être vérifié quelle que soit la famille de colis, d'autre part que cette valeur devrait être affinée au gré de nouvelles acquisitions expérimentales. Pour ce qui concerne la vitesse initiale pour les verres du domaine de composition R7T7, l'IRSN estime qu'il conviendrait que l'avis d'expert sur lequel s'appuie l'Andra soit étayé d'ici la DAC et que l'Andra explicite plus largement de quelle manière l'effet du conteneur primaire (effet « protecteur » vis-à-vis des espèces de l'environnement) est pris en compte dans les modèles et/ou les paramètres associés.

Par ailleurs, s'agissant des familles de colis à produire, l'IRSN considère qu'il conviendrait de confirmer que les propriétés des verres sont bien équivalentes à celles des verres du domaine de composition R7T7 déjà produits.

### 5.1.7.3.2 Durée du terme source

En scénario d'évolution normale (SEN) l'application en milieu argileux du modèle «  $V_0 \rightarrow V_R$  » en référence après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage (estimée à 4 300 ans), conduit à une durée du terme source d'environ 300 000 ans [40][118]. En situation « enveloppe » du SEN, l'Andra considère une perte d'étanchéité du conteneur de stockage à 500 ans et prend alors en compte l'éventuelle influence du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage sur l'altération du verre. Aucun modèle n'étant défini à ce stade en milieu cimento-bentonitique, l'Andra considère un milieu cimentaire. Dans ce cas de figure, l'application du modèle «  $V_0.S$  » aboutit à une durée du

terme source d'environ 20 000 ans. En scénario d'évolution altérée (SEA) ou *What-if* de défaillance des conteneurs de stockage HA [120], l'Andra retient une perte d'étanchéité des conteneurs de stockage dès la fermeture totale du stockage. Comme en situation « *enveloppe* » du SEN, un milieu cimentaire est considéré. En *What-if*, l'application du modèle «  $V_0.S$  » conduit à une durée du terme source d'environ 1 an que cela soit en référence ou en enveloppe.

L'IRSN considère que le choix des modèles de relâchement des déchets vitrifiés HA en SEN enveloppe, SEA ou *What-if* de défaillance des conteneurs de stockage peut se révéler fortement pénalisant du fait d'assimiler le milieu cimento-bentonitique à un milieu cimentaire. Aussi, en cas de mise en place d'un matériau de remplissage cimento-bentonitique à l'extrados du chemisage acier, l'IRSN considère qu'il conviendrait que l'Andra affine les modèles retenus sur la base des expérimentations qu'elle s'est engagée à mener pour la DAC (cf. chapitre 5.1.7.2 précédent).

Pour ce qui concerne la détermination de la durée du terme source, l'Andra a illustré en instruction la démarche de calcul pour une famille de colis pour laquelle un modèle «  $V_0 \rightarrow V_R$  » est applicable en milieu argileux, en situation de référence du SEN. L'IRSN estime qu'il conviendrait que cette démarche soit présentée dans le dossier de DAC.

### 5.1.8 COLIS DE DECHETS VITRIFIES MAVL

Tout comme les solutions HA issues du retraitement des combustibles usés (cf. chapitre 5.1.7), les effluents MAVL produits lors des opérations de rinçage de l'usine UP2-400 et d'assainissement de l'usine UP1, ainsi que divers effluents des sites CEA sont vitrifiés. Les différentes familles de colis de déchets vitrifiés MAVL se distinguent notamment par la nature des solutions conditionnées, les caractéristiques des verres produits ainsi que le type de conteneur primaire. Les colis primaires de déchets vitrifiés MAVL sont prévus d'être placés (à raison de 4 colis primaires) dans un conteneur de stockage en béton n'ayant pas de fonction de sûreté après fermeture du stockage puis stockés en alvéole MAVL.

#### 5.1.8.1 Comportement intrinsèque du verre

L'Andra indique que le comportement intrinsèque des verres MAVL ne diffère pas de celui des verres HA examiné au chapitre 5.1.7.1, ce dont convient l'IRSN.

#### 5.1.8.2 Phénoménologie d'altération des déchets vitrifiés MAVL

L'Andra indique que la phénoménologie d'altération des déchets vitrifiés MAVL est identique à celle des déchets vitrifiés HA décrite au chapitre 5.1.7.2 et établie sur la base des études conduites sur les verres HA de type R7T7. Comme indiqué alors, la transposabilité de cette phénoménologie d'altération à l'ensemble des déchets vitrifiés est appréciée par l'Andra au regard du niveau de connaissance des différents verres.

Le concept de stockage des colis de déchets vitrifiés MAVL, retenu en référence au stade du DOS, est la mise en conteneur de stockage en béton et le stockage en alvéole MAVL (cf. chapitre 3.4.1) avec un éventuel recours au béton dit « bas pH » afin d'offrir aux colis un environnement faiblement alcalin plus favorable à leur comportement à long terme. L'altération de la matrice vitreuse est considérée dès la fermeture du stockage.

Les études présentées sur l'altération des verres en milieu cimentaire portent essentiellement sur les verres MAVL de type CSD-B [89]. La phénoménologie d'altération apparaît identique à celle observée en eau pure mais les résultats disponibles montrent un effet notamment sur la vitesse d'altération initiale et la formation de la pellicule d'altération. Plus précisément, les études d'altération de verres CSD-B en eaux cimentaires et en présence de

matériaux cimentaires dits « classiques » montrent notamment que le calcium joue un rôle prépondérant : présent dans la solution il peut s'insérer dans la pellicule d'altération qui se forme à la surface du verre et contribuer à son caractère passivant ; constituant de la portlandite il peut participer à la formation de silicates de calcium hydratés (C-S-H) et contribuer au maintien d'une vitesse d'altération élevée en consommant le silicium libéré par le verre. Dans certains cas, une reprise d'altération liée à la formation de zéolithes a été observée. S'agissant de matériaux cimentaires « bas pH », les premières études semblent indiquer qu'ils n'ont pas d'effet significatif sur l'altération des verres CSD-B.

Les éléments susmentionnés conduisent l'Andra à proposer [89] un modèle d'altération des déchets vitrifiés en alvéole MAVL n'intégrant pas l'atteinte d'une vitesse résiduelle d'altération (maintien d'une vitesse initiale tout au long de l'altération), contrairement à celui présenté pour les déchets vitrifiés en alvéole HA (cf. Figure 67).

L'IRSN considère que les expérimentations d'altération des verres et en présence de matériaux cimentaires constituent une avancée importante par rapport au « Dossier 2005 ». Elles confirment les effets globalement négatifs d'un environnement cimentaire sur le comportement à long terme du verre et la possibilité, dans certains cas, d'une reprise d'altération. Comme précédemment indiqué dans l'avis de l'IRSN de 2014 sur les colis CSD-B [176], le retour d'expérience acquis sur des matériaux cimentaires et vitreux utilisés dans le domaine du génie civil et du nucléaire confirme leur forte réactivité lorsqu'ils sont en contact. **L'IRSN considère donc qu'un environnement cimentaire apparaît chimiquement peu compatible avec le stockage de verres et que la piste d'optimisation consistant en un stockage des colis de déchets vitrifiés MAVL en intercalaires des colis de déchets vitrifiés HA en alvéole de stockage HA présente indéniablement de meilleures garanties du point de vue du comportement à long terme.** Dans le cas où le choix d'un stockage en alvéole de stockage MAVL serait maintenu, l'IRSN estime que l'utilisation d'un matériau dit « bas pH » pourrait permettre de réduire la réactivité des verres au regard d'un matériau classique mais que les données disponibles sont encore trop peu nombreuses.

L'IRSN estime que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les études phénoménologiques d'altération des verres MAVL en milieux cimentaires classique et bas pH pour l'établissement des modèles de relâchement. Ce point fait l'objet de l'engagement E18-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

A ce sujet, l'IRSN rappelle l'engagement 2010 E16 [1] pris par l'Andra à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » d'évaluer la sûreté en phase d'exploitation et de post-fermeture de l'option de conception qui sera retenue pour les colis de déchets MAVL vitrifiés.

### **5.1.8.3 Modèles de relâchement et paramètres associés**

Les hypothèses retenues par l'Andra, sur les modèles de relâchement et sur les paramètres génériques associés, pour les déchets vitrifiés MAVL, ne diffèrent pas de celles présentées pour les déchets vitrifiés HA et examinées au chapitre 5.1.7.3.

### 5.1.8.3.1 Choix des modèles et des paramètres en milieux argileux et cimentaire

L'Andra retient en milieu argileux [91] :

- le modèle labile pour la sous-famille CEA-1120-Be (déchets vitrifiés issus des effluents de rinçage de l'usine UP1 contenant du béryllium), du fait de l'absence de connaissance sur les conséquences de l'incorporation de béryllium et d'une modification du procédé de vitrification pouvant influencer sur l'homogénéité du verre ;
- le modèle «  $V_0.S$  » pour les familles CEA-340 (verres Valduc) et COG-470 (CSD-B) ;
- le modèle «  $V_0 \rightarrow V_R$  » pour les sous-familles CEA-1120A et CEA-1120B (déchets vitrifiés issus des effluents de rinçage de l'usine UP1).

Pour ce qui concerne le choix des paramètres associés aux modèles de relâchement ci-dessus, l'IRSN observe notamment que pour les sous-familles CEA-1120A et CEA-1120B, l'absence de données conduit l'Andra à retenir les valeurs des paramètres proposés pour les sous-familles CEA-1070A et CEA-1070B (verres AVM).

En milieu cimentaire, le modèle «  $V_0 \rightarrow V_R$  » est exclu du fait du risque de reprise d'altération. L'Andra retient le modèle «  $V_0.S$  » pour les familles ou sous-familles pour lesquelles un modèle «  $V_0.S$  » ou «  $V_0 \rightarrow V_R$  » était retenu en milieu argileux. Dans un tel environnement, la formule proposée dans le « Dossier 2005 » intégrant une dépendance aux pH basiques s'applique. Pour ce qui concerne le choix des paramètres associés aux modèles de relâchement, l'Andra distingue, comme pour les déchets vitrifiés HA (cf. chapitre 5.1.7.3.1) les milieux cimentaires dits « classique » et « bas pH ».

L'IRSN estime que le choix des modèles de relâchement des déchets vitrifiés **MAVL** en milieux argileux et cimentaire est cohérent avec l'état des connaissances actuelles. De manière générale, le choix des paramètres associés aux modèles de relâchement apparaît pertinent à ce stade. Néanmoins, l'IRSN rappelle les remarques déjà formulées au chapitre 5.1.7.3.1 concernant les coefficients correcteurs  $k_0$  et  $k_R$  d'une part, et la prise en compte dans les modèles et/ou les paramètres associés de l'effet du conteneur primaire (effet « protecteur » vis-à-vis des espèces de l'environnement) d'autre part.

### 5.1.8.3.2 Durée du terme source

En **SEN**, l'application en milieu cimentaire du modèle «  $V_0.S$  » en référence dès la fermeture totale du stockage, conduit à une durée du terme source de quelques milliers d'années [40]. En situation « *enveloppe* » du **SEN**, l'application en milieu cimentaire du modèle «  $V_0.S$  » aboutit à une durée du terme source d'environ 20 ans. Aucun **SEA** ou *What-if* n'est retenu pour les déchets vitrifiés **MAVL**, ce qui n'appelle pas de remarque.

## 5.1.9 AUTRES COLIS DE DECHETS

Les colis de déchets **HA** classés dans cette rubrique correspondent aux déchets non vitrifiés de type sources scellées et déchets technologiques [91]:

- colis de déchets technologiques issus des ateliers de vitrification R7 de l'usine de La Hague (famille de colis COG-850) ;
- colis de capsules de titanate de strontium de l'établissement AREVA de La Hague (famille de colis COG-870) ;
- déchets issus des colonnes d'éluion d'ELAN IIB sur le site de La Hague (famille de colis COG-860) ;

- sources scellées usagées du **CEA** (famille de colis CEA-1500).

Le conditionnement de l'ensemble de ces colis n'est pas définitivement arrêté au stade du **DOS** (cf. chapitre 3.1.3 du présent rapport). L'Andra indique par ailleurs [91] que les études réalisées ne permettent pas d'affecter à ces colis des propriétés de confinement. Aussi, aucun modèle de relâchement n'est présenté dans le **DOS** et un relâchement labile est retenu dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage.

Les colis de déchets **MAVL** classés dans cette rubrique sont principalement des déchets technologiques [92] comme :

- des déchets solides d'exploitation courante des ateliers, d'opérations de maintenance ou de démantèlement ;
- des boues, des concentrats ou des effluents cimentés ;
- des enrobés bitumineux expérimentaux ou contenant des déchets technologiques ;
- des crayons sources primaires et secondaires des réacteurs à eau pressurisée ;
- des aiguilles de barres de commande des réacteurs à neutrons rapides ;
- des fines et des résines cimentées ;
- des déchets collectés par l'Andra (objets au radium, sources de détecteurs ioniques, sources scellées usagées, etc.).

Ces déchets, dont certains peuvent être bloqués au sein d'une matrice, correspondent à 57 familles de colis d'AREVA, du **CEA** et d'EDF. Pour ces familles, l'Andra précise [92] que les colis primaires ne contribuent pas, au stade de connaissance actuel à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage ». Il est donc considéré que toute l'activité est relâchée instantanément en présence d'eau. En particulier, 38 des 57 familles identifiées dans la rubrique « *Autres colis de déchets* » correspondent à des colis primaires contenant des déchets organiques en proportions variées et sont classées par l'Andra dans la catégorie physico-chimique (**MAVL3**) (cf. chapitre 3.4.1). La dégradation des déchets organiques, par radio-oxydation puis radiolyse et hydrolyse couplées, conduit à la formation d'une part de gaz (tel que le dihydrogène) dont l'accumulation peut présenter un risque d'inflammabilité, d'autre part de produits de dégradation hydrosolubles (PDH). Ces derniers sont des complexants potentiels des radionucléides pouvant ainsi, en conditions de stockage, augmenter leur solubilité et/ou modifier leur rétention par l'ouvrage ou l'argilite. Cet aspect est traité au chapitre 5.4.3.3 du présent rapport.

**Compte tenu du peu d'éléments disponibles à ce jour concernant, d'une part la connaissance des colis de déchets classés dans cette rubrique, d'autre part leur comportement à long terme, l'IRSN estime que le choix d'un relâchement labile est satisfaisant. S'agissant en particulier des familles de colis de déchets contenant des matières organiques, comme précédemment indiqué dans l'avis de l'IRSN de 2015 sur ce sujet dans le cadre du PNGMDR [177], l'inventaire des PDH formés s'avère incomplet à ce stade en raison de difficultés analytiques dans leur détermination. De plus, de nombreux mécanismes liés à la formation des complexes et à leur transfert au sein du stockage restent à étudier. L'IRSN estime donc que les études sur les déchets organiques devraient se poursuivre pour enrichir l'inventaire des PDH formés et caractériser leur impact, en conditions de stockage sur la mobilité des radionucléides.**

### 5.1.10 *DECHETS EN RESERVE*

Comme renseigné dans le chapitre 3.5, les colis de déchets en réserve au stade du **DOS** comprennent les déchets **FAVL** pour lesquels un stockage à faible profondeur est par ailleurs à l'étude (déchets de graphite [chemises] issus de la filière **UNGG**, résines échangeuses d'ions qui pourraient être utilisées pour le démantèlement sous eau des réacteurs **UNGG**, enrobés bitumineux entreposés à Marcoule et déchets particuliers de petits producteurs et du nucléaire diffus) ainsi que les déchets **HA** et **MAVL** qui seraient issus d'un réacteur réacteur **EPR** supplémentaire. Dans le cas où un traitement des déchets de graphite afin de faciliter leur stockage à faible profondeur serait retenu, les résidus obtenus au terme des opérations se substitueraient aux déchets de graphite.

L'Andra ne présente pas dans le **DOS** de modèles de relâchement des radionucléides et toxiques chimiques pour ces familles. L'Andra mentionne toutefois [48] que les déchets, ainsi que l'éventuelle matrice, peuvent contribuer à la fonction « *limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage* ». L'Andra indique que les familles de colis de déchets **FAVL** en réserve ont des caractéristiques proches de familles de colis **MAVL** faisant partie de l'inventaire **Cigéo**. En particulier, les enrobés bitumineux **FAVL** de Marcoule sont similaires aux colis de déchets bitumés **MAVL** dont le comportement à long terme est examiné au chapitre 5.1.4 relatif aux colis de déchets salins bitumés. Par ailleurs, les déchets en réserve issus du fonctionnement et du démantèlement d'un deuxième réacteur **EPR** correspondent à des familles de colis **HA** et **MAVL** existant dans l'inventaire **Cigéo** dont le comportement à long terme est examiné aux chapitres 5.1.7 (COG-200), 5.1.6 (COG-120 et EDF-080) et 5.1.9 (EDF-100).

Enfin, l'Andra souligne [48] que parmi les colis de déchets en réserve, certains contiennent des espèces chimiques susceptibles d'induire une perturbation saline (en raison du relâchement de nitrates ou sulfates) ou organique (du fait de la formation par dégradation des déchets organiques de produits de dégradation hydrosolubles, complexants potentiels des radionucléides et susceptibles d'augmenter leur solubilité et/ou de modifier leur rétention par l'ouvrage ou l'argilite). Ces aspects sont traités aux chapitres 5.4.3.3 et 5.4.3.2 du rapport relatifs à la perturbation organique et la perturbation saline.

### 5.1.11 *COMBUSTIBLES USES*

Le stockage direct de combustibles usés a été intégré au titre de l'adaptabilité de **Cigéo** selon deux possibles scénarios d'évolution de la stratégie de production électronucléaire française (cf. chapitre 3.6). Au stade du **DOS**, et comme indiqué au chapitre 3.6.1, deux options de stockage sont envisagées : conteneurs de stockage mono-assemblage avec transposition des principales options techniques retenues pour les déchets **HA**, ou conteneur de stockage mono-assemblage. Comme précisé au chapitre 5.1.1, il est considéré que le matériau constitutif du conteneur de stockage est de même nature que celui du conteneur de stockage de colis de déchets **HA** à savoir un acier non allié à bas carbone. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que les combustibles usés ne sont pas prévus dans le périmètre de la **DAC**. Néanmoins, l'Andra présente [47] l'altération des combustibles usés, les modèles de relâchement des radionucléides ainsi que des évaluations de terme source en <sup>129</sup>I pour différents types d'assemblages combustible, distinguant les **UOX**, **URE**, et **MOX**, irradiés en **REP** et en **RNR**. Par analogie avec ce qui est retenu pour le conteneur de stockage des déchets **HA**, deux hypothèses de durabilité du conteneur de stockage des combustibles usés sont considérées : 4300 ans et 500 ans après fermeture du stockage. La sensibilité du terme source issu du colis à différents paramètres des modèles de relâchement est également étudiée. Ces modèles et leurs paramètres, ainsi que les évaluations de terme source associées sont décrits et analysés ci-après. Pour

mémoire, ces modèles ont été initialement présentés dans le « Dossier 2005 », dans le document en référence [83]. Leurs paramètres ont fait l'objet d'évolutions en regard de résultats de divers programmes d'études. De nouveaux paramètres ont été présentés en 2009 [254] et analysés par l'IRSN dans son rapport [27], relatif à l'examen des études remises depuis 2009.

La description de l'altération des combustibles usés proposée par l'Andra [47] est déclinée en deux phases de relâchement [172] : une phase dite instantanée où une fraction des radionucléides présents dans les assemblages est considérée labile, et une phase différée, pour laquelle les radionucléides restant dans le combustible, ainsi que dans les matériaux de structure des assemblages combustibles, sont émis de façon congruente à leur dissolution.

### 5.1.11.1 Phase de relâchement instantané

L'Andra considère [47][172] qu'à l'instant  $t$  de perte d'étanchéité du conteneur de stockage, la quantité d'activité alors démobilisée correspond au déstockage intégral des radionucléides présents dans les volumes libres du crayon (jeu pastille-gaine, fissures des pastilles, porosités et joints de grains ouverts) ou des couches interne et externe oxydées de la gaine (lesquelles sont considérées instantanément dissoutes à l'instant  $t$ ). Les radionucléides considérés sont ceux habituellement dits « volatils », à savoir ceux qui ont une très faible solubilité dans la matrice combustible (et donc un coefficient de diffusion important) et ayant un temps de demi-vie significatifs :  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{129}\text{I}$  et  $^{135,137}\text{Cs}$ . L'activité instantanément relâchée à l'instant  $t$  de perte d'étanchéité du conteneur de stockage  $A_{rel}(t)$ , est le produit d'une fraction dite **IRF**( $t$ ) (*Instant Release Fraction*) par l'activité initialement contenue dans les assemblages combustible à l'instant  $t=0$  de leur sortie de réacteur,  $A_{ini}(t=0)$ . Cette fraction est la quantité relative (à l'instant  $t=0$ ) d'un radionucléide  $i$ , qui est considérée instantanément libérable à l'instant  $t$ , à laquelle une décroissance radioactive est appliquée entre  $t=0$  et le l'instant  $t$  considéré. Pour chaque radionucléide, la fraction **IRF**( $t$ ) est la somme de deux termes :

- le premier dit **IRF**( $t=0$ ) représente la fraction d'activité dans les volumes libres en sortie de réacteur ( $t=0$ ), à laquelle on affecte une décroissance radioactive sur l'intervalle  $t-(t=0)$ . Cette activité provient de la diffusion des radionucléides les plus mobiles dans le combustible pendant son irradiation et dans une moindre mesure de phénomènes de recul (désintégration radioactive) et d'éjection (collision sous flux neutronique). L'Andra indique que les taux de relâchement associés à ces radionucléides sont corrélés au taux de relâchement des gaz rares ;
- le second terme représente la quantité de radioéléments qui a rejoint par diffusion les volumes libres de la matrice combustible dans l'intervalle de temps  $t-(t=0)$ , avec considération de leur décroissance radioactive. La diffusion considérée est ici athermique (les températures en stockage ne sont pas favorables à la diffusion thermique des radionucléides), il s'agit de la diffusion accélérée par l'auto-irradiation alpha (dite D3AI), l'activité  $\alpha$  et les cascades de déplacement atomiques qu'elle génère induisant une diffusion globale sur le long terme.

L'équation générale pour chaque radionucléide  $i$  considéré, de période  $\lambda_i$ , de coefficient de diffusion athermique par auto-irradiation  $D_{3AI,i}$  s'écrit :

$$IRF(t) = IRF(t=0) \cdot e^{-\lambda_i t} + (1 - IRF(t=0)) \cdot F(D_{3AI,i}, \lambda_i, t)$$

avec  $F$  la fraction restante des radionucléides migrant vers les volumes libres jusqu'au temps  $t$ .

Concernant le premier terme  $IRF(t=0)$ , l'Andra a établi des corrélations pour chaque radionucléide d'intérêt entre le taux de relâchement instantané et le taux de relâchement des gaz rares, lui-même fonction du taux de combustion. Les valeurs de taux de relâchement instantanés participant au terme  $IRF(t=0)$  considérés en 2009 pour les radionucléides d'intérêt [254] sont présentées dans le Tableau 15 ci-après en valeurs moyennes et valeurs pénalisantes.

Combustibles UOX					Combustibles MOX				
TC	40	45	55	60	TC	40	45	55	60
FGR	0,3 (1)	0,3 (1,1)	2,4 (3,7)	3,4 (5,0)	FGR	2 (6)	3,2 (7,7)	5,6 (14,1)	6,8 (16,9)
<sup>14</sup> C	10	10	10	10	<sup>14</sup> C	30 (35)	30 (40)	30 (45)	30 (45)
<sup>36</sup> Cl	3	3,3	11	15	<sup>36</sup> Cl	26 (31)	30 (40)	37 (52)	40 (55)
<sup>79</sup> Se	0,3 (1)	0,3 (1)	2,4 (3,7)	3,4 (5)	<sup>79</sup> Se	22 (31)	23 (38)	25 (49)	27 (52)
<sup>90</sup> Sr	0,1 (0,3)	0,1 (0,3)	0,1 (2,4)	0,1 (3,4)	<sup>90</sup> Sr	20 (25)	20 (30)	20 (35)	20 (35)
<sup>99</sup> Tc	0,1 (0,3)	0,1 (0,3)	0,1 (2,4)	0,1 (3,4)	<sup>99</sup> Tc	20 (25)	20 (30)	20 (35)	20 (35)
<sup>107</sup> Pd	0,1 (0,3)	0,1 (0,3)	0,1 (2,4)	0,1 (3,4)	<sup>107</sup> Pd	20 (25)	20 (30)	20 (35)	20 (35)
<sup>126</sup> Sn	0,01 (0,3)	0,01 (0,3)	0,01 (2,4)	0,01 (3,4)	<sup>126</sup> Sn	20 (25)	20 (30)	20 (35)	20 (35)
<sup>129</sup> I	0,3 (1)	0,3 (1,1)	2,4 (3,7)	3,4 (5)	<sup>129</sup> I	22 (31)	23 (38)	25 (49)	27 (52)
<sup>135</sup> Cs	0,3 (1)	0,3 (1,1)	2,4 (3,7)	3,4 (5)	<sup>135</sup> Cs	22 (31)	23 (38)	25 (49)	27 (52)
<sup>137</sup> Cs	0,3 (1)	0,3 (1,1)	2,4 (3,7)	3,4 (5)	<sup>137</sup> Cs	22 (31)	23 (38)	25 (49)	27 (52)

Tableau 15 : Taux de relâchement (%) retenu pour les radionucléides contribuant à l' $IRF(t=0)$  - valeurs moyennes (valeurs pénalisantes)

Dans le cadre de la présente instruction, l'Andra présente [47] uniquement la valeur de taux de relâchement de l'<sup>129</sup>I actuellement considérée pour l' $IRF(t=0)$ , en fonction du taux de combustion et de la nature du combustible, pour des irradiations en REP (cf. Tableau 16 ci-après).

UOX2	UOX3	URE	UOX et URE	MOX	MOX	MOX	MOX
3,7 % <sup>235</sup> U	4,5 % <sup>235</sup> U	4,2 % <sup>235</sup> U	sous irradiés	5,3 % Pu	7,08 % Pu	8,65 % Pu	9,54 % Pu
45 GWj/tML	55 GWj/tML	45 GWj/tML	25 GWj/tML	48 GWj/tML	48 GWj/tML	48 GWj/tML	48 GWj/tML
0,3 (1,1)	2,4 (3,7)	0,3 (1,1)	0,17 (0,65)	23,9 (40,4)	23,9 (40,4)	23,9 (40,4)	23,9 (40,4)

Tableau 16 : Taux de relâchement (%) retenu pour l'<sup>129</sup>I contribuant à l' $IRF(t=0)$  - valeurs moyennes (valeurs pénalisantes)

Concernant le terme de diffusion accélérée par l'auto-irradiation alpha (D3AI), l'Andra indique [47] que des nouvelles estimations du coefficient de diffusion, confortées par des expériences d'irradiation sur des UOX, conduisent à un coefficient de diffusion athermique de trois ordres de grandeur plus faible que celui évalué en 2005. L'Andra considère ainsi que la diffusion des produits de fission vers les volumes libres du combustible peut ainsi être considérée comme négligeable, jusqu'à la perte de confinement du conteneur de stockage. En outre s'agissant de l'évolution en elle-même des volumes libres, l'Andra indique [47] qu'« une approche simplifiée et majorante développée par le CEA a permis de montrer que l'accumulation d'hélium produit par auto-irradiation  $\alpha$  n'avait pas d'incidence sur la microstructure des pastilles de combustible UOX irradié ayant des taux de combustion allant jusqu'à 75 GWj/tML. En effet, l'accumulation d'hélium conduit à des pressions de bulles intragranulaires dans la zone non restructurée et à une pression au sein des pores de la zone restructurée, qui n'atteignent pas la pression critique conduisant à la microfissuration du matériau. ». Aussi, le relâchement instantané est assimilé à ce stade par l'Andra au seul premier terme  $IRF(t=0)$  pour les combustibles de type UOX. L'Andra précise que la même démarche que celle développée pour les combustibles UOX est en cours pour les combustibles MOX.

L'IRSN relève que les nouvelles études présentées par l'Andra n'apportent pas de modification notable aux valeurs de taux de relâchement considérées pour les radionucléides participant au terme  $IRF(t=0)$  depuis la dernière analyse des modèles de relâchement [27]. L'IRSN observe que, pour les UOX, la première phase de relâchement caractérisée par le terme source  $IRF(t)$  se réduit au seul terme  $IRF(t=0).e^{-\lambda_i t}$  pour chaque radionucléide considéré. Du point de vue de l'IRSN, cette formulation restreinte peut convenir pour les UOX, à condition de spécifier un taux de combustion maximal pour la validité de cette hypothèse. En effet, un UOX fort taux, supérieur à 60 GWj/t, peut présenter des caractéristiques microstructurales équivalentes à un MOX taux moyen, en particulier la formation d'une zone restructurée en périphérie de pastille. De plus, la capture neutronique sur l' $U^{238}$  s'accroît avec le taux de combustion, amenant dans un UOX à fort taux de combustion des quantités d'émetteurs  $\alpha$  comparables à celles d'un MOX usé, et ainsi un nombre croissant de fissions issues du  $Pu^{239}$  (la capture neutronique sur l' $U^{238}$  conduit à la formation de  $Np^{239}$  qui décroît, avec une demi-vie de 2,4 jours, en  $Pu^{239}$ ). Un terme de relâchement induit par l'auto-irradiation  $\alpha$  devrait être ainsi considéré pour les UOX, à l'instar des MOX, au-delà d'un certain taux de combustion, qui est à spécifier. Pour les MOX, l'IRSN relevait en 2013 [27] « un manque de données expérimentales concernant la lixiviation et la ténacité des MOX » et estimait que « dans le cas où un stockage de combustibles usés venait à être décidé, des études expérimentales seraient nécessaires pour compléter ces connaissances ». Au regard du dossier transmis pour la présente instruction, cette remarque reste d'actualité.

### 5.1.11.2 Phase de relâchement différé

La seconde phase de relâchement des combustibles usés est considérée par l'Andra [47][172] comme progressive, s'étendant depuis l'instant de perte d'intégrité du conteneur de stockage aux temps ultérieurs, pendant lesquels la matrice combustible et les matériaux de structure se dissolvent, libérant leur radioactivité résiduelle de façon congruente à leur dissolution. Les principaux radionucléides concernés (en termes de contribution à l'activité résiduelle) dans cette phase de relâchement sont ceux déjà considérés pour la phase instantanée ainsi que ceux qui proviennent de la dissolution des matériaux de structure et du combustible. La détermination du terme source radiologique issu des combustibles usés lors de la phase de relâchement différé repose ainsi sur l'évaluation de la cinétique de dissolution des combustibles et des matériaux de structure activés des assemblages. Différentes expressions de la vitesse de dissolution de la matrice sont considérées par l'Andra, sous l'angle de plusieurs modèles phénoménologiques qui se recouvrent dans le temps :

- la première phase est purement chimique et correspond à la prise en compte d'une solubilisation instantanée du combustible dès le contact avec l'eau, selon la limite de solubilité pour l'eau du site. Pour ce modèle la solubilité de l'uranium est fixée à  $10^{-6}$  mol/L pour les UOX comme pour les MOX ;
- le critère de solubilité précédent étant fixé, un modèle dit radiolytique est considéré, pour lequel la vitesse de dissolution du combustible dépend de son activité alpha. Pour les calculs de terme source, ce modèle est appliqué sur les UOX en tenant compte de leurs spécificités (taux de combustion, enrichissement en  $^{235}U$  initial). Pour les MOX le modèle est appliqué à un MOX enveloppe au taux de combustion de 60 GWj/tML ;
- pour tenir compte des modifications chimiques de l'eau du site en contact avec les combustibles usés en considérant la variation de sa composition au fur et à mesure de la dissolution du combustible, un modèle semi-empirique dit électrochimique est considéré. Pour les calculs de terme source, ce modèle est appliqué aux UOX et aux MOX en considérant un taux de combustion enveloppe de 60 GWj/tML.

L'Andra indique par ailleurs que ces modèles d'évaluation de la vitesse de dissolution des combustibles usés sont sensibles en première influence à la surface spécifique du combustible accessible à l'eau. En valeur de référence, la surface spécifique des **UOX** et **MOX** est prise égale à 20 cm<sup>2</sup>/g. En valeurs pénalisantes, une surface spécifique de 71 cm<sup>2</sup>/g est considérée pour les **UOX** (résultats du programme de recherche européen MICADO<sup>40</sup>) et de 900 cm<sup>2</sup>/g pour les **MOX**. Cette dernière valeur correspond au cas d'un combustible entièrement réduit en poudre avec des grains de 8 µm de diamètre, ceci afin de couvrir les incertitudes portant sur l'évolution microstructurale des **MOX** à long terme.

Concernant le relâchement des radionucléides issus des matériaux de structure (alliage de zirconium, aciers inoxydables et alliages de nickel), l'Andra indique [47] qu'un modèle de corrosion généralisée, ne prenant pas en compte l'effet de la couche d'oxyde, est retenu. A cet égard, l'examen du comportement à long terme des déchets métalliques par l'IRSN est présenté au chapitre 5.1.6.

L'Andra présente également [47] la mise en œuvre des différents modèles de dissolution du combustible en comparant les résultats de terme source en <sup>129</sup>I associés à ces modèles (cf. Figure 68 ci-après) appliqués sur un ensemble de combustibles **UOX**, **URE** et **MOX**. L'Andra indique sur ce point que le modèle de dissolution électrochimique, qui est encore en développement, donne des valeurs de terme source négatives et a donc été substitué par un modèle basé sur la solubilité de l'uranium, dont la fraction de matrice altérée est équivalente à 2.10<sup>-9</sup> an<sup>-1</sup>.

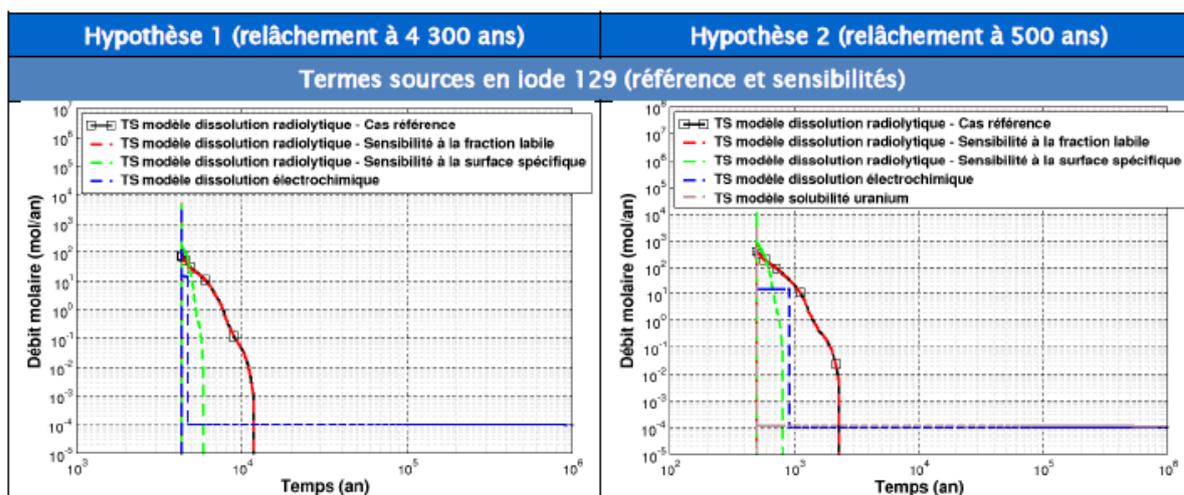


Figure 68 : Terme source total issu des colis de stockage de combustibles usés et sensibilité aux paramètres utilisés dans les modèles de relâchement instantané (IRF) et différé.

L'IRSN observe que l'Andra n'a pas apporté de modification aux différents modèles de dissolution du combustible et des matériaux de structure depuis l'examen conduit en 2013 [27]. L'IRSN relève de la comparaison du terme source en <sup>129</sup>I, suivant les différents modèles, que le modèle de dissolution radiolytique apporte un terme source prépondérant, au stade actuel des études.

<sup>40</sup> Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in nuclear repository - Projet européen du 6<sup>ème</sup> PCRD

L'IRSN note que la valeur de référence de la surface spécifique des **MOX** est identique à celle des **UOX** (20 cm<sup>2</sup>/g) alors qu'en théorie cette valeur devrait être plus élevée pour les **MOX** (présence de RIM<sup>41</sup> en périphérie de pastille). En revanche la valeur pénalisante de la surface spécifique concernant les **MOX** (900 cm<sup>2</sup>/g) correspond à un état où le combustible serait réduit en une poudre de granulométrie fixée équivalente à des grains de 8 µm, ce qui apparaît largement conservatif.

L'IRSN observe, au stade actuel des études, que les modèles de relâchement différé issus des combustibles usés, tant pour les **UOX** que les **MOX**, ne sont pas totalement fiabilisés et nécessitent encore certains développements qui apparaissent nécessaires, à l'échéance de la **DAC**, dans le cas où le stockage direct de combustibles usés serait retenu.

En outre, à l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 », l'IRSN notait en particulier que des incertitudes sur l'inventaire du <sup>14</sup>C et du <sup>36</sup>Cl, ainsi que sur la mobilité du <sup>36</sup>Cl demeuraient. Ces incertitudes avaient conduit l'Andra à réévaluer la valeur de l'**IRF** du <sup>36</sup>Cl. L'IRSN considérait alors, bien que la performance globale du stockage soit peu sensible à l'**IRF**, que l'Andra devrait présenter une évaluation d'impact du stockage prenant en compte la modification de la valeur d'**IRF** du <sup>36</sup>Cl en support de la **DAC**. Ce point avait fait l'objet de l'engagement 2013-E-2.1 de l'Andra [27], qui n'est pas soldé au stade du **DOS**.

## 5.2 EVOLUTION DES ACIERS

Les aciers sont retenus par l'Andra au stade du **DOS** [40] principalement pour deux composants du concept de référence de l'alvéole de stockage de colis de déchets **HA**, le conteneur de stockage et le chemisage (cf. description aux chapitres 2.3.1 et 2.2.3.2 respectivement), auxquels sont associées les fonctions suivantes :

- pour le conteneur de stockage, une étanchéité à l'eau tant que la température à cœur des verres est supérieure à 50°C pour les colis de déchets **HAO** et à 70°C pour les colis de déchets **HA1/HA2** soit, d'après l'Andra, une durée inférieure à 500 ans après la fermeture du stockage ;
- pour le chemisage, une stabilité mécanique de l'alvéole pendant une durée d'au moins 500 ans.

L'Andra indique [55] que l'alvéole **HA** sera conçue et exploitée (cf. chapitre 2.2.3.2) de façon à :

- minimiser les vitesses de corrosion généralisée et empêcher une corrosion localisée pendant la phase d'exploitation ;
- maintenir aussi longtemps que possible un fonctionnement mécanique du chemisage dans le domaine élastique.

Pour répondre à ces exigences, l'Andra retient [39] [40] l'utilisation d'aciers à basse teneur en carbone :

- d'une épaisseur de 53 à 65 mm pour le corps du conteneur de stockage ; l'Andra évalue la perte d'étanchéité à l'eau de ce conteneur à 4 300 ans pour le scénario d'évolution normale de référence, en tenant compte d'une vitesse de corrosion moyenne de 10 µm/an (épaisseur consommable par

---

<sup>41</sup> Zone restructurée (formation de grains plus petits qu'à l'origine) de l'ordre de 10 µm en périphérie de la pastille de combustible, où la densité de fission est plus importante. Ce phénomène est observable pour les **UOX** à fort taux de combustion ainsi que pour les **MOX**, quel que soit le taux de combustion. Cette zone est aussi appelée HBS (High burnup structure).

corrosion de 43 mm) et d'une épaisseur résiduelle minimale de 10 mm nécessaire à l'étanchéité ; en situation « enveloppe », l'Andra retient une durée d'étanchéité « conventionnelle » de 500 ans ;

- d'une épaisseur d'au moins 25 mm pour le chemisage afin d'assurer la tenue mécanique de ce composant pendant au moins 500 ans pendant lesquels il sera soumis à la corrosion.

L'examen réalisé par l'IRSN porte tout d'abord sur les phénomènes de corrosion des aciers puis sur le pré-dimensionnement retenu par l'Andra pour ces deux composants.

### 5.2.1 CORROSION DES ACIERS

L'Andra identifie [40], dans son analyse des processus de corrosion des aciers constituant le conteneur de stockage HA et/ou le chemisage de l'alvéole, la corrosion généralisée, la corrosion localisée, la corrosion sous contrainte<sup>42</sup>, la corrosion caverneuse<sup>43</sup>, la corrosion radiolytique<sup>44</sup> ainsi que le couplage galvanique<sup>45</sup>. Elle distingue [40] une première phase de conditions d'environnement hydrique et chimique transitoires puis une seconde phase à moyen et long terme où des conditions d'environnement saturées et réductrices sont imposées par l'argilite du Callovo-Oxfordien.

L'Andra retient [40], en vue de limiter les phénomènes de corrosion, un acier forgé à haute ductilité type P285NH pour le conteneur de stockage et un acier de type industrie pétrolière (API 5L X65 MS PSL 2 SAWL) pour le chemisage, qui possèdent notamment une microstructure fine et homogène, une ductilité élevée, avec des teneurs en impuretés réduites au minimum afin d'obtenir les meilleures propriétés inclusionnaires. Le fond et le couvercle des conteneurs sont soudés sur la virole par faisceaux d'électrons sous vide afin de limiter l'étendue de la zone affectée thermiquement ; un détensionnement thermique des soudures est par ailleurs prévu pour atténuer les contraintes résiduelles de soudage. Le procédé de fabrication du chemisage par thermo-laminage vise à minimiser les risques de corrosion localisée et de fragilisation par l'hydrogène (microstructure dite de ferrite aciculaire). La mise en place de patins en céramique permet, selon l'Andra, de prévenir le risque de corrosion caverneuse au contact conteneur - chemisage.

En outre, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'afin de limiter les échanges d'air entre l'alvéole et la galerie d'accès pendant la période d'exploitation et donc la durée du transitoire oxydant et son impact sur la corrosion dans les alvéoles HA, une bride étanche sera mise en place en entrée d'alvéole ainsi qu'un matériau de remplissage à l'extrados du chemisage, de type ciment-bentonitique avec un  $\text{pH} \leq 11$  ; ce dernier a également pour fonction de neutraliser la perturbation acide transitoire induite par l'oxydation de la pyrite en paroi de l'argilite lors du creusement de l'alvéole. Sur cette base, l'Andra considère que la corrosion généralisée en milieu anoxique est le phénomène prépondérant [40] pour le conteneur de stockage HA et le chemisage des alvéoles, et retient une vitesse moyenne de 10  $\mu\text{m}/\text{an}$  déduite du bilan de ses essais de corrosion.

L'examen par l'IRSN des phénomènes de corrosion du conteneur de stockage et du chemisage des alvéoles HA au regard des conditions d'environnement attendues en alvéole conduit aux remarques suivantes.

---

<sup>42</sup> La corrosion sous contrainte apparaît sous l'action conjuguée d'une contrainte mécanique de traction et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau.

<sup>43</sup> La corrosion caverneuse apparaît dans les interstices où du liquide stagne.

<sup>44</sup> Le rayonnement des déchets HA peut entraîner, par radiolyse, la production d'espèces oxydantes ou d'espèces chimiques modifiant localement le pH du milieu qui contribuent à l'augmentation des cinétiques de corrosion généralisée et favorisent l'occurrence de phénomènes de corrosion localisée.

<sup>45</sup> Le couplage galvanique apparaît lorsque deux matériaux conducteurs différents sont mis en contact.

S'agissant de la perturbation oxydante et de son impact sur la corrosion du conteneur de stockage et du chemisage, le bilan réalisé par l'Andra sur ses essais de corrosion dans des milieux non alcalins [94] montre qu'à la différence de ceux menés en surface et dans l'argile compacte où une couche protectrice efficace se forme en l'espace de 2 à 6 mois, certains essais menés au Laboratoire souterrain ont mis en évidence une phase transitoire acide responsable de vitesses de corrosion très élevées, de l'ordre de 0,2 mm/an. L'Andra attribue ce transitoire acide à l'oxydation des pyrites dans les argilites en paroi lors du creusement, qui conduit à la formation d' $H_2SO_4$  et de  $CO_2$  et acidifie ainsi l'eau porale du Callovo-Oxfordien : le métal ayant subi ce transitoire peut alors se recouvrir d'une couche de produits de corrosion qui maintient des vitesses de corrosion similaires à celles observées en milieu acide, et ce même après la fin du transitoire acide. L'IRSN estime que ce transitoire acide n'est pas limité aux effets du creusement mais peut perdurer si des dispositions particulières ne sont pas prises. En effet, s'agissant de la diffusion de l'oxygène, l'IRSN a mené des essais *in situ* dans son Laboratoire souterrain de Tournemire (essais OXITRAN) [247] qui montrent que l'oxygène n'est pas massivement consommé par l'oxydation des pyrites en tête de forage (8 m) et que de l'oxygène diffuse en phase gazeuse tout au long de la zone endommagée et désaturée autour du forage. Aussi l'IRSN estime, au vu de l'ampleur (intensité et étendue) possible de ce type de corrosion, qu'il est nécessaire de limiter la diffusion de l'oxygène au niveau des alvéoles HA et estime que les dispositions retenues par l'Andra (bride et matériau de remplissage à l'extrados du chemisage) sont, sur leurs principes, de nature à limiter la perturbation oxydante et son impact sur la corrosion du conteneur de stockage et du chemisage pendant la phase d'exploitation. Néanmoins, l'IRSN s'interroge sur les conséquences sur les phénomènes de corrosion d'une injection non uniforme de ce matériau de remplissage sur toute la longueur d'un alvéole HA. A cet égard, l'Andra indique [40] que des tests de démonstration technologique menés à ce stade au Laboratoire souterrain ont montré une homogénéité globale du matériau de remplissage avec toutefois quelques contacts directs entre le chemisage et la roche hôte observés localement. En outre, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que « *le chemisage pourra avoir tendance à flotter pendant l'injection du matériau de remplissage* » mettant ainsi en contact la partie supérieure du chemisage avec la roche hôte et, lors de la réunion préparatoire, que ce phénomène n'avait pas eu lieu lors des tests réalisés jusque-là. Ces contacts directs entre le chemisage et la roche hôte pourraient donc, selon l'IRSN, conduire à ce que tout ou partie du chemisage ne soit plus protégé du transitoire acide pendant la durée d'exploitation (i.e. tant que les galeries d'accès seront ventilées). **Aussi l'IRSN considère qu'à ce stade les risques de corrosion accélérée ne sont pas écartés.** Néanmoins, l'Andra prévoit un programme d'études (cf. *infra*) qui contient des essais complémentaires dont certains devraient permettre, sur leur principe, de mieux appréhender les conditions d'environnement résultant de la mise en place du matériau de remplissage. Ce point est repris ci-après concernant la vitesse de corrosion généralisée moyenne de 10  $\mu\text{m}/\text{an}$  retenue par l'Andra.

S'agissant de l'impact des bactéries sur les phénomènes de corrosion, l'Andra identifie [116] quatre types de processus de biocorrosion que sont (i) les bactéries sulfato-réductrices (BSR) qui peuvent augmenter la concentration en sulfures par catalyse de la réduction des sulfates, et baisser le pH, ce qui peut augmenter la vitesse de corrosion et la fréquence de piqûres, (ii) les BSR autotrophes qui peuvent provoquer une baisse de la concentration en dihydrogène, oxydé en eau et provoquer une augmentation de la vitesse de corrosion, (iii) le développement de biofilms et la présence de polymères extracellulaires excrétés par les bactéries qui peuvent avoir un impact (positif ou négatif) sur la couche de passivation et (iv) les bactéries qui peuvent consommer ou accélérer le transport des électrons le long du métal et ainsi favoriser la corrosion. Néanmoins, l'Andra indique [116] que dans un premier temps l'activité microbienne reste limitée à l'extrados et l'intrados du chemisage en acier puis « *la zone*

*endommagée se cicatrise hydrauliquement avec l'arrivée d'eau, n'autorisant plus un développement microbien significatif ».*

L'IRSN considère qu'outre les phénomènes de biocorrosion mentionnés par l'Andra, la présence de bactéries ferri-oxydantes (IOB) (Ashassi-Sorkhabi et al., 2012 [224]) ou de bactéries ferri-réductrices (IRB) (destruction du film de passivation ; Videla et al., 1996 [225] ; Schütz et al., 2014 [226]) peut également impacter la corrosion des aciers. Si l'IRSN convient que, lorsque la zone endommagée de l'argilite sera cicatrisée, le développement de bactéries y sera limité, les incertitudes actuelles sur les hétérogénéités potentielles dans la zone à l'extrados du chemisage (chemisage / matériau de remplissage / ZFC ; cf. *supra*) et sur les conditions hydriques (effets thermiques, désaturation par l'hydrogène... ; cf. chapitre 5.4) et chimiques (dissolution de matières organiques du Callovo-Oxfordien sous panache alcalin, cf. chapitre 5.4.3.1) ne permettent pas d'estimer à ce stade l'ampleur d'un développement microbien. En outre, l'intérieur de l'alvéole HA présente des vides technologiques et un écoulement d'eau pourrait prendre place en partie basse du chemisage, ce qui est favorable à un développement de bactéries. La gorge de manutention des colis, dans laquelle de l'eau peut stagner comme mentionné ci-dessous, pourrait également constituer un contexte particulier favorable à un tel développement. **Aussi, l'IRSN considère qu'une activité microbienne significative ne peut être écartée à ce stade, que ce soit à l'extrados du chemisage ou dans l'alvéole.**

Il convient en outre de souligner que, d'une part les incertitudes relatives à la durée de resaturation des alvéoles et leurs effets sur la dégradation des colis de stockage ont été identifiées par la revue du groupe d'experts réunis par l'AIEA réalisée à l'automne 2016 [8] comme faisant partie des sujets sur lesquels l'Andra devait améliorer ses connaissances, d'autre part que les conséquences potentielles d'une activité microbienne font l'objet d'une recommandation dans cette même revue (« *L'Andra doit inclure, dans son rapport de sûreté et sa démonstration de sûreté, l'activité microbienne présente au niveau de l'interface entre le chemisage et le matériau de remblai, étayé, si nécessaire, par la recherche sur cette activité* »).

Enfin, pour ce qui concerne **l'impact de l'irradiation** sur les vitesses de corrosion, l'Andra indique [40] qu'en l'état des connaissances en conditions d'environnement argileux (i) aucun effet de la radiolyse de l'eau n'est observé sur la corrosion pour des débits de dose inférieurs à 1 Gy/h et (ii) il y a peu d'influence de la radiolyse sur la corrosion pour des débits de doses jusqu'à 20 Gy/h, cette influence étant par ailleurs fortement atténuée en l'absence d'oxygène. L'épaisseur du conteneur de stockage retenue à ce stade permet, selon l'Andra, de limiter le débit de dose à 10 Gy/h « *au pseudo contact (5 centimètres)* ». A cet égard, l'IRSN considère, sur la base des expérimentations qu'il a menées (coupons de fer immergés en solution aqueuse soumis à une irradiation gamma), que les phénomènes de corrosion radiolytique sont très complexes, en particulier de par leur forte dépendance aux conditions d'environnement (variété des produits formés selon la composition chimique du milieu initial par exemple). Aussi, la mise en place du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage pourrait modifier l'évaluation actuelle de l'importance de ces phénomènes vis-à-vis de la corrosion des aciers. **Ainsi, l'IRSN considère que des incertitudes persistent sur l'influence de l'irradiation sur les vitesses de corrosion des composants en acier.**

L'IRSN relève que l'Andra a mis en place un **programme d'études** visant à confirmer les conditions d'environnement au niveau et dans les alvéoles HA ainsi que les mécanismes de corrosion dont les premiers éléments seront disponibles pour le dépôt de la DAC. En particulier, l'IRSN note que l'Andra a prévu un ensemble d'essais en prenant en considération différents paramètres d'évolution de l'alvéole ainsi que l'impact du matériau de remplissage, des

essais de sensibilité à la corrosion localisée par piqûres et corrosion caverneuse, et des essais de corrosion sous contrainte et de fragilisation par l'hydrogène en présence du matériau de remplissage sur les différentes zones représentatives du chemisage et du conteneur (corps du composant, soudures...) ou encore des essais de corrosion en atmosphère humide avec et sans irradiation. En outre, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'afin de conforter ses options de conception (notamment le matériau de remplissage et les nuances d'acier), deux expérimentations ont été mises en place au Laboratoire souterrain en 2015 (MCO Phase 2) et 2016 (MCO Phase 3) afin de suivre, par des techniques électrochimiques, la corrosion des aciers du chemisage et du conteneur en température (80°C) au contact de matériau de remplissage cimentaire et dans l'eau de resaturation du Callovo-Oxfordien, influencée par ce matériau cimentaire. Enfin l'Andra prévoit [40] des tests supplémentaires d'injection du matériau de remplissage au Laboratoire souterrain. **L'IRSN considère que ce programme couvre un large domaine de phénomènes de corrosion et devrait, sur son principe, permettre de réduire les incertitudes actuelles quant à la prédominance du phénomène de corrosion généralisée en milieu anoxique.** Toutefois, l'IRSN constate que l'Andra ne mentionne pas explicitement d'investigations relatives aux phénomènes de biocorrosion. Compte tenu de l'effet drastique que peut induire le développement bactérien sur la corrosion des aciers,

**L'IRSN considère que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les travaux de son programme de R&D sur la corrosion des aciers, relatifs aux effets d'une activité bactérienne au regard des conditions d'environnement attendues au niveau des alvéoles HA, afin de vérifier que l'activité des bactéries ne remet pas en cause les performances du chemisage et des conteneurs de stockage HA.** Ce point fait l'objet de l'engagement E19-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

S'agissant de la prépondérance du phénomène de corrosion généralisée considérée par l'Andra, l'IRSN convient que l'Andra a retenu des types de nuance d'acier et une microstructure de ces aciers homogène favorables à la limitation des phénomènes de corrosion et note que des essais de corrosion dans des milieux représentatifs de l'évolution des alvéoles de stockage sont en cours (cf. *supra*). Néanmoins, l'IRSN estime que la démonstration des phénomènes de corrosion localisée (corrosion sous contrainte, piqûration et corrosion sous dépôt) doit aussi intégrer les dispositions technologiques prises lors de la fabrication de l'objet, notamment vis à vis de l'homogénéité de la microstructure du matériau. A ce stade, seuls les grands principes et de premiers éléments de caractérisation ont été présentés par l'Andra.

**L'IRSN considère que l'Andra devra préciser, dans le dossier de DAC, les dispositions technologiques retenues pour la fabrication du chemisage et du conteneur de stockage de colis de déchets HA, ainsi que pour la fermeture de ce dernier, permettant de limiter les risques de corrosion localisée (corrosion sous contrainte, piqûration et corrosion sous dépôt).** L'Andra devra présenter à cette échéance les éléments de connaissance, y compris les résultats des programmes d'essais sur lesquels se fondent ces choix. Ce point fait l'objet de l'engagement E16-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Par ailleurs, l'IRSN observe que la gorge de préhension du colis de stockage HA présente une forme en creux favorable à une accumulation potentielle d'eau (cf. Figure 17), créant un environnement particulier propice à la corrosion. Une évolution du concept permettant l'évacuation de l'éventuelle eau stagnant dans la gorge de préhension permettrait de s'affranchir d'un tel risque. L'Andra a toutefois indiqué au cours de l'instruction qu'« *il n'est pas envisagé d'évolution du concept actuel* ». Il s'agira donc pour l'Andra de montrer que l'eau stagnant dans la gorge de préhension, dans un contexte de température importante et sous irradiation, ne conduit pas à

des phénomènes de corrosion locaux pouvant remettre en cause les objectifs précités de maintien de l'intégrité des conteneurs.

S'agissant de la vitesse de corrosion moyenne de 10 µm/an retenue par l'Andra pour le pré-dimensionnement du chemisage et du conteneur de stockage, l'IRSN constate que l'Andra a réévalué la vitesse de corrosion de l'ordre du micromètre par an retenue au stade du « Dossier 2005 », pour tenir compte des résultats récents de son programme expérimental sur la corrosion généralisée en milieu anoxique non alcalin. Cette vitesse moyenne apparaît raisonnable en l'état des connaissances dans l'hypothèse où les performances des dispositions techniques retenues par l'Andra pour maîtriser les conditions d'environnement et ainsi limiter l'occurrence de corrosions accélérées et/ou localisées (bride en entrée d'alvéole, matériau de remplissage à l'extrados du chemisage) des composants métalliques de l'alvéole soient confirmées. En outre, les incertitudes relevées ci-avant, relatives notamment aux conditions d'environnement transitoires pouvant prendre place pendant l'exploitation et à l'hypothèse d'une corrosion généralisée en milieu anoxique prépondérante restent encore à ce stade importantes. **A cet égard, outre son programme d'études mentionné ci-avant, l'IRSN considère que l'Andra devra tirer profit des essais en vraie grandeur d'alvéole HA qui font l'objet de la conclusion de l'IRSN au chapitre 5.4.1.**

Enfin, pour ce qui concerne la surveillance de la corrosion dans les alvéoles HA pendant l'exploitation, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que cette surveillance serait en lien avec les fonctions attribuées aux conteneurs de stockage pour la sûreté après fermeture (étanchéité sur une durée pluri millénaire), sans toutefois que les modalités d'une telle surveillance soient précisées à ce stade, au-delà d'un système de piquages prévu en tête d'alvéole. L'IRSN souligne que des exigences sont également retenues pour le chemisage (maintien mécanique sur une durée d'au moins 500 ans) et qu'une surveillance de leur maintien mécanique devra également être mise en place. Aussi, en complément de la conclusion de l'IRSN présentée au chapitre 7.2.4, relative aux dispositions techniques de surveillance des alvéoles HA vis-à-vis de la récupérabilité des colis,

**l'IRSN estime que l'Andra devra justifier, dans le dossier de DAC, la faisabilité technique des dispositions de surveillance de la corrosion des conteneurs de stockage et du chemisage des alvéoles HA en appui à la démonstration du respect des exigences qui leur sont assignées. Ce point fait l'objet de l'engagement E20-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.**

### 5.2.2 PRE-DIMENSIONNEMENT DU CONTENEUR DE STOCKAGE

Comme indiqué ci-avant, l'Andra retient au stade du DOS une épaisseur minimale d'acier de 53 mm pour le conteneur et évalue, sur la base d'une vitesse moyenne de corrosion de 10 µm/an, que celui-ci restera étanche à l'eau sur une durée de 4 300 ans en situation de référence du scénario d'évolution normale. Concernant la situation enveloppe de ce scénario, l'Andra retient « *de manière conventionnelle* » une durée d'étanchéité du conteneur de 500 ans, ce qui correspond à la durée pour laquelle le chemisage sera dimensionné.

L'IRSN rappelle que dans le « Dossier 2005 », l'Andra retenait déjà une épaisseur similaire (55 mm) mais souligne que le conteneur était alors dimensionné pour résister à la contrainte géostatique maximale (poids des terres de 12 MPa) ce qui mobilisait 28 mm d'acier, le reste (27 mm) étant dévolu à la corrosion. L'IRSN ne remettait alors pas en cause l'ordre de grandeur de ce pré-dimensionnement mais concluait que le dimensionnement des composants métalliques ne pouvait raisonnablement pas être figé au stade du « Dossier 2005 » et qu'il conviendrait que l'Andra vérifie, sur la base de nouvelles investigations, la pertinence des épaisseurs retenues. Ceci fait l'objet de la

demande de l'ASN 2014 D13 relative au dimensionnement des composants métalliques de l'alvéole HA formulée à l'issue de l'instruction du « Dossier 2005 » et réitérée à l'issue de l'instruction du dossier « Ouvrages de fermeture ».

L'IRSN observe qu'au stade du **DOS**, l'Andra ne dimensionne plus le conteneur à la contrainte géostatique mais considère, en situation de référence, qu'une épaisseur résiduelle d'acier de 10 mm est suffisante pour assurer la fonction d'étanchéité à l'eau. L'IRSN convient qu'une épaisseur de cet ordre de grandeur pourrait (pour un acier de qualité adéquate) permettre de résister à la seule action d'une pression d'eau de l'ordre de 5 MPa, valeur hydrostatique attendue à 500 m de profondeur, mais souligne qu'au-delà des 500 ans pour lesquels sera dimensionné le chemisage, le chargement mécanique appliqué par la roche sur le conteneur sera beaucoup plus complexe. A cet égard, l'IRSN relève que, selon l'Andra [39], le corps du conteneur de stockage ne resterait dans son domaine élastique que pendant une centaine à quelques centaines d'années après sa mise en contact avec le chemisage, ce qui devrait se produire après les 500 ans pour lesquels il est dimensionné. Aussi, l'IRSN estime que la durée d'étanchéité « *de référence* » évaluée à ce stade par l'Andra (4 300 ans) est probablement surévaluée et en tout état de cause, n'est pas justifiée dans le présent dossier. Concernant la durée d'étanchéité retenue en situation enveloppe (500 ans), l'IRSN observe qu'elle découle des choix de conception du chemisage et du conteneur faits par l'Andra mais souligne que ce choix doit être mis en cohérence avec l'état des connaissances sur les mécanismes d'altération du verre des colis de déchets HA (cf. *infra*). En tout état de cause, compte tenu des incertitudes résiduelles à ce stade des connaissances sur les conditions d'environnement et la prédominance du phénomène de corrosion généralisée (cf. *supra*) et conformément à la demande de l'ASN 2014 D13 précitée, **il conviendra que l'Andra (i) justifie, au regard des résultats de l'ensemble de son programme d'études, que l'épaisseur consommable par corrosion prévue dans le dimensionnement du chemisage et du conteneur de stockage est bien suffisante vis-à-vis de la vitesse de corrosion majorante qui sera finalement retenue au regard des phases transitoire puis d'équilibre avec l'environnement de l'alvéole et (ii) précise sa démarche de dimensionnement vis-à-vis de la tenue mécanique d'une part et de la corrosion d'autre part, pour le conteneur comme pour le chemisage.**

Par ailleurs, l'IRSN rappelle que le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3] précise qu'« *il est recommandé que le colis empêche la dissémination d'activité dans les autres composants du système de stockage pendant une période donnée après sa mise en place dans l'installation. Pour les déchets de haute activité massique [...], ce confinement sera notamment assuré pendant une période au terme de laquelle la température au contact des colis sera suffisamment faible pour que d'éventuels relâchements s'opèrent dans des conditions connues* ». A ce sujet, l'exigence de température maximale à cœur du verre pour les colis de déchets HA au moment de la perte d'étanchéité des conteneurs de stockage était de 50°C dans le « Dossier 2005 », en cohérence avec le domaine de validité des connaissances disponibles sur la phénoménologie d'altération des verres. Au cours de l'instruction, et comme présenté au chapitre 5.1.7.2, l'Andra a indiqué que le relèvement de ce critère à 70°C pour les colis de déchets HA1/HA2 dans le **DOS** dépend de l'acquisition de connaissances complémentaires sur le comportement des verres nucléaires et des radionucléides au-delà de 50°C. Elle a précisé que la durée nécessaire pour que la température à cœur du verre redescende à ces valeurs de 70°C et 50°C, et donc pendant laquelle l'étanchéité du conteneur serait requise, étaient respectivement de 300 ans et 1 300 ans. L'IRSN constate que si la durée d'étanchéité estimée par l'Andra dans le cas de référence du scénario d'évolution normale (4 300 ans) est compatible avec ces durées susmentionnées (300 ans et 1 300 ans), elle ne l'est plus dans le cas enveloppe (500 ans), pour un critère de température de 50°C à cœur du verre. Ceci renforce la nécessité de disposer, d'ici la

DAC, de l'ensemble des résultats expérimentaux permettant de justifier la valeur cible de 70°C à cœur du verre au-delà de laquelle l'étanchéité à l'eau du conteneur de stockage de colis de déchets HA1/HA2 doit être vérifiée.

En outre, l'IRSN estime que les connaissances existantes relatives au comportement des radionucléides dans la roche hôte (solubilité, rétention) devraient pouvoir être extrapolées aux conditions de température évaluées à ce stade autour des alvéoles (maximum d'environ 60°C en paroi d'alvéole à 300 ans lorsque la température à cœur des colis est à 70°C).

### 5.2.3 PRE-DIMENSIONNEMENT DU CHEMISAGE

Au stade du DOS et comme rappelé précédemment, l'Andra retient [39] une exigence de tenue du chemisage aux différentes contraintes mécaniques auxquelles il est soumis (thermomécaniques, chargement hétérogène...) en tenant compte d'une valeur constante moyenne de diminution d'épaisseur par corrosion de 10 µm/an pendant 500 ans.

L'IRSN observe que l'épaisseur de chemisage retenue à ce stade (supérieure à 25 mm) est similaire à celle qui était retenue dans le « Dossier 2005 » et rappelle que celle-ci résultait d'un pré-dimensionnement mécanique (20 mm) auquel s'ajoutait une surépaisseur de 5 mm visant à tenir compte de la corrosion pendant 300 ans. L'examen de ce dossier ne soulevait pas de remarque particulière de la part de l'IRSN autre que celle liée aux « *incertitudes significatives relatives à la vitesse de corrosion des composants métalliques d'un alvéole de stockage* ».

Par rapport au « Dossier 2005 », l'IRSN observe que l'étanchéité à l'eau du chemisage n'est plus requise au stade du DOS ; l'engagement 2010 E3.3 pris par l'Andra de préciser si elle retient une exigence d'étanchéité pour ce composant peut donc être considéré comme soldé. Par ailleurs, l'Andra précise (cf. chapitre 2.2.3.2) que l'injection d'un matériau de remplissage de type ciment bentonitique (non encore complètement défini à ce stade) dans l'espace annulaire situé entre la roche et le chemisage est à présent retenue afin de limiter les vitesses de corrosion en neutralisant le transitoire acide tout en respectant les exigences à long terme vis-à-vis des déchets (pH < 10 lors de l'arrivée de l'eau sur le verre nucléaire). Pour permettre cette injection, l'IRSN observe que l'espace annulaire sera augmenté (cf. Figure 15) ce qui permet à l'Andra d'envisager à présent la mise en place du chemisage après le creusement complet (et le retrait du micro-tunnelier) de l'alvéole. Du point de vue de la faisabilité de ce nouveau procédé de construction et de l'impact de cette injection sur le comportement mécanique du chemisage, l'IRSN estime que ces nouvelles dispositions nécessitent des essais (dont la mise en œuvre a débuté au Laboratoire souterrain) et considère que cette injection devrait permettre d'uniformiser plus rapidement la mise en charge du chemisage par la roche avoisinante, **ce qui devrait être a priori favorable**. Néanmoins, l'IRSN note que l'épaisseur d'acier consommable par corrosion n'offre pas de marges et ne permet donc pas de prendre en compte les incertitudes résiduelles qui subsistent sur les phénomènes de corrosion (cf. *supra*). En effet, avec une vitesse de corrosion moyenne de 10 µm/an telle que retenue par l'Andra, l'épaisseur corrodée au bout de 500 ans serait de 5 mm et ce en ne considérant qu'une face du chemisage soumise aux processus de corrosion. **L'IRSN considère donc que la demande 2014 D13 de l'ASN relative au dimensionnement des composants métalliques de l'alvéole HA formulée à l'issue de l'instruction du « Dossier 2005 » et réitérée à l'issue de l'instruction du dossier « Ouvrages de fermeture » reste d'actualité pour le chemisage, comme pour le conteneur (cf. *supra*).**

## 5.3 EVOLUTION DES BETONS

L'Andra prévoit, au stade du **DOS**, d'utiliser des bétons classiques de type CEM I<sup>46</sup> comme matériaux pour la plupart des soutènements/revêtements des galeries et des alvéoles **MAVL**, ainsi que des bétons de type CEM V<sup>47</sup> pour la plupart des conteneurs de stockage **MAVL**. Des bétons « bas pH » (pH inférieur à 11) sont par ailleurs retenus à proximité des ouvrages de scellements (cf. chapitre 2.5.2) et le cas échéant, pour le confinement mécanique du matériau argileux destiné à obturer les alvéoles **HA** ainsi qu'en partie utile des alvéoles de stockage de colis vitrifiés **MAVL**. Les principaux compléments apportés dans le **DOS** à la description de l'évolution de ces bétons présentée dans les précédents dossiers, portent sur les bétons bas pH de façon générale et sur la perturbation saline des autres types de bétons due aux déchets salins en alvéole **MAVL**. L'examen par l'IRSN de l'évolution des bétons en conditions de stockage, objet du présent chapitre, se concentre donc sur ces deux sujets. Le dimensionnement des composants en béton au regard des fonctions qui leurs sont attribuées pendant la phase d'exploitation est quant à lui traité au chapitre 4.5.4.2 relatif à la caractérisation géotechnique du Callovo-Oxfordien pour ce qui concerne les soutènements/revêtements et au chapitre 7.1.2 relatif aux risques de dissémination de substances radioactives.

### 5.3.1 BETONS BAS PH

L'IRSN rappelle que l'utilisation des bétons « bas pH » (pH inférieur à 11) à proximité des ouvrages de scellement est apparue comme une possibilité dans le « Dossier 2005 » [13] et qu'elle est retenue comme option de référence depuis le dossier « Ouvrages de fermeture » examiné par l'IRSN en 2014 [30]. L'IRSN convenait alors que ces bétons bas pH apportent une perturbation alcaline plus faible à long terme sur les milieux argileux et qu'il pouvaient donc présenter un intérêt particulier pour les portions de revêtement dont la dépose n'est pas prévue lors de la mise en place des ouvrages de scellement mais s'interrogeait néanmoins sur leur tenue mécanique, dans un contexte de stockage, par rapport à celle des bétons ordinaires. A cet égard, l'ASN a demandé à l'Andra, en vue de la **DAC**, que soit apportée la démonstration que l'évolution physico-chimique du béton bas pH dans le Callovo-Oxfordien et dans l'Oxfordien calcaire ne risque pas de nuire à l'atteinte des performances mécaniques qui lui sont attribuées à moyen et long terme (2014 D8 [1]). L'Andra s'était en outre engagée (2014 E2.2) à apporter cette démonstration à cette échéance, pour les phases d'exploitation et de post fermeture, sur la base d'un bilan des connaissances issus d'essais et de modélisation.

#### Choix des bétons bas pH

L'Andra indique [40] que l'utilisation privilégiée de bétons bas pH est retenue à proximité des ouvrages de scellement, à la fois pour les massifs d'appui (y compris en tête d'alvéole **MAVL**) et pour les tronçons de revêtement qui pourraient rester en place au droit de ces massifs ou au droit des noyaux argileux. L'Andra précise que ce type de formulation contribue à « *une bonne mise en place garante de leur fonction mécanique (limitation du retrait par limitation de l'échauffement lié à la prise du béton)* ». L'Andra a confirmé au cours de l'instruction que les deux formulations de bétons bas pH basées sur un mélange clinker/fumée de silice additionné soit de cendres volantes, soit de laitiers de hauts fourneaux (respectivement appelées T1<sup>CV</sup> et T3<sup>L</sup>) présentées dans le « Référentiel Matériaux Cimentaires » [84] étaient toujours retenues. Elle a cependant précisé que les formulations et choix d'utilisation de

<sup>46</sup> CEM I désigne un ciment portland sans ajout

<sup>47</sup> CEM V désigne un ciment portland avec ajout de cendres volantes et/ou de laitier de haut-fourneau

ces bétons n'étaient pas encore arrêtés [116] et que « *le spectre de formulations de bétons bas pH a été défini à ce stade pour ne pas être contraint par des capacités d'approvisionnement de matière première dans le futur* ». L'IRSN prend note de ce dernier argument et considère qu'il s'agit d'un élément déterminant dans la justification des formulations de bétons avec ajouts issus notamment de la sidérurgie (bétons bas pH ou autre).

S'agissant de la « *bonne mise en place* » des massifs d'appui, l'Andra précise [116] que le choix d'un béton bas pH vise à (i) « *réduire la chaleur d'hydratation pour limiter les gradients thermiques qui pourraient se développer au jeune âge dans des ouvrages de grandes dimensions* », (ii) « *rechercher une ouvrabilité plastique de façon à faciliter la mise en place des bétons* » et (iii) « *limiter le retrait total pour améliorer la qualité du scellement* ». L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que « *la dimension (géométrie) de ces massifs d'appui rend impossible l'emploi d'un CEM I seul car les températures atteintes pourraient dépasser 100°C à cœur [...] et donc dépasser le critère de 90°C mis dans les exigences applicables sur le Callovo-Oxfordien. De plus, un retrait thermique particulièrement important pourrait engendrer une fissuration dans la masse en même temps qu'un décollement important sur toute la périphérie de l'ouvrage* ». En revanche, le retour d'expérience acquis lors de l'essai FSS (construction d'un scellement pleine échelle) montre qu'un massif d'appui réalisé de manière continue par passes successives avec un béton bas pH auto-plaçant atteint une température à cœur de 50°C et qu'un autre réalisé en béton projeté atteint 67°C. L'IRSN convient de la pertinence de limiter la température de prise lors du bétonnage de pièces massives et considère comme l'Andra que le choix d'un ciment CEM I serait étonnant dans cet objectif, la pratique usuelle consistant alors à privilégier d'autres formulations de ciments (par exemple un béton modérément dosé en ciment à faible chaleur d'hydratation) et un bétonnage adapté par plots et levées. **L'IRSN n'est toutefois pas convaincu de la nécessité de recourir à des bétons bas pH pour limiter la température de prise des pièces massives.**

#### **Interactions béton bas pH / eau argileuse**

S'agissant de la prise en compte de l'évolution physico-chimique des bétons bas pH en milieux argileux sur la tenue mécanique des massifs d'appui, l'Andra indique [40] que des simulations numériques visant à évaluer l'extension de la dégradation sous eau des massifs d'appuis en béton bas pH, déjà présentées dans le dossier « Ouvrages de fermeture » montrent que ceux-ci « *devraient [...] conserver leurs propriétés mécaniques sur de longues durées, à l'exception éventuelle des interfaces où les évolutions minéralogiques peuvent être significatives mais se traduisent entre autres dans le béton par une précipitation tendant à réduire la porosité et donc à consolider le matériau* » et que « *l'évolution des caractéristiques mécaniques des interfaces à long terme du fait des différentes dégradations chimiques et mécaniques (couplage chémo-mécanique) n'est pas encore bien quantifié à ce stade* ». Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé « *qu'aucune simulation du couplage avec l'évolution mécanique ne sera réalisée d'ici à la DAC. L'analyse de l'évolution mécanique sera qualitative sur la base des simulations chimiques et des données expérimentales sur le couplage. Toutefois au regard de la création des futurs scellements, ces éléments pourront être confirmés après le dépôt de la DAC* ». En outre, l'Andra indique [116] que la physico-chimie initiale des bétons bas pH « *n'est pas complètement maîtrisée (rétention des alcalins...) ni la nature des phases formées à moyen et long terme lors de leur dégradation au contact de matériaux argileux (M-S-H, M-A-S-H) ou l'évolution de leur solution interstitielle* » et que « *le modèle chimique des ciments de type « bas pH » n'est pas actuellement stabilisé* » avec « *des incertitudes sur les schémas d'évolutions chimiques du matériau vis-à-vis des réactions d'hydrolyse, d'attaque sulfatique, de réactivité avec les sels nitrate, l'activité bactérienne et les conditions redox* ».

L'IRSN estime que l'attaque sulfatique n'est pas un des mécanismes prépondérants de dégradation pour les bétons bas pH immergés dans une eau du Callovo-Oxfordien. En effet, au contact de l'eau du Callovo-Oxfordien dont le pH est voisin de 7, le pH de l'eau interstitielle contenue dans la porosité d'un béton bas pH (inférieur à 11) chute rapidement en deçà de la limite de solubilité de l'ettringite (pH 10,5) empêchant ainsi sa formation et donc le processus d'attaque sulfatique. Une étude (Dauzères et al., 2014 [158]) réalisée sur des matériaux similaires à ceux retenus par l'Andra le montre clairement.

En revanche, l'IRSN estime, au vu de l'état des connaissances énoncé par l'Andra, que les conclusions pouvant être tirées des simulations chimiques restent très fragiles car elles ne prennent pas en compte l'ensemble des mécanismes réactifs principaux se produisant dans un béton bas pH placé au contact d'un matériau argileux ou d'une eau argileuse, quel que soit le composant en béton bas pH (massifs d'appui, revêtements...). En particulier, lors de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture », l'IRSN avait souligné que les simulations présentées par l'Andra ne prenaient pas en compte la formation systématique de phases magnésiennes (de type M-S-H) pourtant observée expérimentalement à court terme et dont l'impact sur la tenue mécanique des bétons bas pH n'avait pas été investiguée.

A cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'un programme de R&D comportant des expérimentations en laboratoire « jour » et au Laboratoire souterrain était en cours, en particulier sur le couplage entre l'évolution chimique et l'évolution des propriétés mécaniques et de transfert (eau et solutés) du béton et de ses interfaces avec les milieux argileux (Callovo-Oxfordien et/ou bentonite), en conditions saturées et non-saturées, les résultats étant prévus pour la DAC. L'IRSN estime que ce type de programme de R&D devrait permettre d'apporter des éléments de réponse à la demande de l'ASN rappelée ci-avant (2014 D8) pour ce qui concerne la compréhension de l'évolution physico-chimique des composants en béton bas pH en contact avec les composants argileux du stockage.

#### **Effet de l'eau de l'Oxfordien calcaire sur les massifs d'appui des scellements des liaisons surface-fond**

L'Andra indique [40] que la formulation des bétons bas pH contribue à une très lente évolution physico-chimique de ce matériau sur le long terme et a précisé au cours de l'instruction que « du point de vue des pathologies que l'on pourrait attendre sur des bétons comme l'attaque sulfatique ou la carbonatation, le comportement dans le Callovo-Oxfordien est enveloppe de celui de l'Oxfordien Calcaire ». L'Andra n'a donc réalisé aucun essai de dégradation chimique par immersion de bétons bas pH dans les eaux de l'Oxfordien calcaire et n'en prévoit pas pour la DAC.

Outre la remarque relative au caractère peu vraisemblable du processus d'attaque sulfatique d'un béton bas pH immergé dans une eau du Callovo-Oxfordien (cf. *supra*), l'IRSN estime que la charge ionique plus faible des eaux de l'Oxfordien calcaire pourrait entraîner une hydrolyse plus marquée des matériaux cimentaires par rapport à celle due à l'eau du Callovo-Oxfordien. Aussi, l'IRSN s'interroge, comme lors de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture », sur l'évolution de ces matériaux dans une eau à l'équilibre avec des calcaires. En tout état de cause, l'IRSN estime qu'en l'état actuel des connaissances, le caractère enveloppe du comportement des matériaux cimentaires immergés dans une eau du Callovo-Oxfordien par rapport à une immersion dans une eau de l'Oxfordien Calcaire n'est pas démontré. Or, comme le souligne l'Andra [40], « les scellements des ouvrages de liaison surface-fond jouent le rôle le plus important dans la sûreté passive après fermeture ». Leur étude détaillée est donc essentielle. Aussi, l'IRSN estime que la réponse de l'Andra à la demande de l'ASN 2014 D8 relative à l'évolution physico-chimique des composants en béton bas pH dans l'Oxfordien calcaire reste un attendu très important

pour la **DAC**, si le choix d'un tel béton était maintenu dans la conception des scellements de liaisons surface-fond au niveau de l'Oxfordien calcaire.

#### Effet de la température sur les bouchons en béton des alvéoles HA

L'Andra indique [40] que si la mise en place d'un dispositif de confinement mécanique à l'arrière du matériau de remplissage argileux prévu pour obturer les alvéoles HA était retenue, l'emploi de matériaux cimentaire se réduirait uniquement à des formulations bas pH. À cet égard, l'Andra indique [116] que « *le bouchon en béton des alvéoles HA sera soumis pendant une à plusieurs centaines d'années à des températures supérieures à 50°C* » et que « *la température tend à augmenter les cinétiques réactionnelles des processus de dissolution/précipitation* ». L'IRSN remarque qu'aucune expérimentation n'a été conduite sur le vieillissement des matrices cimentaires de type bas pH à court, moyen ou long terme en température et que l'Andra admet [116] qu'« *aucune donnée n'est [...] disponible pour évaluer l'évolution des matériaux cimentaires, en particulier ceux de type « bas pH », en température sur de telles durées de temps et de telles conditions thermiques* ». Aussi, conformément à la demande de l'ASN 2014 D8 relative à la démonstration de l'atteinte des performances mécaniques attribuées aux composants en bétons bas pH, l'Andra devra apporter pour la **DAC** des éléments montrant la bonne tenue mécanique d'un dispositif de confinement en béton bas pH des bouchons d'alvéoles HA dans des conditions représentatives de celles d'un alvéole HA, si un tel dispositif était retenu.

#### Carbonatation atmosphérique pendant la phase d'exploitation

L'Andra indique [40] que la perturbation chimique apportée par les portions de revêtement non déposées lors de la mise en place du noyau argileux doit être aussi faible que possible et prévoit à cet égard que ces portions soient en béton bas pH. Concernant la tenue mécanique de ces portions de revêtement en béton bas pH, l'Andra précise [116] que « *la carbonatation atmosphérique est le principal mode de dégradation chimique des bétons en conditions ventilées* », notamment « *pour des humidités relatives de l'ordre de 55% à 70%* », et que « *les bétons de type « bas pH » présentent une carbonatation qui s'étend plus que pour les CEM I et CEM V du fait de l'absence de portlandite dans le matériau hydraté et d'une teneur globale en calcium plus faible* », comme dans le dossier « *Ouvrages de fermeture* ». L'Andra évalue « *l'avancée du front de carbonatation dans les conditions désaturées des ouvrages de l'ordre de 0,3 mm/an à 1,1 mm/an pour un béton BHP CEM I et une cinétique deux fois plus rapide pour un BHP CEM V* » tout en précisant que « *des incertitudes importantes persistent quant à l'évolution de ces propriétés dans le temps* » et que « *ces modifications chimiques et physiques sont irréversibles* ». Finalement, l'Andra estime [40] que l'extension de la carbonatation atmosphérique des bétons à la fermeture définitive du stockage est au plus décimétrique et que la quantité de béton carbonaté est faible mais ne précise pas l'ordre de grandeur de cette altération dans les bétons bas pH.

L'IRSN relève que selon l'Andra [116] les matériaux cimentaires de type bas pH sont plus sensibles à la carbonatation atmosphérique que les matrices principalement composées de ciment Portland, ce que confirment par ailleurs des travaux récents [160]. En effet, la thèse de M. Auroy (2014) [160] montre qu'une microfissuration très marquée apparaît dans les pâtes de ciment bas pH en lien avec la carbonatation, alors que cette fissuration est moins présente dans les matériaux de type CEM I. L'Andra a indiqué lors de l'instruction que « *la fissuration détectée par M. Auroy dans sa thèse se réfère à des pâtes de ciment et non des bétons. Par ailleurs ces essais ont été conduits en carbonatation accélérée, exacerbant le phénomène de retrait de carbonatation sur des échantillons de tailles très réduites et donc facilitant la fissuration* ». L'IRSN remarque que les essais réalisés dans la thèse d'Auroy l'ont été à une pression partielle en CO<sub>2</sub> de 3 %, valeur par ailleurs normalisée avec les travaux de Castelotte et al. (2009) [178]

et précisée dans le référentiel « Matériaux Cimentaires » de l'Andra [84] « pour les essais de carbonatation accélérée afin de conserver la représentativité des phénomènes avec la carbonatation naturelle ». L'IRSN estime donc que les matériaux bas pH présentent une fragilité plus forte qu'un matériau CEM I. En outre, l'IRSN estime que les pâtes de ciment sont le lieu où siègent, dans les bétons, les interactions chimiques (béton/argile, carbonatation atmosphérique, lixiviation...). A cet égard, l'IRSN rappelle que la majorité des expérimentations sur l'évolution physico-chimique des matériaux cimentaires réalisés par l'Andra reposent sur la réalisation d'expériences sur pâtes de ciment.

En outre, le transitoire hydrique devrait imposer une carbonatation atmosphérique du béton bas pH sous ventilation pendant la période d'exploitation à laquelle devrait s'ajouter, au niveau des interfaces béton/argile, une altération liée à l'eau porale de l'argilite (cf. *supra*, interactions béton bas pH / eau argileuse). La question de la concomitance de ces perturbations et de leur impact sur la tenue mécanique des revêtements nécessite donc d'être traitée. L'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'au stade du DOS « la question de la mise en place des revêtements en béton bas pH au droit des futurs scellements dès la phase de construction ou de manière différée lors de la mise en place de ces scellements reste ouverte ».

Enfin, s'agissant des alvéoles de stockage MAVL de colis vitrifiés, l'IRSN estime que compte tenu des incertitudes actuellement identifiées (impact de la carbonatation atmosphérique et des interactions béton/argile sur l'évolution à court et à long terme des bétons bas pH en conditions de stockage), l'emploi généralisé de béton bas pH sur l'ensemble d'un alvéole MAVL pourrait avoir des conséquences en termes d'intégrité mécanique et donc de récupérabilité des colis.

Aussi, l'IRSN considère que dans le dossier de DAC, l'Andra devra montrer que l'impact sur les composants en béton bas pH de la concomitance des perturbations liées d'une part à la carbonatation atmosphérique, d'autre part aux interactions béton/argile (contact avec la roche et/ou l'eau porale du Callovo-Oxfordien), ne remet pas en cause sur toute la durée de l'exploitation la tenue mécanique du béton bas pH du revêtement le cas échéant mis en place au droit des futurs scellements dès la phase de construction et du corps d'alvéole de stockage MAVL de colis vitrifiés. Ce point fait l'objet de l'engagement E24-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

### 5.3.2 PERTURBATION SALINE PAR LES COLIS DE DECHETS MAVL

L'Andra présente l'impact de fortes teneurs en sels issues des colis de déchets salins MAVL (colis C5 et colis de boues bitumées) sur la physico-chimie des milieux cimentaires et l'évolution de leurs propriétés de rétention et de solubilité des radionucléides, dans le dossier relatif à l'acceptabilité du colis C5 [220], qui a fait l'objet d'une instruction par l'IRSN et d'une réunion du GPD le 28 mars 2017 [196]. Les principaux points de cette expertise sont rappelés ci-après bien que la production du colis C5 et le stockage de colis de boues bitumées soient à ce jour remis en cause (cf. respectivement chapitres 3.1.3 et 7.2.1.7).

L'Andra indique que les déchets salins contiennent d'importantes teneurs en sels solubles (de l'ordre d'1 mol/L), essentiellement en nitrates ( $\text{NaNO}_3$ ) et en sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), qui, lorsque le milieu est resaturé, peuvent perturber les équilibres chimiques au sein des matériaux cimentaires (conteneur de stockage, ouvrages de soutènement des alvéoles MAVL). La diffusion d'un panache de ces sels dans les matériaux cimentaires modifie la composition de la solution porale, ce qui peut induire la disparition de phases responsables d'une partie des phénomènes de rétention

(comme les phases Silicates de Calcium Hydratés dites C-S-H, présentes dans la pâte de ciment) ou au contraire l'apparition de nouvelles phases favorables à la rétention de certains radionucléides (par exemple l'ettringite pour les oxo-anions). **L'IRSN estime que la phénoménologie prévisible d'évolution des matériaux cimentaires en présence de sels, et l'influence potentielle de cette évolution sur la rétention des radionucléides, sont convenablement ciblées.**

Une étude spécifique de l'effet de fortes concentrations de  $\text{NaNO}_3$  et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a été menée par l'Andra [220], de façon découplée, sur les transformations minéralogiques au sein d'une pâte de ciment hydraté CEM I, ainsi que sur la modification des propriétés de rétention du radium et de l'uranium induite par ces transformations minéralogiques. **L'IRSN estime que le choix de l'uranium et du radium est pertinent, puisqu'il est généralement admis que l'uranium est retenu par complexation de surface des hydrates cimentaires et le radium par échange cationique. L'impact des sels sur les deux mécanismes majeurs de rétention peut ainsi être évalué.**

#### Transformations minéralogiques

L'Andra indique [220], sur la base d'études expérimentales mettant en contact des échantillons de pâtes de ciment CEM I (poudre, disques...) avec des solutions de nitrates ou de sulfates à différentes concentrations représentatives du terme source chimique issu des colis de déchets salins MAVL, que le ciment subit des transformations minéralogiques significatives avec dissolution de certaines phases (portlandite notamment) et précipitation d'autres (darapskite, gypse et ettringite). Elle précise que l'attaque sulfatique provoque la précipitation de phases expansives pouvant engendrer des contraintes mécaniques. **L'IRSN estime que ces résultats sont conformes aux connaissances.** Néanmoins, l'IRSN considère que les études mériteraient d'être complétées en étudiant les transformations minéralogiques dans des conditions plus représentatives, en particulier sur une pâte de CEM V qui est le béton retenu à l'heure actuelle pour les colis de stockage de déchets salins, dans la mesure où la phénoménologie observée n'est pas directement transposable à d'autres types de ciments, et pour des mélanges de sulfates et de nitrates.

Par ailleurs, l'Andra présente [220] des modélisations, dites de « *transport réactif* » (prise en compte de l'évolution physico-chimique des matériaux des ouvrages et des argilites du Callovo-Oxfordien sous l'effet du panache salin), afin d'évaluer le comportement de ces sels et des radionucléides lors de leur migration au sein des alvéoles MAVL et des argilites en champ proche, après la fermeture du stockage. Ces études conduisent aux résultats suivants :

- la concentration en nitrates dans les eaux porales des argilites est évaluée à  $10^{-2}$  mol/L à 15 mètres de la source initiale à 10 000 ans, indiquant une dilution spatiale sans interaction chimique significative avec les matériaux cimentaires ;
- le panache en sulfates induit une modification minéralogique majeure (précipitation d'ettringite) des matériaux cimentaires (conteneur de stockage, béton des ouvrages) qui agissent comme tampon, et limitent ainsi l'extension du panache en sulfates, qui n'atteint pas la roche hôte.

L'IRSN estime que ces modélisations de l'extension du panache issu des colis de déchets salins, qui tiennent bien compte de l'état des connaissances actuel, conduisent à des résultats cohérents avec ceux obtenus par l'Institut.

Concernant la perturbation sulfatique, l'IRSN estime que l'augmentation de la teneur en ettringite entraînera inévitablement des processus de gonflement des conteneurs, voire des ouvrages de soutènement des alvéoles MAVL, susceptibles de générer des contraintes mécaniques sur la roche hôte. Cet aspect n'est actuellement pas pris en compte [220].

L'IRSN considère que le gonflement maximal possible des matériaux cimentaires sous l'effet de l'attaque sulfatique par les sulfates issus des déchets salins devra être évalué et le cas échéant qu'il devra être vérifié que ce gonflement n'entraîne pas de contraintes mécaniques sur la roche hôte autour des alvéoles MAVL. Ce point fait l'objet de l'engagement E23-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

L'Andra prévoit [220] la poursuite des études sur les transformations minéralogiques des matériaux cimentaires induites par de fortes concentrations en sels. En particulier, il y est indiqué que la poursuite des approches expérimentales et de modélisation aura pour but d'approfondir la caractérisation des changements minéralogiques des matériaux cimentaires induits par des contacts prolongés avec des solutions salines chargées en  $\text{NaNO}_3$  et/ou  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et de relier ces changements minéralogiques aux compositions des solutions porales. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN à ce stade.**

#### Impact sur la rétention des radionucléides

Les expériences menées par l'Andra sur la rétention des radionucléides en milieux cimentaires montrent [220] une réduction d'un facteur 10 environ de la capacité de rétention de ces matériaux vis-à-vis de l'uranium et du radium, en présence de nitrates ou en présence de sulfates. L'Andra indique que cet effet peut être attribué à (i) la charge en alcalins sur les mécanismes d'échange cationique, particulièrement sensibles pour des éléments tels que le radium, (ii) la force ionique élevée, qui modifie l'activité des espèces en solution, et donc la stabilité de certains solides (tels que la portlandite), ainsi que les équilibres de sorption en surface des solides cimentaires et (iii) l'évolution de la composition des matériaux cimentaires suivant des mécanismes connus (attaque sulfatique, redistribution en calcium, précipitation de sels). **L'IRSN estime que cette interprétation est vraisemblable et considère que l'Andra pourra tirer profit de son programme d'études visant à affiner la représentation de l'évolution du panache salin (cf. *supra*) pour consolider cette interprétation.**

Néanmoins, ainsi qu'il vient d'être indiqué, l'IRSN considère que les études doivent être complétées, en étudiant les transformations minéralogiques dans des situations plus représentatives, et en particulier sur une pâte de CEM V (béton retenu pour les colis de stockage de déchets salins) et pour des mélanges de sulfates et nitrates, tels qu'attendus par la lixiviation des boues. A cet égard, l'Andra prévoit [220] la poursuite des études sur les transformations minéralogiques des matériaux cimentaires induites par de fortes concentrations en sels, **ce qui est satisfaisant.**

#### Impact sur la limite de solubilité des radionucléides

Des calculs de solubilité ont été réalisés par l'Andra [220] pour les radionucléides correspondant aux éléments suivants : Cl, Ca, Sr, Ni, Se, Zr, Nb, Mo, Tc, Sn, Pb, Ra, Th, U, Np, Pu, Am. Ces calculs, dont l'objectif est d'évaluer si les radionucléides, pour la plupart initialement piégés par des sels insolubles dans les déchets salins, conservent un caractère insoluble dans les conditions d'environnement spécifiques du stockage, ont été réalisés pour les conditions suivantes :

- un milieu cimentaire de référence à base de CEM V à différents états d'altération et pour deux contrôles redox différents, respectivement avec le couple magnétite/hydrogrenat et avec le couple très réducteur Fe(0)/magnétite ;
- ce milieu cimentaire en considérant la présence de sels solubles en retenant l'hypothèse d'une précipitation préalable des sels sous formes de gypse et darapskite et pour deux contrôles redox différents,

respectivement avec le couple magnétite/hydrogrenat et en considérant la réactivité (*i.e.* réduction) des sels de nitrates qui induit des conditions oxydantes imposées par le couple N(V)/Fe(II).

Les forces ioniques élevées choisies pour représenter la présence des sels (2,8 mol/L pour les matériaux cimentaires) ont nécessité de faire appel à des approches physico-chimiques théoriques spécifiques pour calculer les activités ioniques des espèces.

L'IRSN retient de ces calculs, effectués pour un large éventail de radionucléides dont les principaux seront présents sur de longues échelles de temps (centaines à milliers d'années), que la spéciation chimique des radionucléides et le caractère insoluble des sels sont conservés en environnement cimentaire. Ces résultats confirment les résultats expérimentaux présentés par AREVA dans le cadre de l'instruction relative à l'acceptabilité du colis de type C5 dans Cigéo [196] consistant en des essais de lixiviation de boues de coprécipitation dans des conditions représentatives du stockage. En conclusion, l'IRSN souligne la qualité des travaux présentés par l'Andra et considère vraisemblable qu'une faible fraction de radionucléides issus des déchets salins soit solubilisée dans les conditions spécifiques du stockage, ce qui est favorable à la limitation du terme source radiologique.

## 5.4 EVOLUTION DES MATERIAUX ARGILEUX

Ce chapitre présente l'évolution des matériaux argileux (argilites, noyaux de scellements, bouchons argileux...) sous l'effet du chargement thermo-hydrromécanique (THM) apporté au voisinage des alvéoles HA par les colis de déchets exothermiques (chapitre 5.4.1), sous l'effet des gaz et de la resaturation du stockage pendant la durée du transitoire hydraulique-gaz (chapitre 5.4.2) ainsi que sous les effets des transitoires chimiques (perturbations alcaline, saline et organique) et dus aux bactéries (chapitre 5.4.3).

### 5.4.1 TRANSITOIRE THERMO-HYDROMECHANIQUE

Parmi les colis de déchets de haute activité destinés à Cigéo se distinguent les déchets moyennement (HA0) et fortement exothermiques (HA1/HA2). L'Andra rappelle [40] que pour préserver les propriétés favorables des argilites, le stockage de ces déchets doit éviter un échauffement trop important de la roche et qu'au-delà d'une température de 100°C, la complexité des processus ainsi que les difficultés expérimentales d'acquisition de connaissances phénoménologiques augmentent. Dans la continuité du « Dossier 2005 » et du « Dossier 2009 », l'Andra retient donc une température maximale admissible de 100°C pour les argilites et une marge de 10°C couvrant les incertitudes et la variabilité sur les propriétés et modélisations thermiques, ce qui la conduit à retenir une température maximale de 90°C pour le dimensionnement dans les argilites. L'IRSN n'a pas de remarques particulières sur ces critères thermiques qui étaient déjà retenus dans les dossiers précités.

Par ailleurs, l'Andra indique [40] que du fait de la faible perméabilité de la roche hôte et de la différence de dilatation thermique qui existe entre l'eau porale et les phases solides composant les argilites, l'augmentation de la température génère une augmentation de la pression interstitielle pouvant conduire à fracturer la roche. Pour éviter ce risque, l'Andra a également retenu de dimensionner les quartiers HA sur la base d'un critère dit « THM » (thermo-hydrromécanique) faisant intervenir la contrainte effective de Terzaghi, c'est-à-dire la sollicitation mécanique s'appliquant réellement au squelette solide de la roche. L'Andra retient [40] « en référence » un critère correspondant à une contrainte effective de Terzaghi nulle (*i.e.* pas de traction sur le squelette solide) et « en variante pour les déchets HA1/HA2 », une contrainte effective de Terzaghi inférieure à la limite en traction de la roche (1,5 MPa). Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que sur la base du dimensionnement thermique

effectué en phase d'esquisse, le dimensionnement THM (respect de ces critères THM) consiste, toutes choses restant égales par ailleurs et notamment le nombre de colis par alvéole, à augmenter l'entraxe entre alvéoles. L'IRSN observe que les principaux mécanismes à prendre en compte pour dimensionner les quartiers HA dans les argilites sont à présent bien identifiés et souligne, comme l'Andra, que les critères dimensionnants pour les quartiers HA sont essentiellement thermo-hydrémécaniques (THM) et non pas seulement thermiques.

Au cours de l'instruction, l'Andra a également présenté une première analyse de sensibilité de l'espacement entre alvéoles HA aux principaux paramètres THM de la roche hôte (perméabilité à saturation et module d'Young des argilites), dont les résultats sont illustrés par la Figure 69 ci-dessous obtenue pour des colis HA2 stockés après 85 ans d'entreposage. Cette analyse montre que selon les hypothèses retenues, la valeur de l'entraxe nécessaire entre alvéoles serait de 35 m (courbe orange et critère « Limite de rupture ») à 80 m (courbe verte et « Critère de dimensionnement », intersection au-delà des limites de la figure présentée). À ce stade, la valeur retenue [39] pour ce type de colis est de 51 m. L'IRSN relève que pour le jeu de paramètres représenté par la courbe verte de la Figure 69, cet espacement pourrait être insuffisant et souligne que d'autres paramètres (e.g. dilatation thermique différentielle eau/roche, viscoplasticité de la roche, pression hydraulique dans l'interface roche/chemisage...) pourraient également avoir de l'influence dans des sens parfois contraires.

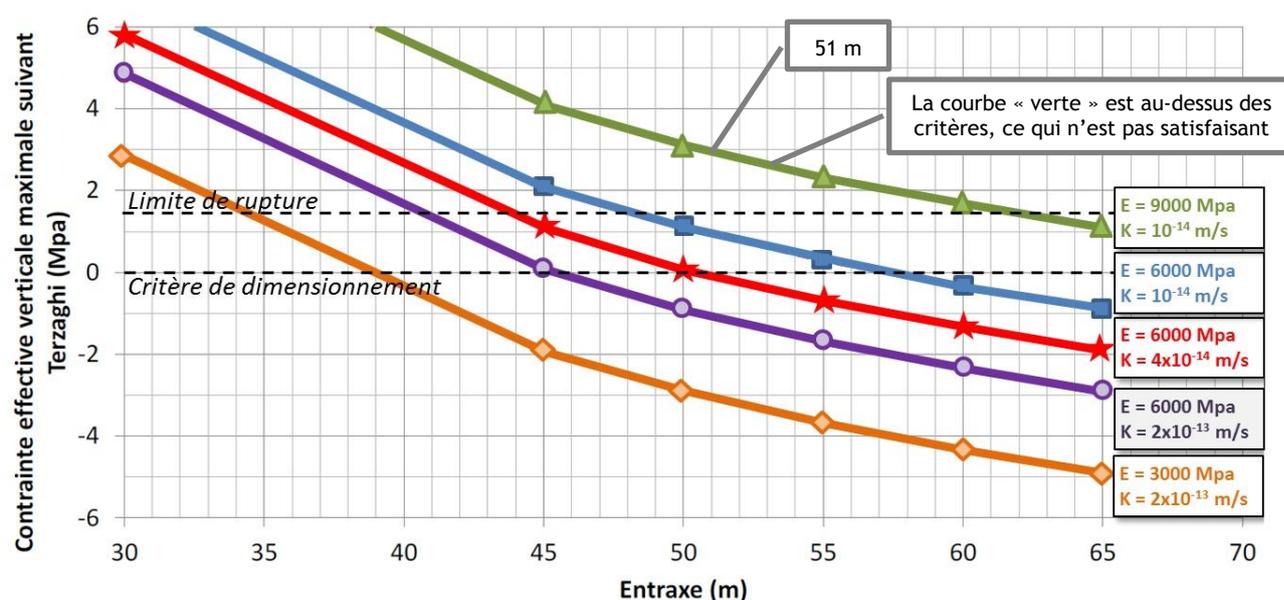


Figure 69 : Sensibilité de l'espacement entre alvéoles HA au module d'Young (E) et à la perméabilité (K) du Callovo-Oxfordien - fin d'APS : cas des alvéoles HA2 avec une période d'entreposage de 85 ans (contraintes positives en traction) (d'après Andra ; commentaires IRSN)

Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que de son point de vue, le dimensionnement des quartiers HA repose sur une approche prudente, fondée notamment sur la poroélasticité linéaire et la prise en compte de différents critères de rupture. L'Andra a également précisé qu'un essai appelé à ce stade « modèle thermique expérimental de quartier HA » visant à atteindre un chargement THM similaire à celui attendu autour d'un quartier HA et pouvant aller jusqu'à évaluer la fracturation hydraulique possible engendrée par un chargement thermique était en cours de définition pour un premier test au Laboratoire souterrain au 3<sup>ème</sup>/4<sup>ème</sup> trimestre 2017. L'IRSN estime que cette expérimentation devrait effectivement être de nature à préciser la marge qui devrait exister entre le résultat du dimensionnement qui sera proposé par l'Andra et le risque d'une fracturation hydraulique thermo-induite. Cependant, ce type d'expérimentation (par exemple TER, TED) pourrait être long à mettre en œuvre et à démanteler et l'IRSN s'interroge sur la manière dont l'Andra intégrera ces premiers résultats prévus fin 2017 dans un

dossier de **DAC** prévu d'être déposé en 2018. Au cours de la réunion préparatoire, l'Andra a précisé que cet essai est planifié de manière à disposer de résultats pour le dossier de **DAC**.

L'IRSN rappelle (cf. chapitre 2.2.3.2 relatif à la description des concepts) que le concept de référence retenu pour les alvéoles de stockage de déchets **HA** est un micro-tunnel borgne d'une longueur de 80 m (**HA0**) à 100 m (**HA1/HA2**) et d'un diamètre utile de l'ordre de 70 cm muni d'un chemisage en acier bas carbone de 25 mm d'épaisseur. Pour permettre la dilatation thermique du chemisage, un tube en acier dit « insert » positionné en tête d'alvéole autorise le coulisement. En dehors de ces éléments généraux qui étaient déjà présents dans les dossiers précédents, l'IRSN relève de nombreuses évolutions (cf. chapitres 2.3.1 et 2.5.2.1 : mise en place du chemisage après creusement, injection de l'interface roche/chemisage, système de drainage en tête d'alvéole, système de fermeture...) dont certaines sont encore en cours de définition. Au cours de l'instruction, l'Andra a notamment transmis de nouveaux éléments descriptifs du système de fermeture (Figure 70), mettant à jour certains éléments présentés dans le **DOS**.

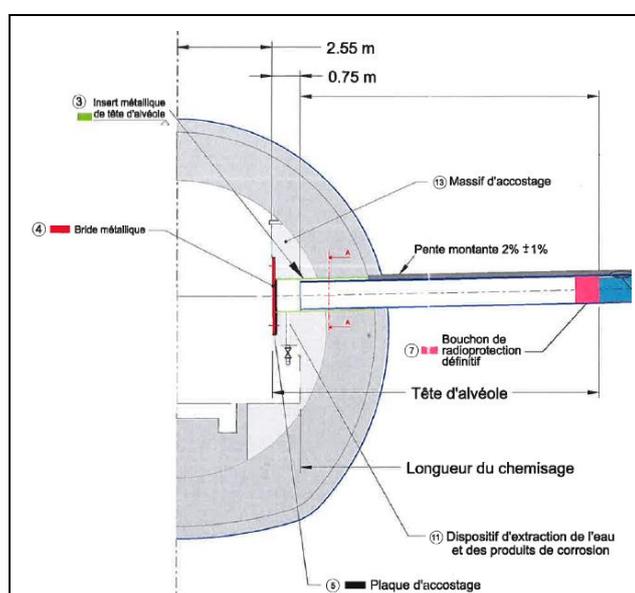


Figure 70 : Concept de fermeture de l'alvéole **HA** (d'après Andra)

Ainsi, l'IRSN note que l'Andra a initié la révision du système de fermeture de l'alvéole à laquelle elle s'était engagée pour la **DAC** (2014 E4 [1] relatif au bouchon de radioprotection) et observe que, plus généralement, le **concept d'alvéole HA** est en pleine évolution. L'IRSN considère que ces évolutions nécessitent des essais en vraie grandeur afin de : valider la technique de construction retenue (notamment celle de l'injection de l'interface roche/chemisage envisagée à ce stade depuis le fond de l'alvéole), définir les méthodes d'auscultation en vue du contrôle-qualité d'un alvéole construit, vérifier l'efficacité d'un système de surveillance placé en tête d'alvéole, qualifier les performances de la bride en termes de limitation des échanges d'air avec la galerie d'accès (cf. chapitre 5.2.1), observer les mécanismes de corrosion à l'œuvre dans l'alvéole (cf. chapitre 5.2.1), tester les dispositions qui pourraient être prises pour faciliter la réouverture d'un alvéole fermé (telles qu'un dispositif d'inertage par le fond par exemple, cf. chapitre 7.2.4.2), etc. En outre, des éléments de démonstration complémentaires sur les interactions entre composants pourraient être apportés par d'autres essais, par exemple le comportement thermo-hydrromécanique d'une interface roche/chemisage cimentée. À cet égard, l'IRSN rappelle que le **PDD** de **Cigéo** évalué en 2015 prévoyait la construction en 2017 au Laboratoire souterrain de modèles d'alvéoles **HA0** « représentatifs de l'ensemble des aspects de la conception ressortant des études d'APD (partie courante, tête de micro-tunnel, plaque de fond) ». L'IRSN estime que de tels essais en vraie grandeur allaient bien

dans le sens de ceux demandés ci-avant sur des modèles d'alvéoles **HA0**. En outre, de tels prototypes ne nécessitant pas d'essais à chaud (*i.e.*, avec colis), l'IRSN n'identifie pas d'obstacle technique à leur réalisation au Laboratoire souterrain.

En particulier, l'IRSN observe qu'en faisant l'hypothèse d'une autorisation de création obtenue vers 2021, l'Andra prévoit à ce stade la construction complète du quartier **HA0** (galeries et 72 alvéoles), y compris le stockage des colis, entre 2025 et 2030. L'IRSN estime que le faible délai (quelques années) entre l'obtention d'une autorisation de création et le début de la construction du quartier **HA0** ainsi que la cadence à laquelle serait prévue cette construction implique que l'ensemble des procédés de construction, de contrôle-qualité, de surveillance en exploitation soit précisément défini auparavant. L'IRSN estime par conséquent que l'ensemble des essais en vraie grandeur évoqués ci-avant devrait être réalisé pour la **DAC**.

Enfin, concernant les quartiers **HA1/HA2**, l'Andra indique [39] que le quartier **HA0** qui sera construit et exploité plusieurs décennies auparavant permettra d'acquérir un retour d'expérience sur la réalisation et l'exploitation des alvéoles **HA**. Nonobstant la réalisation des essais indiqués ci-avant par l'IRSN (« modèle thermique expérimental de quartier **HA** », comportement THM d'une interface cimentée), l'IRSN partage ce point de vue.

En conclusion, l'IRSN estime que l'Andra a bien identifié les principaux mécanismes dimensionnant les quartiers **HA** et notamment l'importance du comportement thermo-hydromécanique (THM) des argilites. L'IRSN considère que l'essai thermique envisagé à partir de 2017 au Laboratoire souterrain devrait effectivement être de nature à préciser la marge qui devrait exister entre le dimensionnement qui sera proposé et le risque d'une fracturation hydraulique thermo-induite mais souligne que le délai dont disposera l'Andra pour en intégrer les résultats dans une **DAC** prévue en 2018 reste court. Concernant le concept d'alvéole **HA**, l'IRSN observe que celui-ci est en pleine évolution et qu'il est nécessaire de réaliser des prototypes d'alvéoles **HA0** pour la **DAC**, représentatifs de l'ensemble des aspects du concept et des fonctionnalités attendues pour en contrôler le bien-fondé. Le concept d'alvéole **HA0** préfigurant celui des alvéoles **HA**,

l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, dans le dossier de **DAC**, un concept d'alvéoles **HA**, dont la capacité de réalisation et l'atteinte des performances visées s'appuieront sur des éléments de connaissance issus notamment d'essais en vraie grandeur menés au Laboratoire souterrain. Ce point fait l'objet de l'engagement E21-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Enfin, l'IRSN estime que la description du concept de référence des alvéoles de stockage de déchets **HA** n'est pas encore suffisamment claire au stade du **DOS** pour solder la demande de l'ASN 2014 D20 [1] relative à un niveau de développement des options techniques permettant d'apprécier les incertitudes à prendre en compte dans l'évaluation de sûreté.

#### 5.4.2 TRANSITOIRE HYDRAULIQUE- GAZ

L'Andra rappelle [40] que des gaz seront produits dans le stockage après la fermeture de celui-ci, principalement de l'hydrogène produit par corrosion anoxique des composants métalliques et radiolyse de certains déchets **MAVL**. Cet hydrogène est issu pour 50 % des alvéoles **HA**, 40 % des alvéoles **MAVL** et 10 % des autres ouvrages (galeries d'accès et de liaison, zones de soutien logistique...) ; il est produit sur une période de plusieurs dizaines de milliers d'années et représente un total d'environ  $10^{10}$  moles ( $2 \cdot 10^7$  kg). Suite à la fermeture du stockage (mise en place des remblais et des scellements), il ne peut plus être évacué par la ventilation de l'installation.

Selon les simulations numériques réalisées par l'Andra [116], la partie supérieure des scellements de liaison surface-fond se sature bien avant l'arrivée du gaz dans ces ouvrages (en quelques années par rapport à quelques milliers d'années après la fermeture du stockage). L'Andra précise que d'après les données expérimentales, cette arrivée de gaz n'empêche pas la poursuite de la saturation du matériau bentonitique qui constitue ces scellements. L'Andra indique [116] qu'après environ 10 000 ans, la quasi-totalité de l'hydrogène produit est répartie dans les alvéoles et les galeries de liaisons, quelques pourcents seulement étant dissous dans les eaux des argilites et en voie de migration par diffusion dans le Callovo-Oxfordien vers le toit et le mur de cette formation ; quelques centaines de milliers d'années plus tard, la quasi-totalité de l'hydrogène a migré par la voie de transfert du Callovo-Oxfordien par diffusion sous forme dissoute et a atteint les encaissants à raison de 40 % vers le Dogger et de 60 % vers l'Oxfordien (cf. Figure 71).

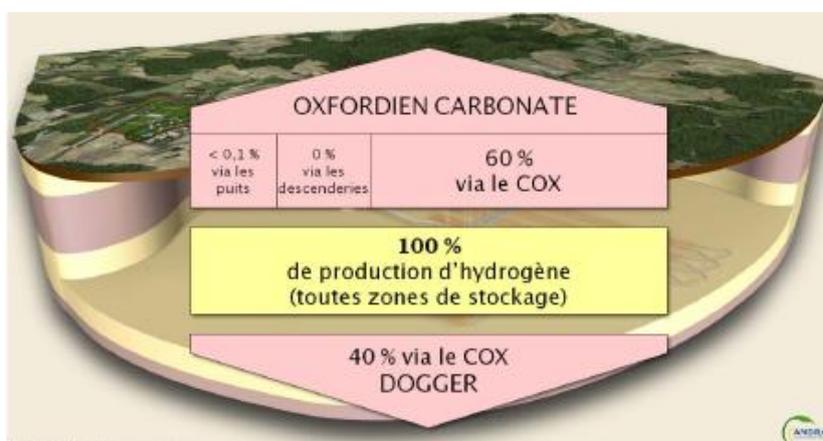


Figure 71 : Voies de transfert de l'hydrogène à l'échelle du stockage (bilan massique) (d'après Andra)

L'Andra précise que pendant toute la durée de ce transitoire, la pression de gaz dans le stockage ne dépasse pas 5-6 MPa [116] et explique [40] ce résultat par (i) l'importante surface d'échange offerte par le stockage entre la phase gazeuse et l'eau porale du Callovo-Oxfordien qui permet au gaz de s'y dissoudre et (ii) la faible pression d'entrée du gaz dans les ouvrages de fermeture (moins de quelques mégapascals [116]) qui laissent circuler une partie de l'hydrogène produit en phase gazeuse. Aussi, l'Andra souligne que la pression de gaz dans le stockage reste bien inférieure à celle de la fracturation des argilites (10-12 MPa) [40] et qu'« *il n'existe pas de sur-endommagement des argilites en champs proche et a fortiori de création de fracture depuis le stockage jusqu'aux formations encaissantes* » [116]. L'Andra ajoute [116] qu'étant donnée la forte pression capillaire opposée par les argilites, cette pression de gaz n'induit pas non plus de surpression hydraulique dans la formation hôte (au plus quelques 0,1 MPa [116] par rapport aux 5 MPa de pression d'eau à l'équilibre initial), ce dont convenait l'IRSN lors de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture ».

En revanche, l'Andra indique que la formation d'hydrogène ralentit la resaturation du stockage [40] et qu'à ce stade, les incertitudes résiduelles portent essentiellement [40] sur les durées de resaturation totale des différents composants du stockage. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que ces durées étaient actuellement estimées à « *de l'ordre de quelques milliers d'années* » pour les scellements de fond, de l'ordre de 100 000 ans pour la zone **HA** et de quelques centaines de milliers d'années pour les zones centrale et **MAVL**. L'IRSN rappelle [30] que pour les scellements de liaison surface-fond, cette resaturation se fait en partie par les eaux de l'Oxfordien et commence par la face supérieure des scellements où elle est atteinte en quelques années sur *a minima* quelques décimètres, puis s'étend au reste de l'ouvrage en quelques milliers d'années. L'Andra a également souligné la précision

relativement limitée de ces résultats et qu'il est peu probable que ces incertitudes puissent être significativement réduites dans les prochaines années. Cependant, l'Andra considère que l'hypothèse d'un stockage complètement saturé en eau dès l'instant initial (*i.e.* immédiatement après sa fermeture) pour les évaluations de sûreté après fermeture et pour le transfert des radionucléides par la voie « eau » permet de s'affranchir de ces incertitudes résiduelles tout en restant conservatif vis-à-vis du transport des solutés puisque dans ce cas, les possibilités d'un retard de relâchement de solutés, d'allongement de leurs durées de transport et de perte par décroissance radioactive de certains radionucléides pendant ce temps ne sont pas prises en compte. En conséquence, au stade du **DOS**, l'Andra ne retient pas de fonction de sûreté particulière vis-à-vis des gaz après fermeture du stockage et considère que les performances de confinement de celui-ci seront maintenues malgré les perturbations apportées par les gaz.

Concernant la pression maximale de gaz attendue dans le stockage, l'IRSN rappelle en premier lieu que la question de l'effet des gaz sur un scellement de liaison surface-fond qui serait soumis à une charge hydraulique de plusieurs mégapascals sur sa face amont et sollicité par les gaz sur sa face aval s'est posée lors de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture » et qu'à cet égard, l'Andra s'est engagée à réaliser pour la **DAC** (2014 E.3.1 [1]) une étude poussée de cet ouvrage prenant en compte l'ensemble de ses composants ainsi que l'incertitude sur le comportement rhéologique du béton sur les durées considérées. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que conformément à cet engagement, de nouvelles simulations numériques étaient prévues pour la **DAC** avec une attention particulière portée à la prise en compte des différents types de scellements (puits, descenderie, galerie, alvéole), de l'ensemble des matériaux les constituant ainsi que des situations attendues et possibles en terme de sollicitation hydrauliques et gaz notamment.

En second lieu, l'IRSN indique qu'au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que le code de calcul principalement utilisé était Tough2-MP, une version massivement parallèle (MP) de Tough2 (*Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat*). L'IRSN convient que ce code de calcul est probablement parmi les seuls capables de réaliser des simulations à l'échelle du stockage, mais souligne néanmoins que le modèle physique qui y est implémenté (écoulements diphasiques « darcéens » en milieux poreux indéformables) est très simple par rapport à la phénoménologie réellement observée en milieux argileux. Parmi les phénomènes non pris en compte par ce code (et sur lesquels l'IRSN reviendra dans la suite du présent chapitre), l'IRSN souligne la pression d'entrée de gaz dans les argilites, dont les valeurs observées sont de 0,5 à 3 MPa pour les argilites fracturées et de 6 à 10 MPa pour les argilites saines [54]. L'IRSN convient des difficultés numériques auxquelles peut conduire cette prise en compte (perte du caractère univoque de la courbe de rétention) mais **estime néanmoins que pour la DAC, l'Andra devra évaluer l'impact de ces pressions d'entrée non nulles sur les résultats de la simulation numérique du transitoire hydraulique-gaz et notamment, sur la valeur maximale de la pression de gaz calculée dans le stockage.**

En troisième lieu, l'IRSN observe qu'une partie de la justification apportée par l'Andra relative à l'absence d'effet significatif des gaz sur le stockage repose sur la possibilité pour ceux-ci de migrer en phase « gaz » (*i.e.* non dissoute) dans l'ensemble du stockage. L'IRSN estime que cette possibilité devient incertaine lorsque les ouvrages, notamment les scellements de galerie et la zone d'argilites endommagées qui leur est attenante en paroi, approchent d'un état quasi-saturé. D'après l'Andra, ceci se produit entre mille et quelques milliers d'années après la fermeture du stockage [116], soit bien avant la fin du transitoire hydraulique-gaz en question. Dans cette situation, l'Andra admet [116] que « *la vision actuelle de la zone endommagée comme une zone privilégiée pour le transfert de gaz pourrait être remise en cause si l'efficacité de l'auto-colmatage sur le long terme (fermeture des*

*fissures/fractures par le gonflement, recompaction de la zone endommagée par convergence du massif...)* conduisait à retrouver des propriétés de transfert [du gaz] proches de celles de l'argilite saine ». L'IRSN souligne par ailleurs que les mécanismes prépondérants à prendre alors en compte pour le transfert diphasique (déformation du réseau poreux par ouverture de chemins dilatants, ouverture d'interfaces, gonflement des scellements, auto-colmatage...) ne sont pas reproduits par les codes de calcul usuels tels que Tough2-MP et sont encore du domaine de la R&D. L'IRSN estime que cette difficulté pose plusieurs questions relatives notamment : (i) à la pression maximale de gaz qui pourrait être atteinte localement si les scellements de galerie s'opposaient au passage des gaz et (ii) aux effets que pourraient avoir les gaz sur la performance d'un scellement dont ils forceraient le passage à l'interface avec la roche. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que si les essais réalisés sur échantillons montrent souvent des pressions d'entrée de gaz dépassant de plusieurs dizaines de pourcents la pression de gonflement d'une bentonite (par exemple de l'ordre de 6 MPa pour un mélange pellets/poudre dont la pression de gonflement est de l'ordre de 4 MPa ; résultats similaires obtenus par Ciemat<sup>48</sup> [217]), en revanche, aucune dépendance au temps de la valeur de la pression d'entrée de gaz dans une argilite initialement endommagée n'avait été observée à long terme sur échantillons. L'IRSN souligne que le mécanisme responsable de cette « sur »-résistance au passage d'un gaz observée sur échantillons n'est pas identifié et que par conséquent, un possible effet d'échelle qui accentuerait ce phénomène pour des ouvrages de plus grande taille ne peut pas être exclu *a priori*. En conséquence, l'IRSN estime que pour la DAC, l'Andra devra évaluer l'impact des mécanismes de migration de gaz observés dans les milieux argileux proches d'une saturation totale en eau mais non pris en compte dans l'état actuel des possibilités en termes de simulations à grande échelle, par exemple par des calculs plus fins réalisés à plus petite échelle sur des modèles locaux. L'IRSN considère que pour apprécier la possibilité d'un effet d'échelle, cette évaluation pourrait nécessiter des essais sur maquettes de dimensions représentatives (plus grandes que celles d'un échantillon). Le cas échéant, si la marge dégagée entre la pression maximale de gaz atteinte dans le stockage et le risque de dégradation des performances de confinement de Cigéo s'avérait insuffisante, l'Andra pourrait envisager de spécifier une perméabilité au gaz des ouvrages de fermeture et de les concevoir en ce sens, à l'instar du *Gas-permeable Seal Test* (GAST) mené au laboratoire du Grimsel (Suisse) et auquel l'Andra est associée. Cette approche la conduirait dans ce cas à spécifier une fonction de sûreté associée aux gaz après la fermeture du stockage.

À cet égard, l'IRSN observe que la démarche retenue par l'Andra (démonstration sans fonction de sûreté associée) est très dépendante des concepts qui seront finalement retenus : le terme source (quantité et cinétique de production des gaz) dépend de la quantité et de la surface d'acier qui seront mises en place dans le stockage ainsi que de sa cinétique de corrosion, les volumes de vide et surfaces d'échange dépendent de l'architecture du stockage, la perméabilité aux gaz des ouvrages de fermeture dépend des concepts qui seront retenus (noyaux constitués de blocs précompactés, de mélanges pellets/poudre ou de « bon » remblai...) ainsi que de leur nombre et position, etc. L'inventaire stocké (déchets vitrifiés, combustibles usés, FAVL...) devrait également avoir de l'influence. Aussi, l'Andra devra régulièrement réévaluer cette démonstration en fonction des évolutions futures de Cigéo.

---

<sup>48</sup> Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

L'IRSN souligne par conséquent qu'il sera nécessaire, dans le cadre de la démonstration de l'absence d'effet des gaz sur la base des concepts définis au stade de la DAC, que l'Andra évalue l'impact :

- de pressions d'entrée non nulles sur les résultats de la simulation numérique du transitoire hydraulique-gaz et notamment, sur la valeur maximale de la pression de gaz calculée dans le stockage ;
- des mécanismes de migration de gaz observés dans les milieux argileux (notamment aux interfaces entre un noyau de scellement et une zone d'argilites plus ou moins endommagées) proches d'un état de saturation totale en eau et habituellement non pris en compte dans les simulations à grande échelle.

À cet égard, l'IRSN rappelle la demande de l'ASN émise à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » (recommandation 2011 R7 du GPD émise à l'issue de l'examen du « Dossier 2005 ») de compléter les données sur les perméabilités relatives à l'eau et au gaz par des mesures caractéristiques de la formation du Callovo-Oxfordien, et de valider, par une expérience en laboratoire souterrain, les résultats des modélisations de transfert de gaz in situ et leurs effets sur les scellements, qui reste donc à solder.

Pour ce qui concerne les incertitudes résiduelles relatives au transitoire hydraulique-gaz et l'hypothèse d'un stockage complètement saturé en eau dès l'instant initial de sa fermeture, l'IRSN estime que le caractère conservatif de cette hypothèse vis-à-vis du transport de solutés par la voie « eau », bien que possible, n'est pas démontré. En effet, l'Andra n'évalue pas à ce stade l'impact de phénomènes susceptibles d'accélérer le transport de solutés qu'elle a par ailleurs identifiés tels que l'« effet piston » exercé par le gaz sur l'eau [116] ou la possibilité de fortes succions exercées par des ouvrages en cours de resaturation sur des zones déjà resaturées (cf. cas-test WP1.2 du projet européen FORGE) ; l'IRSN souligne que d'après la chronologie actuellement connue de la resaturation du stockage, cette configuration devrait apparaître entre les zones HA (resaturées) et centrale (en cours de resaturation), et pourrait apparaître entre les zones MAVL et centrale. Néanmoins, l'IRSN convient à ce stade que selon ses propres évaluations, l'effet « piston » ne serait pas de nature à induire un déplacement conséquent de solutés. Par ailleurs, l'IRSN relève que le conservatisme supposé de cette hypothèse ne s'applique pas au transfert de radionucléides gazeux. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que le traitement quantitatif de situations spécifiques tenant compte explicitement du transitoire hydraulique-gaz de resaturation des ouvrages était prévu pour la DAC : « la comparaison des résultats avec ceux des scénarios en conditions saturées présentés dans le DOS-AF permettra de vérifier le caractère enveloppe de ces derniers. Par exemple, il s'agira d'évaluer le transport gazeux du carbone 14 ». Aussi, les réponses aux demandes de l'ASN (2014 D9 ; 2014 D7 [1]) relatives au transitoire de resaturation des ouvrages de fermeture ainsi que l'engagement 2010 E15.2 [1] relatif à la prise en compte des incertitudes concernant le transfert de gaz et le processus de resaturation du stockage dans l'évaluation de sûreté restent attendus pour la DAC. **L'IRSN souligne que ces éléments devront tenir compte non seulement de la possible surpression induite par le gaz sur l'eau dans les milieux plus ou moins capillaires (alvéoles remplis, remblais...) mais aussi des fortes succions (pressions négatives) exercées par les ouvrages en cours de resaturation (et à fortes propriétés capillaires) sur des zones déjà resaturées.**

Par ailleurs, l'IRSN rappelle que la radiolyse des matières organiques présents dans les déchets (cf. chapitre 5.4.3.3) conduit à la formation de différents gaz (H<sub>2</sub>, HCl, HF, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>...). Dans son avis du 21 septembre 2015 [177] relatif aux inventaires des matières organiques et espèces organiques complexantes dans les colis de déchets MAVL, considérant les risques de perte de confinement associés au dégagement des différents gaz (notamment corrosion

interne du conteneur et montée en pression à l'intérieur du colis), l'IRSN estimait que la totalité du terme source « gaz » devait être évaluée et l'absence de conséquences sur le caractère confinant du colis démontrée.

Enfin, l'IRSN observe qu'il conviendrait d'évaluer l'impact de l'effet des micro-organismes sur la production de gaz. En particulier, la réaction de réduction dissimilative des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) en présence de bactéries nitrato-réductrices (NRB) et/ou sulfato-réductrices (SRB) sera suivie des réactions de dénitrification qui vont produire des espèces gazeuses azotées ( $\text{N}_2$ ), dont l'Andra n'évalue pas les quantités pouvant être produites. L'Andra a en effet indiqué au cours de l'instruction qu'« *en ce qui concerne les conséquences de la consommation ( $\text{H}_2$ ) et de la production de gaz ( $\text{N}_2$ ...) sur le transitoire hydraulique/gaz dans les alvéoles MA-VL, aucune étude n'a été réalisée à ce jour* ».

En conclusion, l'IRSN estime qu'au-delà des premiers milliers d'années pendant lesquelles les ouvrages de fermeture se saturent, la possibilité pour les gaz de traverser aisément et sans dommage des ouvrages de fermeture quasi-saturés doit être confortée et que ce complément de démonstration qui est à apporter pour la DAC nécessitera de prendre en compte une phénoménologie plus fine que celle actuellement prise en compte à l'échelle du stockage, voire la réalisation d'essais sur maquettes de dimensions représentatives. L'IRSN rejoint sur ce point la conclusion de la revue du groupe d'experts réunis par l'AIEA effectuée à l'automne 2016 [8], qui « *a identifié quelques secteurs qui permettraient de renforcer la base de connaissances existante de l'Andra [...] : Production et transport de gaz* ». Par ailleurs, l'IRSN estime que l'Andra devra finaliser pour la DAC les études en cours, notamment celles relatives à la prise en compte explicite du transitoire de resaturation du stockage par rapport à l'hypothèse supposée pénalisante d'une resaturation immédiate de celui-ci, pour les évaluations quantitatives de sûreté après fermeture. L'IRSN rejoint encore sur ce point la conclusion de la revue de l'AIEA effectuée à l'automne 2016 [8], qui « *a identifié quelques secteurs qui permettraient de renforcer la base de connaissances existante de l'Andra [...] : Incertitudes liées au temps de resaturation des alvéoles de stockage et effet sur la dégradation des colis de déchets* ». Enfin, l'IRSN rappelle que la totalité du terme source gaz doit être évaluée afin de montrer son absence de conséquences sur le caractère confinant des colis MAVL et que l'influence des micro-organismes doit être prise en compte.

### 5.4.3 TRANSITOIRES CHIMIQUES

Dans le présent chapitre portant sur l'évolution des matériaux argileux due aux transitoires chimiques, l'IRSN examine l'impact de la perturbation alcaline produite par les composants en béton (cf. chapitre 5.4.3.1), puis de celles induites par les colis de déchets salins MAVL (cf. chapitre 5.4.3.2) et par les colis de déchets MAVL contenant des matières organiques (cf. chapitre 5.4.3.3). Les perturbations liées à la réactivité de l'hydrogène produit par corrosion et par radiolyse (cf. chapitre 5.4.3.4) ainsi qu'à l'activité bactérienne (cf. chapitre 5.4.3.5) sont ensuite analysées.

S'agissant des perturbations des argiles liées à la présence de composants en acier (interactions fer/argiles), l'IRSN constate que l'Andra n'a pas présenté, au stade du DOS, d'actualisation de ses connaissances depuis les « Dossier 2005 » et « Dossier 2009 », outre une estimation de l'extension de la zone reminéralisée d'ordre pluri-centimétrique et non plus décimétrique qui conforte le caractère local de cette perturbation autour des ouvrages du stockage, ce dont l'IRSN convient. En outre, les évolutions récentes du concept d'alvéoles HA font à présent intervenir un matériau de remplissage entre le chemisage en acier et l'argilite du Callovo-Oxfordien (qui ne devraient donc plus

être en contact direct) ; le matériau constituant le bouchon argileux n'est quant à lui pas défini à ce stade. Aussi, les perturbations induites par les interactions fer/argiles ne sont pas examinées plus avant dans le présent rapport.

#### **5.4.3.1 Perturbation alcaline par les bétons**

L'Andra indique [40] que « *les principaux processus pilotant les interactions bétons/argilites sont acquis* » et que les évaluations de l'extension de la perturbation alcaline dans les argilites, en conditions saturées, montrent « *une borne maximale de quelques dizaines de centimètres pour la zone fortement reminéralisée et d'ordre métrique pour la zone faiblement perturbée, sur la centaine de milliers d'années. La perturbation reste ainsi confinée au sein des argilites endommagées (ZFC et ZFD) et n'impacte pas le COX sain* ». L'Andra ajoute que le béton bas pH « *contribue à [...] une limitation de l'effet chimique du béton sur le noyau argileux [de scellement]* ».

L'IRSN convient que les principaux processus géochimiques régissant l'évolution des argilites sous un panache alcalin sont maintenant compris et rappelle, comme indiqué dans le cadre de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture » en 2014, que les ordres de grandeur d'extension de la perturbation alcaline donnés par l'Andra sont cohérents avec les observations expérimentales et modélisations effectuées par l'IRSN, cette extension étant beaucoup plus limitée pour un béton bas pH que dans le cas d'un béton CEM I [30]. **Cependant, l'IRSN considère qu'il convient de rester prudent sur l'impact qu'ont ces transformations sur la structure de la roche et sur les propriétés de transport, notamment aux interfaces.**

En effet, l'IRSN soulignait, à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » et du dossier « Ouvrages de fermeture », que des incertitudes demeuraient pour ce qui concerne l'influence d'hétérogénéités sur la propagation de la perturbation alcaline. A cet égard, dans le cadre de ses récents travaux (projet CEMTEX), l'IRSN a observé que l'évolution des propriétés hydrodynamiques (microstructure notamment) était fortement dépendante de la nature des interfaces et des hétérogénéités locales pouvant conduire à des voies préférentielles de transfert parallèles à l'interface. A ce jour, ce type de paramètres n'est pas pris en compte dans les modélisations. En outre, les travaux précités de l'IRSN conduisent également à des résultats nuancés quant à la limitation de la perturbation alcaline. En effet, l'impact de la mise en place d'un béton bas pH coffré ou projeté contre l'argilite est très différent de celui d'un même béton mis en contact sous la forme d'un bloc. Dans ce dernier cas en effet, les évolutions sont similaires à celles modélisées car il s'agit d'un béton mature, dont la matrice est à l'équilibre avec les objectifs chimiques visés (faible alcalinité, pH faible). Dans le cas d'un matériau coulé au contact de la roche, celui-ci n'est pas initialement à l'état de « bas pH » mais reste très alcalin avec un pH élevé lors des premières semaines. Les résultats obtenus par l'IRSN montrent une dissolution forte des argiles au contact après 1 an sur près d'1 mm, ce qui ne peut pas être représenté par un modèle négligeant l'état d'hydratation du matériau. La surface de l'argilite (comme la surface du béton) est altérée avec des ouvertures de porosité, entraînant la création de voies préférentielles de transfert parallèles à l'interface. L'IRSN convient néanmoins que l'intensité de la perturbation alcaline devrait s'amenuiser au cours du temps de façon plus marquée que dans le cas d'un béton CEM I. **Ainsi, s'il est vraisemblable que l'extension des transformations minéralogiques dans l'argilite dues à la perturbation alcaline provoquée par la présence de béton bas pH reste proche de l'interface, l'IRSN considère que des voies préférentielles de transfert de ce panache entraînant une dissolution des phases argileuses peuvent se former parallèlement à l'interface, suivant la stratification de la roche dans les zones endommagées (ZFC et ZFd).**

A cet égard, l'IRSN relève que l'Andra retient, pour les argilites endommagées (ZFC et ZFd), les propriétés géochimiques de l'argilite saine dans les scénarios d'évolution du stockage utilisés en support à l'évaluation de

sûreté après fermeture (calculs de transport de radionucléides). Or, les modifications minéralogiques dans la zone « fortement reminéralisée » dues à la perturbation alcaline peuvent modifier les propriétés de rétention de ces zones altérées au regard de celles de l'argilite saine et l'augmentation sensible de la valeur du pH dans la zone « faiblement perturbée » peut également modifier la nature de la phase solide contrôlant la solubilité d'un radionucléide ou d'un toxique chimique. Compte tenu des extensions de la perturbation alcaline mentionnées ci-dessus d'une part et de la création de voies préférentielles de transfert d'autre part, l'IRSN estime que les effets de cette perturbation sur l'argilite endommagée (ZFC et ZFd) devraient être pris en compte dans les calculs de transport en appui à l'évaluation de sûreté après fermeture. D'autres perturbations chimiques pourraient également être générées au niveau de l'argilite endommagée (ZFC et ZFd) et impacter ses propriétés de confinement ; selon la configuration des alvéoles HA ou MAVL, comme celles liées à la présence d'aciers, aux panaches salin (cf. chapitre 5.4.3.2) et organique (cf. chapitre 5.4.3.3), à l'hydrogène de corrosion et/ou de radiolyse (cf. chapitre 5.4.3.4), ainsi qu'à une activité bactérienne (cf. chapitre 5.4.3.5). Aussi, les propriétés de confinement hydraulique et chimique assignées dans les scénarios d'évolution du stockage aux zones d'argilites endommagées (ZFC et ZFd) doivent tenir compte de l'ensemble des perturbations chimiques qui pourraient prendre place dans ces zones.

En conséquence, l'IRSN estime que, dans le dossier de DAC, l'Andra devra s'assurer que les propriétés de transport assignées aux zones d'argilite endommagée (ZFC et ZFd) dans les évaluations des scénarios d'évolution du stockage soient bien enveloppées des potentiels effets des différentes perturbations chimiques qui pourraient prendre place dans ces zones. Ce point fait l'objet de l'engagement E22-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Enfin, l'IRSN souligne que, dans le cadre de ses programmes de recherche [159], un relargage important de carbone organique lié à la dissolution de la matière organique d'une roche argileuse (argilite de Tournemire) sous panache alcalin a été mis en évidence (augmentation d'un facteur 7 en solution). L'IRSN s'interroge sur l'importance de ce phénomène de relargage de carbone sur l'activité bactérienne, notamment à proximité du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage des alvéoles HA. Ce point est traité dans le chapitre 5.2.1 relatif à la corrosion des aciers.

#### **5.4.3.2 Perturbation saline par les déchets salins MAVL**

L'Andra présente [220] les connaissances qu'elle a acquises relatives à l'impact, sur les argilites du Callovo-Oxfordien, de fortes teneurs en sels solubles de type nitrates et sulfates issus des colis de déchets C5 et des colis de boues bitumées. Les études ont consisté en des expérimentations sur l'évolution de la physico-chimie des argilites, notamment de leurs propriétés de rétention et d'insolubilisation des radionucléides, ainsi que des modélisations à grande échelle, afin de :

- vérifier la prédominance du processus de transport par diffusion au regard de ceux induits par d'autres processus tels que l'osmose chimique<sup>49</sup> et l'électrodifusion<sup>50</sup> ;
- évaluer l'extension du panache salin et le transfert des radionucléides par diffusion, depuis l'emplacement initial du déchet dans un alvéole MAVL après resaturation du stockage.

<sup>49</sup> L'osmose chimique ou chémo-osmose est causée par une différence de concentration de solutés entre deux milieux séparés par un semi-perméable ; elle implique une augmentation de pression proportionnelle à la concentration des solutés et engendre un mouvement d'eau et non de ces solutés (à la différence de la diffusion) du milieu le moins concentré vers celui plus concentré.

<sup>50</sup> L'électrodifusion correspond à un flux de solutés sous gradient de potentiel électrique

Le présent examen porte sur l'ensemble de ces éléments bien que la production du colis C5 et le stockage de colis de boues bitumées soient à ce jour remis en cause (cf. respectivement chapitres 3.1.3 et 7.2.1.7 du présent rapport).

**Impact du gradient de salinité entre un alvéole MAVL resaturé et la roche hôte sur les mécanismes de transport**

L'Andra [220] indique que d'importants gradients de salinité entre un alvéole MAVL chargé en sels ( $I \gg 0,1 \text{ M}$ ) et la roche hôte peuvent induire, outre la diffusion, d'autres mécanismes de transport dont l'électrodifusion et l'osmose chimique. L'Andra précise, sur la base de ses travaux de modélisation, que le phénomène d'osmose peut accélérer la resaturation en eau du milieu (milieu resaturé après 200 ans à 100 % avec le phénomène d'osmose et à 15 % sans ce phénomène). Une fois le milieu resaturé en eau, les phénomènes d'osmose chimique et d'électrodifusion pourraient engendrer des flux cationiques (électrodifusion) ou des flux d'eau (osmose) de la roche hôte vers l'alvéole MAVL. S'agissant de l'électrodifusion, l'Andra indique, sur la base de résultats d'essais sur échantillons, que pour les conditions de concentrations imposées par le relâchement des sels d'un alvéole MAVL, le potentiel électrique entre l'alvéole MAVL et l'argilite serait de l'ordre de quelques dizaines de millivolts, ce qui induirait des flux diffusif et contre-diffusif (ions provenant de la roche) du même ordre de grandeur. L'IRSN prend note de ces récents résultats expérimentaux et considère que leur interprétation (origine physique, conséquences en termes de transport de solutés à l'échelle du pore et à celle du stockage...) mériterait d'être approfondie. Un tel phénomène d'électrodifusion, s'il était avéré à grande échelle, ne devrait toutefois pas modifier significativement la diffusion globale des solutés depuis l'alvéole MAVL vers les argilites.

S'agissant de l'effet osmotique, si les résultats des essais précités montrent qu'un flux osmotique se mettrait en place (avec un potentiel osmotique évalué par l'Andra à plusieurs dizaines de MPa dans les alvéoles de déchets C5), l'Andra estime que « la différence de pression hydraulique entre l'eau [salée] des alvéoles et celle de la formation géologique sera inférieure à cette différence de potentiel osmotique parce que d'une part la concentration ionique tend à s'équilibrer par diffusion des solutés et d'autre part, d'autres processus de transfert peuvent intervenir, en particulier la perméabilité [convection hydraulique], qui tendent à limiter l'efficacité du processus osmotique » [220]. Le rapport entre le gradient de pression hydraulique et le potentiel osmotique correspond au « coefficient d'efficacité osmotique », estimé par l'Andra d'après des mesures *in situ* au Laboratoire souterrain à 0,1. L'Andra conclut de ses études que les effets osmotiques induits par la présence de déchets salins produisent des surpressions en eau de l'ordre du MPa ( $10 \text{ MPa} \times 0,1$ ) au bout de quelques dizaines de milliers d'années, « ce qui ne devrait pas avoir de conséquences significatives ». A cet égard, comme indiqué au chapitre 4.5.2 du présent rapport, l'IRSN estime que la surcharge hydraulique d'environ 0,5 MPa mesurée dans la formation hôte non perturbée, dont l'osmose chimique est probablement l'un des contributeurs, peut avoir un impact sur le transfert des radionucléides. Les évaluations d'impact du stockage après fermeture réalisées par l'IRSN, présentées au chapitre 8.2 et en Annexe T17, montrent en effet que cette surcharge influe sur les transferts de radionucléides pour la voie par les ouvrages notamment lorsque les scellements sont défailants. En tout état de cause, l'IRSN considère que la surcharge hydraulique mesurée dans la formation hôte pourrait être augmentée par le flux d'eau d'origine osmotique engendré par les importantes quantités de sels mises en solution par les déchets salins MAVL. Aussi, l'IRSN considère qu'il conviendrait que l'Andra évalue l'incidence possible, dans son évaluation de sûreté après fermeture, d'un excès de charge hydraulique d'origine osmotique sur le transfert des solutés dans le cas où les colis présentant de fortes teneurs en sels seraient stockés dans l'installation

**Cigéo.** Cette conclusion vient en complément de celle présentée au chapitre 4.5.2 du présent rapport, ayant conduit à l'engagement E9-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017.

**Influence de la concentration des sels dissous sur les propriétés de diffusion et de rétention dans la roche hôte**

S'agissant des effets de la « perturbation saline » liée à une augmentation de la concentration des sels dissous dans l'eau porale des argilites du Callovo-Oxfordien, l'Andra indique [220] que les effets suivants sur la rétention et la diffusion des radionucléides dans la roche hôte ont été investigués expérimentalement :

- les cations associés aux sels solubles (Na, K, Mg essentiellement) peuvent perturber la rétention de radionucléides qui migrent sous formes de cations alcalins (K, Rb et Cs) et alcalino-terreux (Be, Ca et Ra) et interagissent avec les minéraux argileux majoritairement par un mécanisme d'échange d'ions. L'augmentation de la concentration en sels dissous entraîne une diminution des valeurs de diffusion (De) et de rétention (Kd) des radionucléides alcalins et alcalino-terreux, qui sont sensibles aux échanges cationiques. Sur ce sujet, les travaux expérimentaux menés par l'Andra [220] ont notamment mis en évidence une diminution du Kd du césium d'un facteur 6-7 entre une eau de pore du Callovo-Oxfordien et la même eau à laquelle l'Andra a ajouté du NaNO<sub>3</sub> à la concentration de 1 mol/L. Les expériences tendent par ailleurs à montrer que cet effet n'est pas observé pour les cations dont la sorption est dominée par la complexation de surface ;
- l'augmentation de la salinité et donc de la force ionique (nitrates, sulfates) réduit le phénomène d'exclusion anionique<sup>51</sup> dans la roche et accélère ainsi la diffusion, au sein des argilites, de radionucléides se trouvant sous forme d'anions (<sup>36</sup>Cl par exemple). Sur ce point, des essais de diffusion réalisés au sein des argilites du Callovo-Oxfordien avec une eau de pore enrichie en sels de nitrates [220] montrent que pour le <sup>36</sup>Cl, la porosité accessible à la diffusion est augmentée de 40 % et le De est augmenté de 50 % par rapport à l'eau de pore du Callovo-Oxfordien.

L'IRSN estime que ces expérimentations contribuent à améliorer la connaissance des paramètres de transport en milieu argileux en présence d'une charge saline et encourage l'Andra à poursuivre ces investigations, par exemple en menant des essais *in situ* afin d'identifier notamment les éventuels effets d'échelle.

En outre, des modélisations [220], qui intègrent les résultats des essais précités, montrent que le panache des nitrates s'étend jusqu'à une quinzaine de mètres dans le Callovo-Oxfordien au bout de 10 000 ans. Toutefois, les concentrations en nitrates estimées dans la roche hôte par modélisation diminuent rapidement avec la distance et ne sont donc pas, selon l'Andra, de nature à modifier les propriétés de rétention de la roche. Ainsi, le césium, l'uranium et le plutonium (radionucléides faisant l'objet de la modélisation) demeurent retenus dans les argilites en champ proche des alvéoles MAVL. L'Andra ne présente toutefois pas d'analyse particulière à l'échelle locale des zones endommagées (ZFC et ZFd) par le creusement dans la roche hôte. Aussi, l'IRSN convient que le panache des nitrates ne devrait pas modifier les propriétés de rétention de la roche hôte au-delà des premiers mètres autour des

---

<sup>51</sup> L'exclusion anionique est un phénomène qui ralentit la diffusion des anions en raison d'une réduction de la porosité accessible aux anions du fait des charges négatives en paroi des pores.

alvéoles MAVL mais qu'il conviendrait que l'effet du panache sur les propriétés de transport dans ces zones endommagées soit précisé.

Par ailleurs, cette modélisation montre que le panache des sulfates relâchés par les colis est « stoppé » dans les ouvrages. En effet, les sulfates sont totalement consommés par les matériaux cimentaires (conteneur de stockage, béton des ouvrages) induisant une modification minéralogique majeure (précipitation d'ettringite) de ces derniers, dont les potentiels effets en termes de contraintes mécaniques sur la roche hôte sont abordés dans le chapitre 5.3.2 du présent rapport. L'Andra conclut que les sulfates ne devraient donc pas modifier significativement les propriétés de rétention de la roche hôte.

L'IRSN estime que cette modélisation tient bien compte des capacités actuelles de représentation par simulation des milieux fortement salins et relève que les conditions de force ionique explorées sont conservatives puisqu'elles correspondent à des solutions salines attendues dans les alvéoles MAVL sans tenir compte d'un effet de dilution spatiale. Bien que ces modélisations soient limitées à un nombre restreint de radionucléides, les premiers effets observés du panache salin sont peu significatifs sur les propriétés de confinement « en grand » du Callovo-Oxfordien (i.e., sur toute l'épaisseur de la couche). Toutefois, l'IRSN considère que l'influence de cette perturbation dans les zones d'argilites endommagées (ZFC et ZFd) devrait être plus précisément évaluée pour caractériser, dans ces zones, les propriétés de rétention à retenir le cas échéant dans l'évaluation de sûreté après fermeture. Cette conclusion est reprise dans celle présentée chapitre 5.4.3.1 du présent rapport, ayant conduit à l'engagement E22-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017.

#### Limite de solubilité des radionucléides

Des calculs de solubilité, visant à évaluer si les radionucléides piégés par les sels dans les déchets salins conservent un caractère insoluble dans le milieu argileux autour des alvéoles MAVL, ont été effectués par l'Andra [220] selon la même approche que celle décrite au chapitre 5.3.2 relatif à l'évolution des bétons sous une perturbation saline. Ces calculs, qui montrent la faible solubilisation des radionucléides issus des déchets salins, n'appellent pas d'autre remarque de la part de l'IRSN que celles formulées au chapitre 5.3.2 précité.

#### Programme d'études

Afin de réduire les incertitudes concernant l'extension du panache salin dans les argilites et la spéciation des radionucléides, l'Andra indique [220] que la poursuite des études visera notamment à compléter les modèles d'activité ionique permettant de définir le comportement des éléments majeurs et des radionucléides en solution et à établir des modèles d'interaction au sein des solides et en solutions interstitielles, de façon à correctement appréhender les modèles de transfert réactif. L'IRSN estime que ces perspectives vont dans le sens de la consolidation de l'état des connaissances actuelles, qu'il convient de renforcer afin de préciser l'influence de la perturbation saline dans les premiers mètres de la roche hôte, correspondant à la zone d'argilites endommagées en raison de leur rôle singulier dans le transport global des radionucléides.

### **5.4.3.3 Perturbation organique par les déchets MAVL**

Certains colis de déchets MAVL contiennent des matières organiques et sont rassemblés dans la catégorie physico-chimique MAVL3 [40], c'est-à-dire qu'ils ne sont pas considérés comme pouvant être stockés avec d'autres types de colis de déchets MAVL dans un même alvéole. Ces matières organiques peuvent être des déchets celluloseux, des complexants issus de la séparation ou du démantèlement, tels que, par exemple, le tributylphosphate (TBP) et

l'éthylène diamine tétra-acétique (EDTA), des résines échangeuses d'ions (REI), des polymères tels que le polychlorure de vinyle (PVC), etc. Des matières organiques peuvent également être présentes dans les matériaux constitutifs des colis : adjuvants organiques entrant dans la formulation des matériaux cimentaires, bitumes, fibres, etc. Ces matières organiques subissent plusieurs processus de dégradation sous l'effet de l'irradiation et de la lixiviation conduisant notamment à la formation de produits de dégradation hydrosolubles (PDH). Ces derniers sont des complexants potentiels des radionucléides pouvant, en conditions de stockage, augmenter leur solubilité et/ou modifier leur rétention dans l'argilite [40].

Parmi les PDH, l'Andra identifie en particulier l'acide iso-saccharinique (ISA) produit par la dégradation de la cellulose et les phtalates relâchés lors de la dégradation du PVC. L'Andra indique que le pouvoir de complexation de ces molécules commence à être sensible lorsque la concentration en ISA est supérieure à  $10^{-4}$  mol/L ou que la concentration en phtalates est supérieure à  $10^{-3}$  mol/L dans les argilites. Des évaluations de panaches en ISA et en phtalates en champ proche des alvéoles MAVL contenant des déchets organiques ont été réalisées par l'Andra [40]. Ces évaluations ont considéré les inventaires en cellulose (source d'ISA) et en PVC (source des phtalates) des différents types de déchets, les modèles de dégradation des déchets et des matériaux, les modèles de transfert dans ces matériaux et les modèles de réactivité de l'ISA et des phtalates dans les ouvrages et en champ proche. La famille de colis de déchets considérée est la famille CEA-050, dont l'inventaire en cellulose et en PVC est le plus important (au moment de l'évaluation en 2013) parmi les différentes familles de colis rattachés à la catégorie physico-chimique MAVL3. Les concentrations présentées ci-avant sont atteintes, d'après les résultats de ces évaluations, au sein de panaches d'une extension au maximum d'1 m pour l'ISA et de l'ordre de 15 m pour les phtalates, avec une influence prépondérante des processus de rétention ces produits organiques dans les matériaux cimentaires. En outre, dès lors qu'aucune propriété de sorption n'est retenue pour les molécules organiques dans les argilites, les modélisations indiquent que le panache organique se développe dans le Callovo-Oxfordien pour atteindre à  $10^5$  ans les concentrations susmentionnées ( $10^{-4}$  mol/L en ISA et  $10^{-3}$  mol/L en phtalates) à 50 m de l'alvéole, cette distance étant celle retenue à ce stade comme distance de garde entre les alvéoles MAVL [55].

L'IRSN estime que le choix des PDH complexants (ISA et phtalates) retenus par l'Andra pour l'évaluation de l'extension du panache organique est pertinent compte tenu de la présence en quantité importante de cellulose et de PVC dans les différentes familles de colis rattachés à la catégorie physico-chimique MAVL3 d'une part, et du pouvoir complexant connu de ces espèces vis-à-vis de certains radionucléides d'autre part. S'agissant de l'extension du panache organique et de la distance de garde retenue entre les alvéoles MAVL, l'IRSN considère que l'évaluation ne retenant aucune propriété de sorption des molécules organiques dans les argilites est pénalisante. Aussi, le panache à 50 m de l'alvéole ne devrait pas atteindre des seuils critiques de concentrations en PDH complexants et l'espacement de 50 m entre alvéoles actuellement retenu par l'Andra apparaît donc suffisant afin de s'affranchir de l'impact de la perturbation organique sur le transport des radionucléides issus de déchets stockés dans les autres alvéoles. Cette étude révèle cependant le besoin de préciser les processus de rétention des radionucléides en présence de PDH complexants. Ce point est repris ci-après.

Selon l'Andra, les évaluations actuelles de panache organique sont très sensibles aux termes sources déchets, c'est-à-dire à la nature et la quantité des PDH issus de la dégradation des déchets. L'Andra précise qu'elle ne dispose « *pas encore d'un modèle rendant compte du comportement d'un cocktail d'organiques dissous* ». A cet égard, l'IRSN a relevé dans son avis du 21 septembre 2015 [177] relatif aux inventaires des matières organiques et espèces organiques complexantes dans les colis de déchets MAVL du CEA dont fait partie la famille CEA-050, que la

détermination de l'inventaire des PDH formés s'avérait incomplet en raison de difficultés analytiques associés à la détermination de ceux-ci. De plus, l'IRSN a constaté que de nombreux mécanismes restaient à étudier, tant pour la formation des complexes que pour leur transfert au sein du stockage puis leur rétention dans la roche hôte. A cet égard, l'IRSN rappelle qu'il considérait, dans l'avis précité, que l'étude de la complexation des radionucléides par les PDH devrait également prendre en compte la compétition entre les radionucléides et le calcium et le fer dans la formation des complexes, la diversité des complexes pouvant se former (du fait d'un mélange de polymères représentatifs de la composition des colis de déchets MAVL) ainsi que des proportions solide/solution représentatives des conditions de stockage à long terme. Ce point fait l'objet d'une demande de l'ASN formulée dans son avis du 25 février 2016 relatif aux études sur la gestion des déchets HA et MAVL remises en application du PNGMDR 2013-2015 [6].

S'agissant de l'influence des adjuvants entrant dans la composition des matériaux cimentaires (retardateurs ou accélérateurs de prise, plastifiants réducteurs d'eau, super plastifiants, etc.) dans la limite de 5 % en masse (correspondant à la norme NF EN 934-2), l'Andra a conduit des essais en solution cimentaire et également sur des matériaux cimentaires pour lesquels l'adjuvant a été introduit lors de la gâchée [83]. Ceux-ci révèlent qu'en solution, certains d'entre eux ont un impact significatif sur la rétention des radionucléides sans toutefois que l'état des connaissances actuel permette de quantifier l'effet des adjuvants sur la solubilité et la rétention des radionucléides dans le matériau étudié.

Enfin, au cours de l'instruction l'Andra a indiqué que les études sur les interactions entre molécules organiques et radionucléides se poursuivent dans le cadre du Groupement de Laboratoires « Chimie et Transfert dans les Environnements Complexes ». Un programme d'étude a été défini sur la période 2015-2018 dont les objectifs sont la consolidation de la hiérarchisation des systèmes et des modèles de corrections de paramètres de transfert des radionucléides, en ciblant les radionucléides tétravalents et hexavalents et les « cocktails » de molécules organiques (issus des déchets, des adjuvants...), la consolidation des données et des modèles sur le transfert des molécules organiques et l'évaluation de la réactivité biotique et abiotique des molécules organiques en milieux cimentaires. Par ailleurs, l'Andra prévoit de réaliser en 2019 au Laboratoire souterrain un essai d'injection *in situ* de complexes radionucléides/organiques dans les argilites, similaire à l'essai DIR. **L'IRSN estime qu'un tel programme devrait, dans son principe, permettre de compléter les connaissances sur la perturbation organique dans les matériaux argileux, avec une meilleure connaissance du terme source des molécules complexantes (provenant des matériaux cimentaires, des déchets...), et ainsi réduire les incertitudes identifiées ci-dessus.**

#### **5.4.3.4 Réactivité de l'hydrogène de corrosion et de radiolyse**

Ainsi qu'indiqué précédemment (cf. chapitre 5.4.2), après la fermeture du stockage, la corrosion anoxique des composants métalliques et la radiolyse de certains déchets MAVL produisent de l'hydrogène sur une période de plusieurs dizaines de milliers d'années ; une majeure partie de ces gaz diffuse dans les argilites.

L'Andra considère [40] que la réactivité de l'hydrogène dissous, en particulier avec la pyrite, ne modifie pas significativement la minéralogie du Callovo-Oxfordien ni ses conditions redox « en grand » et reste donc sans effet significatif sur les propriétés de transport (limites de solubilité « Csat » et coefficients de distribution « Kd ») des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien. L'Andra conclut ainsi à l'absence d'effet « en grand » de l'hydrogène dissous sur les propriétés de transport du Callovo-Oxfordien. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que le terme

« en grand » se rapporte à l'épaisseur de la formation hôte et que du point de vue réactionnel, la réactivité de l'hydrogène (réduction de pyrite en pyrrhotite) n'implique pas automatiquement d'effet sur le pH.

L'IRSN convient du faible impact de cette perturbation sur les propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien mais souligne néanmoins que des modifications de pH à proximité immédiate des ouvrages de stockage ne sont pas totalement exclues et que celles-ci pourraient affecter le transfert de radionucléides notamment par la voie « ouvrages », via les zones d'argilites endommagées (ZFC et ZFd). Ce point fait l'objet de l'engagement E22-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 présenté au chapitre 5.4.3.1 relatif à la perturbation alcaline.

#### 5.4.3.5 Impact des bactéries

L'Andra indique [116], sur la base d'études canadiennes et suédoises, qu'« *il a été établi que certaines souches peuvent survivre en situation de stress liée à une suppression et un manque d'eau, mais que ces bactéries ne peuvent que difficilement se reproduire au sein des bentonites compactées* ». En outre, « *pour les roches argileuses telles que l'argilite du Callovo-Oxfordien ou l'argile à Opaline en Suisse, les tailles de pores nano à microscopiques ne permettent pas un développement bactérien significatif à cause d'un manque d'espace, d'eau libre ou de nutriments* ». En conséquence, l'Andra indique [40] que « *dans les scénarios, aucun effet d'une activité bactérienne n'est retenu dans la masse des composants en béton, dans le COx et dans les noyaux argileux de scellements* ».

L'IRSN estime que les micro-organismes autochtones présents dans la roche qui, dans les conditions de manque d'espace et d'eau (nutriments) sont en phase de « sommeil », peuvent se réveiller et se multiplier dès lors que de la place et des nutriments leur sont apportés par l'intervention humaine (e.g., Urios et al., 2012 [227]). En outre, tous types de micro-organismes allochtones sont susceptibles d'être introduits dès les opérations d'excavation puis durant l'exploitation du stockage. L'Andra a d'ailleurs précisé au cours de l'instruction qu'« *un développement d'activité microbiologique est constaté de façon systématique dans les forages en eau du laboratoire souterrain (forages PAC et POX par exemple). Ce développement est constaté même quand les forages ont été réalisés avec des outils propres qui ont été désinfectés avant et pendant le carottage* ». Aussi, malgré les efforts techniques envisagés par l'Andra pour limiter la présence de vides technologiques dans le champ proche (à l'interface argilite/béton) des alvéoles (HA et MAVL), l'IRSN considère qu'il n'est pas possible de garantir une mise en place des différents matériaux cimentaires (béton projeté, matériau de remplissage HA) excluant toute hétérogénéité de remplissage ou formation de « poches de vide » permettant le développement de micro-organismes.

A cet égard, l'IRSN rappelle qu'il a observé, dans le cadre de ses programmes de recherche [159], un relargage important de carbone organique lié à la dissolution de la matière organique sous panache alcalin (augmentation d'un facteur 7 en solution), qui pourrait être un phénomène pour l'activité bactérienne, notamment à proximité du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage des alvéoles HA. Ce point est traité dans le chapitre 5.2.1 relatif à la corrosion des aciers.

Par ailleurs, l'IRSN note que des bilans en hydrogène observés lors de l'expérience HT (*Hydrogen Transfer*) réalisée au Mont-Terri (Vinsot et al., 2014 [203]) ainsi que lors d'essais de diffusion d'hydrogène réalisés sur échantillons au SCK-CEN dans le cadre du projet européen FORGE (Jacops et al., 2015 [204]), corroborés par des simulations géochimiques réalisées à l'IRSN (Lassin et al., 2012 [205]) montrent qu'une perturbation chimique liée à l'activité bactérienne lors d'un écoulement prolongé de gaz (nutriment) ne peut pas être exclue.

S'agissant des conséquences d'une activité bactérienne, l'IRSN considère en particulier que les bactéries ferri-réductrices (IRB) déstabilisent les minéraux argileux (principalement smectite) par réduction du Fer (III) structural

des couches octaédriques en Fer (II). Cette réduction a plusieurs impacts sur les propriétés des smectites : (i) la diminution de leur surface réactive ou l'augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC) (phénomènes opposés), (ii) la diminution de leur aptitude à gonfler dans l'eau et (iii) l'augmentation de leur susceptibilité vis-à-vis des phénomènes de dissolution (Stucki & Kostka, 2006 [145], Esnault et al., 2013 [146]). En conséquence, la capacité d'« autocolmatage » ou d'« autocatrisation » de l'argilite du Callovo-Oxfordien pourrait être diminuée. Ainsi, la ZFC pourrait présenter suffisamment d'espace pour permettre le développement et la migration de différentes populations bactériennes. Or, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que « *la possibilité de migration ne pourrait-être envisagée que dans un milieu présentant une porosité importante et des conditions de transport convectives. Ces conditions n'étant pas réunies dans les scénarios d'évolution altérée, la migration des bactéries n'est pas représentée* ». L'IRSN rappelle que les incertitudes actuelles sur la resaturation de l'argilite endommagée, du point de vue spatial et temporel, ne permettent pas de statuer sur l'importance d'un éventuel développement bactérien. Ce point fait l'objet de l'engagement E22-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 présenté au chapitre 5.4.3.1 relatif à la perturbation alcaline.

Par ailleurs, en présence de bactéries nitrato-réductrices (NRB) et/ou sulfato-réductrices (SRB), la réduction d'importantes quantités de sels nitrates ( $\text{NaNO}_3$ ) ou sulfatés ( $\text{NaSO}_4$ ), provenant de déchets salins MAVL (cf. chapitres 5.3.2 et 5.4.3.2), entraîne une modification des conditions oxydoréductrices du milieu argileux naturellement réducteur ( $E_h \sim -180$  mV pour  $\text{pH} \sim 7,2$ ). En effet, la réduction des nitrates (et/ou des sulfates) s'accompagne d'une possible oxydation de certains radionucléides sensibles aux conditions d'oxydo-réduction (comme par exemple le Se, Tc, U, Np, Pu...). Cette oxydation est susceptible de faire évoluer la spéciation de ces radionucléides ainsi que leur solubilité et donc, leurs propriétés de transfert. A cet égard, le programme d'études de l'Andra mentionné au chapitre 5.4.3.2 inclut l'influence d'une activité bactérienne sur les transitoires oxydoréducteurs induits par les sels, **ce qui est satisfaisant.**

Enfin, s'agissant des ouvrages de scellement, l'Andra indique [116] que « *ni une réduction significative du Fe(III) des smectites, ni une réduction du pouvoir de gonflement n'ont été observées pour une argile compacte de densité sèche de  $\sim 1.3$  g/cm<sup>3</sup> (la densité d'un ouvrage de scellement étant de l'ordre de 1,4 à 1,8 g/cm<sup>3</sup>)* » et que « *l'activité [microbienne] se concentrera donc sur les interfaces* ». L'IRSN convient que l'activité microbienne devrait se limiter aux interfaces, où elles ont la place pour se développer et que si l'activité microbienne a un impact sur la capacité de gonflement de la bentonite, celui-ci devrait être *a priori* relativement localisé. Néanmoins, l'IRSN souligne, comme dans son examen du dossier « Ouvrages de fermeture », que les vides résiduels au sein des ouvrages de scellement et la présence de matière organique dans les bétons bas pH (possiblement plus importante que dans les bétons classiques), pourraient favoriser le développement de microorganismes. A cet égard, l'IRSN rappelle la demande de l'ASN 2014 D12 de démontrer que l'activité des bactéries ne remettra pas en cause la performance des scellements.

## REFERENCES

- [1] Saisine de l'Autorité de Sûreté Nucléaire ASN CODEP-DRC-2016-021886 du 2 août 2016.
- [2] Lettre ASN CODEP-DRC-2014-039834 du 19 décembre 2014 - Options de sûreté du projet Cigéo.
- [3] Guide de sûreté de l'ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde - février 2008.
- [4] Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base (NOR : DEVP1202101A, version consolidée du 05/02/2016).
- [5] Décision n° 2015-DC-0532 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 17 novembre 2015 relative au rapport de sûreté des installations nucléaires de base.
- [6] Avis n° 2016-AV-0259 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 25 février 2016 sur les études relatives à la gestion des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL) remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, en vue de l'élaboration du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 2016-2018.
- [7] Avis n° 2016-AV-0267 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 31 mai 2016 relatif à la réversibilité du stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde.
- [8] Agence Internationale de l'Énergie Atomique - Revue Internationale par les pairs sur le « Dossier d'Options de Sûreté » du projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde : Cigéo. Rapport de la revue par les pairs, novembre 2016.
- [9] Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.
- [10] Délibération du conseil d'administration de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs du 5 mai 2014 relative aux suites à donner au débat public sur le projet Cigéo.
- [11] Loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2016/7/25/DEVX1614324L/jo/texte>
- [12] Lettre ASN/CODEP-DRC-2014-016991 du 10 juillet 2014 - de stockage Cigéo – Examen du dossier « Maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse et phasage du projet Cigéo ».
- [13] Rapport IRSN DSU n° 106, Avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur le « Dossier 2005 Argile », présenté devant le GPD les 12-13 décembre 2005.
- [14] Avis GPD/05-16, Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » du 12/12/2005 et du 13/12/2005 - Stockage Géologique - Examen du « Dossier 2005 Argile ».
- [15] Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire du 1er février 2006 sur les recherches relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, et liens avec le PNGDR-MV.
- [16] Rapport IRSN/2010-00002, Avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur le « Dossier 2009 - Projet HA-MAVL » et sur le « DAIE ».
- [17] Avis CODEP-MEA-2010-068480, Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » du 29/11/2010 - Dossier 2009 pour le projet HA-MAVL et demande de renouvellement de l'autorisation d'exploitation du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.
- [18] Avis ASN CODEP-DRC-2011-002092, Examen du « Dossier 2009 » relatif au projet HA-MAVL présenté devant le GPD les 29-30 novembre 2010.
- [19] Avis IRSN N° 2013-00159 du 26 avril 2013 sur les évolutions du projet Cigéo au stade « Jesq03 » depuis le Dossier 2009. <http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/AVIS-IRSN-2013-00159.pdf>
- [20] Lettre ASN CODEP-DRC-2013-033414 du 18 novembre 2013, Dossier « Projet Cigéo - Esquisse Jesq03 (2012) - Document de synthèse des évolutions par rapport au Dossier 2009 et impact sur la sûreté » .
- [21] Rapport IRSN N° 2014-00010 « Examen de la maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo », présenté devant le GPD et le GPU le 10 décembre 2014. [http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_expertise/Documents/surete/IRSN-Rapport-2014-00067.pdf](http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN-Rapport-2014-00067.pdf)
- [22] Avis et recommandations CODEP-MEA-2014-056324 des Groupes Permanents « Déchets » et « Usines » du 10/12/2014 relatif au Projet de stockage Cigéo - Examen du dossier "maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo".

- [23] Lettre ASN CODEP-DRC-2015-004834 du 7 avril 2015 - Dossier « projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde - maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo ».
- [24] Avis DSU n°2009-166 du 22 décembre 2009 sur le choix d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie.
- [25] Lettre n°2010-AV-0084 du 5 janvier 2010 relative à la proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface pour un stockage réversible en formation géologique profonde.
- [26] Avis IRSN 2013-57 du 13 février 2013 - « Commentaires de l'Andra sur le rapport de l'IEER de mars 2011 ».
- [27] Rapport IRSN/IRSN 2013-00001, Projet Cigéo - Examen des études remises depuis 2009, présenté devant le GPD le 5 février 2013.
- [28] Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » du 5 février 2013, « Avis relatif au projet de stockage CIGEO - Examen des études remises depuis 2009 ».
- [29] Avis n°2013-AV-179 du 16 mai 2013 de l'ASN sur les documents produits par l'Andra depuis 2009 relatifs au projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde.
- [30] Rapport IRSN N°2014-00006, « Projet de stockage Cigéo - Ouvrages de fermeture », présenté devant le GPD le 1er juillet 2014. [http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_gp/Documents/Dechets/IRSN-GP\\_Cigeo-2014.pdf](http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/Documents/Dechets/IRSN-GP_Cigeo-2014.pdf)
- [31] Avis CODEP-MEA-2014-030920 du Groupe Permanent « Déchets » du 01/07/2014 relatif au projet de stockage Cigéo - Examen du dossier « Ouvrages de fermeture ».
- [32] Lettre ASN CODEP-DRC-2014-039040 du 9 octobre 2014 - Dossier « projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde – ouvrages de fermeture ».
- [33] Lettre IRSN DG/2014-00646 du 12 novembre 2014 - Transmission de l'avis sur le potentiel géothermique de la région de Bure.
- [34] Rapport IRSN RT/PRP-DGE/2014-00067 - « Potentiel géothermique du site de Meuse/Haute-Marne ». [http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_expertise/Documents/surete/IRSN-Rapport-2014-00067.pdf](http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN-Rapport-2014-00067.pdf)
- [35] Note Andra CG.PDD.ADPC.14.0031 « Plan de développement des composants du projet Cigéo ».
- [36] Avis IRSN-0348 du 6 novembre 2015 « Plan de développement des composants du projet Cigéo » <http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/AVIS-IRSN-2015-00348.pdf>
- [37] Lettre ASN CODEP-DRC-2016-005220 du 20 juin 2016 - « Plan de développement des composants du projet Cigéo ».
- [38] Lettre Andra DG/16-0105 du 6 avril 2016.
- [39] Rapport Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060 - « Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation » (DOS-Expl).
- [40] Rapport Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062 - « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (DOS-AF).
- [41] Rapport Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-SRR-0000-15-0063 - Cigéo - « Proposition de plan directeur pour l'exploitation » (PDE).
- [42] Rapport Andra CG-TE-D-NTE-AMOA- RVO-0000-15-0059 - « Dossier d'options techniques de récupérabilité » (DORec).
- [43] Note Andra CG-TE-D-SPE-AMOA-SR0-7000-16-0005 - « Spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo ».
- [44] Note Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-EX0-0000-16-0023 - Esquisse de la notice présentant les capacités techniques de l'exploitant de Cigéo « Réflexion sur la stratégie industrielle ».
- [45] Note Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-16-0022 - « Glossaire des livrables CIGEO 2015 ».
- [46] Lettre Andra DG/16-0141 du 13 mai 2016.
- [47] Note Andra CRPADPG150013/A - « Adaptabilité de Cigéo pour le stockage de combustibles nucléaires usés ».
- [48] Note Andra CGNTADPG150006/A - « Adaptabilité de Cigéo pour le stockage des déchets en réserves.
- [49] Lettre ASN CODEP-DRC-2016-021729 du 16 juin 2016 - Projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde - Cigéo - Accusé de réception du dossier d'options de sûreté.
- [50] Note Andra CG-TE-D-SPE-AMOA-SR0-7000- 16-0063 - « Méthode d'élaboration des spécifications d'acceptation des colis primaires à Cigéo et Etat des lieux de la définition des exigences préliminaires ».
- [51] Note Andra CNTADPS150005 - « Utilisation des connaissances sur les colis primaires pour la conception et la démonstration de sûreté de Cigéo ».
- [52] Note Andra CGPEADPG110074.E, octobre 2016, « Programme industriel de gestion des déchets - Projet Cigéo ».
- [53] Rapport Andra D.RP.ASMG.12.0032.A, « Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne ».
- [54] Rapport Andra D.RP.AMFS.12.0024.A, « Référentiel du comportement THM des formations sur le site de Meuse/Haute-Marne - Centre de Meuse/Haute-Marne ».

- [55] Note Andra CIGEO.SP.ADPG.11.0020.E, septembre 2013, « Exigences applicables - Projet Cigéo ».
- [56] Note Andra F.RP.OGTR.14.0004 - « Modèle structural régional et local révisé - Réalisation d'une base de données structurales et d'un atlas de fiches descriptives des structures tectoniques ».
- [57] Rocher M., De Hoyos A., Hibsich C., Viennot P., 2010. Geological investigations contributing to the hydrogeological conceptual model in the Meuse/Haute-Marne area, eastern France. "Nantes 2010" - Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. (France), 29th March - 1st April 2010, p. 297, P/GEO/LS/07.
- [58] Note Andra CRPADSD090005 - « Modèle conceptuel du milieu géologique - Site de Meuse Haute Marne ».
- [59] Note Andra CGNTASMG130028 - « Résultats de la conversion temps profondeur de la sismique 3D Haute Résolution SZS ».
- [60] Note Andra DRPOSSQ120001 - « Optimisation de la conversion temps profondeur de la sismique 3D Haute Résolution SZS ».
- [61] Note Andra DRPOSSQ120002 - « Calculs d'incertitude sur les épaisseurs des couches converties en profondeur ».
- [62] Potentiel géothermique du site de Meuse/Haute-Marne. Fiche IRSN - [http://www.irsn.fr/dechets/cigeo/Documents/Fiches-thematiques/IRSN\\_Debat-Public-Cigeo\\_Fiche-Geothermie.pdf](http://www.irsn.fr/dechets/cigeo/Documents/Fiches-thematiques/IRSN_Debat-Public-Cigeo_Fiche-Geothermie.pdf)
- [63] Evaluation de la présence d'hydrocarbures non conventionnels sur le secteur de Meuse/Haute-Marne. Rapport CG.NT.ASMG.13.0044.A.
- [64] Blaise T., Izart A., Michels R., Suarez-Ruiz I., Cathelineau M., Landrein P., 2011. Vertical and lateral changes in organic matter from the Mesozoic, eastern Paris Basin (France): Variability of sources and burial history. *International Journal of Coal Geology* 88 (2011) 163-178.
- [65] Blaise T., 2012. Histoire thermique et interactions fluides roches dans l'Est du Bassin de Paris. Thèse Université de Lorraine, 348 p.
- [66] Note Andra CG. NT.AGES.16.0002 - « Modèle conceptuel de l'évolution du site de Meuse/Haute-Marne au cours du prochain million d'années ».
- [67] Note Andra C.RP.OARM.12.0002. Surrection tectonique dans le Bassin de Paris ». Volume 1 : texte ; volume 2 : figures.
- [68] Note Andra C RP OARM 07 0001 A - « Estimation du taux de surrection régionale et de sa variabilité spatiale et temporelle à l'échelle du bassin de Paris ».
- [69] Note Andra C.RP.OGTR.08.0001/A - « Etude de la faille de Vittel - Recherche et analyse de traces d'activité récente ».
- [70] Note Andra C.RP.OGTR.11.0001 - « Estimation des vitesses possibles de glissement des failles de l'est du bassin de Paris ».
- [71] Linard Y., Vinsot A., Vincent B., Delay J., Wechner S., De La Vaissière R., Scholz E., Garry B., Lundy M., Cruchaudet M., Dewonck S., Vigneron G., 2011. Water flow in the Oxfordian and Dogger limestone around the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory. *Physics and Chemistry of the Earth* vol. 36, issue 17-18, pp. 1450-1468.
- [72] Note Andra D.RP.ALS.08.1356/B - « Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008. Centre de Meuse/Haute-Marne ».
- [73] Note Andra D RP ASMG 11 0102 « Synthèse hydrogéologique du Barrois »
- [74] Note Andra D.RP.AGES.15.0033, 2011 -« Projet Cigéo - Expérimentation MHS - Bilan 2012, 2013, 2014 des mesures hydrogéologiques et hydrologiques de surface » - Tome 1, Tome 2
- [75] Note Andra C.RP.OGRU.09.0002 « Variation spatiale des débits des cours d'eau dans la région Meuse/Haute-Marne » (2009) - Volume 1 - Acquisition de données ; 2 - Modèle conceptuel
- [76] Carpentier C., 2004. Géométrie et environnements de dépôt de l'Oxfordien de l'Est du Bassin de Paris. Thèse Doct. Univ. H. Poincaré, Nancy-I, 471 p.
- [77] Lavastre V., Le Gal La Salle C., Benedetti L., Michelot J-L., Giannesini S., Massault M., Thomas B., Gilabert E., Lavielle B., Bourlès D., Lancelot J., 2010. Establishing constraints on groundwater ages with <sup>36</sup>Cl, <sup>14</sup>C, <sup>3</sup>H, and noble gases: a case study in the eastern Paris Basin, France. *Appl. Geochem.* 25, 123-142.
- [78] Yu C., Matray J.-M., Gonçalves J., Jaeggi D., Gräsele W., Wiczorek K., Vogt T., Sykes E. (submitted to the *Swiss Journal of Geosciences*, to be published in 2017). Comparative study of methods to estimate hydraulic parameters in the hydraulically undisturbed Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory (DB Experiment)
- [79] AF Consult, 2017, DB Experiment: Analysis of hydraulic tests carried out in the 7 intervals of the BDB-1 borehole, Mont Terri Technical Note TN2017-05.
- [80] Note Andra CGNTAEAP160002 - « Evaluation de l'évolution du gradient vertical de charge hydraulique dans le Callovo- Oxfordien à l'actuel et sur le prochain million d'années ».

- [81] Note Andra CGNTAEAP120084 - « Evaluation de l'effet de la surpression hydraulique naturelle dans la couche du Callovo-Oxfordien sur la performance post-fermeture du stockage Cigéo pour la voie de transfert par l'eau dans le Callovo-Oxfordien, en fonctionnement normal »
- [82] Gonçalves J., De Marsily G. and Tremosa J., 2012. « Importance of thermo-osmosis for fluid flow and transport in clay formations hosting a nuclear waste repository ». *Earth and Planetary Science Letters*, 339-340, 1-10.
- [83] Note Andra CGNTASTR120003 B - « Référentiel de comportement des radionucléides et des toxiques chimiques dans le contexte du projet Cigéo ».
- [84] Note Andra CGRPASCM120014 - « Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue » - Tome 2 : les matériaux cimentaires.
- [85] Note Andra CGNTADIP130001 - « Retour d'expérience de la construction et de l'exploitation du Laboratoire souterrain et des expérimentations de 2000 à 2012 - Centre de Meuse/Haute-Marne ».
- [86] de Hoyos A., Viennot P., Ledoux E., Matray J.-M., Certes C., Rocher M., 2010. Thermohaline Modeling of the Paris Basin Hydrogeological Model. *Journal of Hydrology*, 464-465, p. 12-26.
- [87] Mayor J.-C., Velasco M., García-Siñeriz J.-L., 2007. Ventilation experiment in the Mont Terri underground laboratory. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, p. 616-628.
- [88] Note Andra CGNTAEAP160001 - « Projet CIGEO - Synthèse des modélisations hydrogéologiques (2007-2014) du site de Meuse/Haute-Marne - Le modèle hydrogéologique à l'Actuel et son évolution sur le prochain million d'années ».
- [89] Note Andra CG.NT.ASCM.16.0009 - « Comportement des déchets en stockage - Modèles de relâchement des radionucléides ».
- [90] Note Andra CGNTASCM130021 - « Comportement des déchets en stockage - Modèles de relâchement des radionucléides pour les différentes familles de colis ».
- [91] Note Andra SUR.NT.ASAF.14.0024 - « Modèles de relâchement retenus pour les déchets HA et les déchets MAVL vitrifiés pour les évaluations de sûreté après fermeture de Cigéo »
- [92] Note Andra SUR.NT.ASAF.14.0003 - « Modèles de relâchement retenus pour les déchets MAVL pour les évaluations de sûreté après fermeture de Cigéo ».
- [93] Note Andra CGRPPEAP150006 - « Simulations de l'évolution chimique des alvéoles de déchets bitumineux »
- [94] Note Andra CGRPFSCM150027 - Corrosion généralisée des aciers au carbone en conditions représentatives du stockage. Bilan des essais de corrosion en milieux argileux effectués par l'Andra et ses partenaires
- [95] Note Andra CGNTAEAP150034 - « La charge thermique de la zone HA pour l'architecture Japs03b : hypothèses, données d'entrée et indicateurs thermiques ».
- [96] Note Andra CG.NT.ADPG.13.0026 - « Incidence des vides dans les tunnels de stockage sur la propagation de l'EDZ à long terme - Projet Cigéo ».
- [97] Note SUR.NT.ASSE.16-0016 - « Démarche d'analyse de sûreté en phase d'exploitation pour les installations nucléaires de l'Andra ».
- [98] Note Andra CG-TE-F-NTE-AMOA-SR1-0000-13-0071/A - « Référentiel de sûreté appliqué à la conception de Cigéo pour la phase d'exploitation »
- [99] RFS 2001-01
- [100] Note Andra C.NT.ASSE.16.0021 - « Synthèse des données associées aux calculs de criticité en support aux livrables Cigéo-2015- Colis HA, MAVL et combustibles nucléaires usés ».
- [101] Note Andra SUR NT ASSN 11.0051 indice D, novembre 2014, « Référentiel incendie pour la conception de Cigéo ».
- [102] Note Andra CGTEDNSYAMOASR10000140116 - « Programme Bitume - Synthèse des essais d'incendie réel sur un colis de stockage MAVL dans sa configuration de stockage ».
- [103] Note Andra CGTEDNSYAMOASR10000140118 - « Programme bitume - Synthèse des résultats des trois essais thermiques sur les colis de stockage B2.1 d'enrobés bitumineux ».
- [104] Lettre Andra n° DRD/DIR/15-0004 - Envoi de documents : Dossier bitume - Andra (2015) (cf. notamment références 102, 103, 179, 180, 181, 182, 183, 195, 236, 237, 238).
- [105] Note Andra CG-TE-D-SPE-IPOM-MC0-8000-14-0015-A1 - « Système de transfert incliné (funiculaire), Dossier Définition Sommaire ».
- [106] Note Andra SURNTASSEI 40002 - « Référentiel technique applicable à la conception, la réalisation et l'exploitation d'un système de transfert incliné de colis de déchets radioactifs ».
- [107] Annexe à la Lettre DISEF /DIR/16-0209 « Evaluation préliminaire des possibilités d'interception d'un réseau de conduits karstiques du Barrois par les ouvrages de liaison surface/fond du stockage Cigéo »
- [108] Note Andra CGRPFGES160065 « Réévaluation de l'aléa sismique pour les futures implantations du projet Cigéo - Approches déterministe et probabiliste ».

- [109] Note Andra CG.NT.AGES.16.0032 - « Réévaluation de l'aléa sismique à 2016 pour les futures implantations du projet Cigéo par approche déterministe et approche probabiliste ».
- [110] Nocquet J.-M., Sue C., Walpersdorf A., Tran T., Lenôtre N., Vernant P., Cushing M., Jouanne F., Masson F., Baize S., Chéry J., van der Beek P.A., 2016. Present-day uplift of the western Alps. *Scientific reports* 6, 28404.
- [111] Zoback M., Grollmund B., 2001. Impact of deglaciation on present-day intraplate seismicity in eastern North America and western Europe. *C. R. Acad. Sci. Paris, Earth and Planetary Sciences*, 333, p. 23-33.
- [112] Andra (2005). Aléa sismique : consolidation de l'approche déterministe, essai préliminaire d'une approche probabiliste. Site Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.0GTR.04.0013.A.
- [113] Note Andra C.RP.0GTR.09.0001/A - « Estimation de la variabilité spatiale des mouvements sismiques sur la zone de transposition. Secteur de Meuse/Haute Marne ».
- [114] Note Andra SURNTASSC140005 - « Valeurs toxicologiques de référence (VTR) retenues par l'Andra pour les toxiques chimiques pris en compte par l'Andra dans ses évaluations d'impact ».
- [115] Note Andra SURNTASAF140018/B - « Inventaire radiologique pour l'évaluation de sûreté après fermeture de Cigéo ».
- [116] Note Andra CGNTADSD130027 - « Projet Cigéo : Revues techniques de préparation à la Demande d'Autorisation de Création (DAC) Revue Finale des Modèles et des Données - première partie (RFMD-1) : Bilan des connaissances phénoménologiques et incertitudes résiduelles ».
- [117] Note Andra CGNTAEAP160005 - « Estimation des débits d'eau pompables dans les formations aquifères encaissantes du Callovo-Oxfordien ».
- [118] Note Andra CGNTAEAP150042 - Dossier d'Options de Sûreté en Après-Fermeture (DOS-AF) - « Evaluation quantitative du Scénario d'Evolution Normale (SEN) - Hypothèses, données et résultats ».
- [119] Note Andra CGNTAEAP150044 - Dossier d'Options de Sûreté en Après-Fermeture (DOS-AF) - « Evaluation quantitative des scénarios SEA et What-if de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture - Hypothèses, données et résultats ».
- [120] Note Andra CGNTAEAP150047 - Dossier d'Options de Sûreté en Après-Fermeture (DOS-AF) - « Evaluation quantitative des scénarios SEA et What-if de défaillance des conteneurs de stockage HA - Hypothèses, données et résultats ».
- [121] Note Andra CGNTAEAP130050 - « Transfert par la voie ouvrages - Influence des éléments d'architecture et de conception du stockage Cigéo vis-à-vis de son évolution phénoménologique et de sa performance après fermeture ».
- [122] Note Andra CG.NT.AEAP.16.0011 - « Evaluation de l'influence d'éléments d'architecture de l'installation fond sur la performance en après-fermeture du système de stockage »
- [123] Note Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-ASU-0000- 16-0067 -« Justification de l'architecture souterraine du stockage au stade de l'APS- Projet Cigéo »
- [124] Rapport AIEA, IAEA-BIOMASS-6, « Reference Biosphere » for solid radioactive waste disposal, de juillet 2003.
- [125] Guide INERIS, Évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des ICPE - substances chimiques, 2003.
- [126] Guide INERIS, Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires, 2013.
- [127] Ouvrage d'André LANNOY de 1984, édition EDF - bulletin de la direction des études et recherches - série A : « Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre - analyse déterministe et probabiliste du scénario d'accident ».
- [128] Arrêté du 2 décembre 2016 modifiant l'arrêté du 29 mai relatif aux transports de marchandises dangereuses par voie terrestre, dit « arrêté TMD »
- [129] Rapport IRSN FT/AV/PSN/2015-00218 : « Analyse approfondie de l'événement de Penly 2 du 5 avril 2012 concernant le repli dans le chapitre VI des RGE à la suite d'un début d'incendie du groupe motopompe primaire RCP 051 PO (GMPP n° 1) ayant entraîné un arrêt automatique du réacteur », établi en support à l'avis IRSN/2015-00416 du 18 décembre 2015.
- [130] Note Andra CGTEDNTEAMOASR10000130127 du 6 décembre 2013 : « La maîtrise des risques de dissémination de substances radioactives, d'explosion lié à l'émission d'hydrogène par les colis de déchets, d'incendie et des risques liés à la coactivité dans l'installation souterraine et les liaisons surface-fond de Cigéo au stade de l'esquisse ».
- [131] SURGUASSN09-0022 Ind. B du 20 juillet 2016 - « Méthodologie pour la conception et le dimensionnement des moyens de protection ».
- [132] Arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public.
- [133] Arrêté du 7 août 2008 relatif à la gestion du risque lié au radon dans les lieux de travail.

- [134] Arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants, ainsi qu'aux règles d'hygiène, de sécurité et d'entretien qui y sont imposées.
- [135] Note de synthèse de l'IRSN du 2 avril 2014 - Réflexion de l'IRSN sur les grandes étapes de la démonstration de la sûreté du projet Cigéo et des modalités d'expertise associées. [http://www.irs.fr/dechets/actualite/Documents%20partages/IRSN\\_Reflexion-demonstration-surete-cigeo\\_02042014.pdf](http://www.irs.fr/dechets/actualite/Documents%20partages/IRSN_Reflexion-demonstration-surete-cigeo_02042014.pdf)
- [136] Note Andra D.RP.0G2R.00.003/A - « Site de Meuse/Haute-Marne. Cartographie géologique et structurale de l'environnement régional du site » (3 Volumes).
- [137] Note Andra C.RP.1.GTR.03.001/B - « 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 ».
- [138] Note Andra CRP.ADP.09.0035/A - « Stockage réversible profond. Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface »
- [139] Décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007 relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives.
- [140] Avis n°2011-AV-129 du 26 juillet 2011 de l'Autorité de sûreté nucléaire sur le dossier relatif au stockage réversible profond des déchets de haute et moyenne activité à vie longue déposé par l'Andra conformément à l'article 11 du décret n°2008-357 du 16 avril 2008.
- [141] Stchépinsky M.V., 1965. Carte géologique de la France, feuille de Doulaincourt, notice explicative de la carte géologique à 1/50 000, BRGM, Orléans.
- [142] Avis n°2016-AV-264 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 29 mars 2016 sur les études relatives à la gestion des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, en vue de l'élaboration du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018.
- [143] Wells D. L. & Coppersmith K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of Seismological Society of America*, vol. 84 no. 4, p. 974-1002.
- [144] Calais E., Camelbeeck T., Stein S., Liu M., Craig T. J., 2016. A new paradigm for large earthquakes in stable continental plate interiors. *Geophysical Research Letters Frontier Paper*.
- [145] Stucki J.W. & Kostka J.E., 2006. Microbial reduction of iron in smectite. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 338, 6-7, p. 468-475.
- [146] Esnault L., Libert M., Bildstein O., Mustin C., Marsal F., Jullien M., 2013 Impact of iron-reducing bacteria on the properties of argillites in the context of radioactive waste geological disposal. *Applied Clay Science*, vol. 83-84, p. 42-49.
- [147] Avis n° 2015-AV-0227 de l'ASN du 10 février 2015 relatif à l'évaluation des coûts afférents au projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde.
- [148] Lavastre V., Jendrzewski N., Agrinier P., Javoy M., Evrard, M., 2005. Chlorine transfer out of a very low permeability clay sequence (Paris Basin, France): <sup>35</sup>Cl and <sup>37</sup>Cl evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69 (21), 4949-4961.
- [149] Mazurek M., Alt-Epping P., Bath A., Gimmi T., Waber H.N, 2008. CLAYTRAC Project Natural Tracer Profiles Across Argillaceous Formations Review and Synthesis. *Rapport OCDE - NEA No. 6253*.
- [150] Fourné E., Jean-Baptiste P., Dapoigny A., Lavielle B., Smith T., Thomas B., Vinsot A., 2011. Dissolved helium distribution in the Oxfordian and Dogger deep aquifers of the Meuse/Haute-Marne area; *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36, 17-18, pp. 1511-1520.
- [151] Rebeix R., Giannesini S., Le Gal La Salle C., Michelot J.L., Verdoux P., Noret A., Monvoisin G., Lancelot J., 2011. Tracing the origin of water and solute transfers in deep groundwater from Oxfordian, Dogger and Trias formations in the east of the Paris Basin - France. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1496-1510.
- [152] Rebeix R., Le Gal La Salle C., Jean-Baptiste P., Lavastre V., Fourné E., Bensenouci F., Matray J.M., Landrein P., Shouakar-Stash O., Frape S.K., Michelot J.L., Lancelot J., 2014. Chlorine transport processes through a 2000 m aquifer/aquitard system. *Mar. Pet. Geol.*, 53, 102-116.
- [153] Bensenouci F., Michelot J.L., Matray J.M., Savoye S., Lavielle B., Thomas B., Dick P., 2011. A profile of helium-4 concentration in pore-water for assessing the transport phenomena through an argillaceous formation (Tournemire, France). *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1521-1530.
- [154] Bensenouci F., Michelot J.L., Matray J.M., Savoye S., Massault M., Vinsot A., 2014. Coupled study of water-stable isotopes and anions in porewater for characterizing aqueous transport through the Mesozoic sedimentary series in the eastern Paris Basin *Marine and Petroleum Geology*, 53, 88-101.

- [155] Battani A., Smith T., Robinet J.C., Brulhet J., Lavielle B., Coelho D., 2011. Contribution of logging tools to understanding helium porewater data across the Mesozoic sequence of the East of the Paris Basin ; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 75, pp. 7566-7584.
- [156] Dazères A., Le Bescop P., Sardini P., Cau Dit Coumes C., Physico-chemical investigation of clayey/cement-based materials interaction in the context of geological waste disposal: Experimental approach and results, *Cement and Concrete Research*, 40 (2010) 1327-1340.
- [157] Dazères A., Etude expérimentale et modélisation des mécanismes physico-chimiques des interactions béton-argile dans le contexte du stockage géologique des déchets radioactifs, Thèse de l'Université de Poitiers, 2010, 249p.
- [158] Dazères A., Le Bescop P., Cau-Dit-Coumes C., Brunet F., Bourbon X., Timonen J., Voutilainen M., Chomat L. and Sardini P., On the physico-chemical evolution of low-pH and CEM I cement pastes interacting with Callovo-Oxfordian pore water under its in situ CO<sub>2</sub> partial pressure, *Cement and Concrete Research*, 58 (2014) 76-88.
- [159] Lalan P., Influence d'une température de 70°C sur la géochimie, la microstructure et la diffusion aux interfaces béton/argile : expérimentations en laboratoire, in situ et modélisation, thèse de doctorat, 2016, 168p.
- [160] Auroy M., Impact de la carbonatation sur les propriétés de transport d'eau des matériaux cimentaires, thèse de doctorat, 2014, 250p.
- [161] Note Andra CGPEADPG110074.A, janvier 2012, « Programme industriel de gestion des déchets - Projet Cigéo ».
- [162] Note Andra CGPEADPG110074.D, juillet 2014, « Programme industriel de gestion des déchets - Projet Cigéo »
- [163] Note ZSPADP070019 indice A du 15/10/2007 - Projets RG (Radifères-Graphites) et HAVL (Haute Activité et Vie Longue), Constitution des dossiers de connaissances des familles de déchets conditionnés ou non.
- [164] Décret n°2016-1442 du 27/10/2016 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie (JORF n°0252 du 28 octobre 2016, texte n°3).
- [165] Lettre CODEP-DCN-2016-007286 du 20/04/2016.
- [166] Décret n°2001-1220 du 20/12/2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles (JORF n°297 du 22/12/2001, page 20381, texte n°15).
- [167] Arrêté du 18/12/1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations nouvelles (NOR : ENVP9250386A).
- [168] Décision n°2014-DC-0402 de l'ASN du 21 janvier 2014 - Centrale nucléaire de Dampierre-en-Burly.
- [169] Arrêté du 30/12/2002 relatif au stockage de déchets dangereux (NOR : DEVP0320005A, version consolidée au 27/01/2017).
- [170] Rapport IRSN/DES n°393 « Avis de l'IPSN sur le référentiel géologique du site de Bure (Département de la Meuse) », présenté le 11 janvier 2000.
- [171] EIA/ARI World Shale Gas and Shale Oil Resource Assessment, Advanced Res. Int., Inc. ; June 2013, 707 p.
- [172] Note Andra CG.RP.ASCM.12.0026, ind. A - Référentiel du comportement des colis de déchets HA-MAVL.
- [173] Frugier P., Gin S., Minet Y., Chave T., Bonin B., Godon N., Lartigue J.E., Jollivet P., Ayral A., De Windt L. & Santarini G., 2008. SON68 Nuclear glass dissolution kinetics: current state of knowledge and basis of the new GRAAL model. *Journal of Nuclear Materials*, 380, (1-3), 8-21.
- [174] Hellmann R., Cotte S., Cadel E., Malladi S., S. Karlsson L., Lozano-Perez S., Cabié M., & Seyeux A., 2015. Nanometre-scale evidence for interfacial dissolution-reprecipitation control of silicate glass corrosion. *Nature materials*, 05/01/2015, DOI:10.1038/NMAT4172.
- [175] Devos A., 1996 - « Hydrologie et aménagements hydrauliques de la Saulx et de l'Ornain (Lorraine) ». Thèse de doctorat de l'Université de Metz.
- [176] Avis IRSN N°2014-00394 du 03 novembre 2014 : AREVA NC - Etablissement de La Hague - Colis standard de déchets vitrifiés CSD-B - Spécification 300 AQ 61.
- [177] Avis IRSN N°2015-00295 du 21 septembre 2015 : PNGMDR - Inventaires des matières organiques et complexants dans les colis de déchets MA-VL.
- [178] Castelotte M., Fernandez L., Andrade C., Alonso C., Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations, *Materials and Structures*, 42 : (2009) 515-525.
- [179] Note CEA/AREVA/CORIA DEN/DANS/SP2S/NT/14-016/A - « Bilan des 8 essais de tenue au feu d'enrobés de boues bitumées à l'échelle du kg (Campagne d'essais 2013) ».
- [180] Document CEA/AREVA DEN/DANS/SP2S/NT/14-035-A - « Comportement en température des colis d'enrobés de boues bitumées ».
- [181] Note EDF H-I83-2014-05164-FR 1.0 - « Modélisation du comportement en température d'échantillons de boues bitumées à l'aide du logiciel SYRTHES ».

- [182] Note CEA/AREVA DPAD/CMDT/NT/2014-012 ind. 0 - « Plan d'expérience pour l'étude de la réactivité thermique des enrobées STE La Hague (STE2/STE3) et STEL Marcoule (Période 3/4). Interprétation des résultats expérimentaux ».
- [183] Note CEA/AREVA DPAD/CMDT/EXUFU/NT/2014-11, ind.0 - « Construction des plans d'expériences pour l'étude de la réactivité thermique des enrobés bitumineux STEL Marcoule et STE La Hague ».
- [184] Note Andra C.RP.ASOS.11-0119.B, Décembre 2011 - « Bilan pluriannuel de la qualité des milieux. Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) 2009/2010 ».
- [185] Guide n° 13 de l'ASN - Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes. <https://professionnels.asn.fr/Installations-nucleaires/Centrales-nucleaires/Guides-de-l-ASN-dans-le-domaine-des-installations-nucleaires/Guide-de-l-ASN-n-13-Protection-des-installations-nucleaires-de-base-contre-les-inondations-externes>
- [186] Rapport IRSN du 13 novembre 2013, « L'aléa inondation - État de l'art préalable à l'élaboration du guide inondation pour les installations nucléaires ». [http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_expertise/surete/Pages/Alea-inondation-etat-de-l-art\\_2013.aspx#.WMKfb6PLS70](http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/surete/Pages/Alea-inondation-etat-de-l-art_2013.aspx#.WMKfb6PLS70)
- [187] Poinssot & Geckeis, 2012. Radionuclide Behaviour in the Natural Environment: Science, Implications and Lessons for the nuclear industry.
- [188] De Cannière P., Maes A., Williams S., Bruggeman C., Beauwens T., Maes N., Cowper M., 2010. Behaviour of Selenium in Boom Clay. External Report, SCK•CEN-ER-120, 10/PDC/P-9.
- [189] Bruggeman C., Maes A., Vancluysen J., 2007. The interaction of dissolved Boom clay and Gorleben humic substances with selenium oxyanions (selenite and selenate), Applied Geochemistry 22.
- [190] Gimmi T., Leupin O., Eikenberg J., Glaus M., Van Loon L., Waber H., Wersin P., Wang H.A.O., Grolimund D., Borca C., Dewonck S., Wittebroodt C., 2014. Anisotropic diffusion at the field scale in a 4-year multi-tracer diffusion and retention experiment - I : Insights from the experimental data, Geochimica et Cosmochimica Acta 125.
- [191] Lettre ASN DSIN-FAR/SD3/N° 50645/01 du 27 janvier 2001 - Etablissement COGEMA de La Hague. Spécification du colis standard de déchets compactés.
- [192] Lettre ASN CODEP-DCN-2016-007286 du 20 avril 2016 : Orientations génériques du réexamen périodique associé aux quatrième visites décennales des réacteurs de 900MWe d'EDF (VD4-900).
- [193] Décision n°2014-DC-0464 de l'ASN du 30 octobre 2014 fixant à AREVA NC diverses prescriptions relatives au conditionnement des déchets technologiques contenant des matières organiques et irradiants ou riches en éléments émetteurs alpha dits déchets technologiques non susceptibles d'être stockés en surface (N3S) produits et entreposés dans l'INB n°151 dénommée Mélox dans la commune de Chusclan (Gard) et dans l'établissement de La Hague dans la commune de Beaumont-Hague (Manche).
- [194] Note Andra D RP ASMG 11 0044 « La formation du Barrois - Etat des connaissances et apport des reconnaissances 2010 sur la ZIRA » (2011).
- [195] Note Andra CG.NT.AEAP.14-0052, ind.A - « Evaluation préliminaire de l'impact de la pression de gonflement des boues bitumées du fait de la reprise d'eau sur le comportement mécanique des argilites du Callovo-oxfordien en champ proche des alvéoles MAVL ».
- [196] Avis IRSN n°2017-00080 du 22 mars 2017 : Spécification de production du colis substitutif au bitumage pour le conditionnement des boues STE2, dénommé colis C5, acceptabilité au stockageDSU/2009-130 du 15 octobre 2009 : AREVA NC - Colis C5 - colis alternatif au colis « bitume ».
- [197] Rapport IRSN n°2017-00004 : Reprise et conditionnement des silos STE2 de l'établissement AREVA NC La Hague - Spécifications de production du colis C5 et acceptabilité en stockage géologique.
- [198] Avis du groupe permanent Usines du 19/11/2008 relatif à l'examen de la révision du rapport préliminaire de sûreté de l'installation ICEDA (EDF) (Lettre GPU - DEP-MJO-0168-2008 du 19 décembre 2008).
- [199] Lalan P., Dauzères A., De Windt L., Bartier D., Sammaljärvi J., Barnichon J.-D., Techer I., Detilleux V., 2016. Impact of a 70 °C temperature on an ordinary Portland cement paste/claystone interface: An in situ experiment. Cement and Concrete Research, vol. 83, May 2016, p. 164-178.
- [200] Mariën A., Mokni N., Valcke E., Olivella S., Smets S., Li X., 2013. Osmosis-induced water uptake by Eurobitum bituminized radioactive waste and pressure development in constant volume conditions, Journal of Nuclear Materials, 432, p. 348-365.
- [201] Avis IRSN n°2016-00141 du 29 avril 2016. Etablissement AREVA NC de La Hague - INB n°118 - Atelier STE3 - Déchets alpha - Etude préliminaire du « procédé d'incinération vitrification in can » (PIVIC).
- [202] Avis IRSN N°2015-00328 du 14 octobre 2015. Etude transmise dans le cadre du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs - recommandations pour la conception d'installations d'entreposage s'inscrivant dans la complémentarité avec le stockage.
- [203] A. Vinsot, C. A. J. Appelo, M. Lundy, S. Wechner, Y. Lettry, C. Lerouge, A. M. Fernandez, M. Labat, C. Tournassat, P. De Canniere, B. Schwyn, J. Mckelvie, S. Dewonck, P. Bossart and J. Delay, 2014 : In situ

- diffusion test of hydrogen gas in the Opalinus Clay, Geological Society, London, Special Publications, 400, first published on April 2, 2014, doi:10.1144/SP400.12.
- [204] E. Jacobs, K. Wouters, G. Volckaert, H. Moors, N. Maes, C. Bruggeman, R. Swennen, R. Littke, 2015 : Measuring the effective diffusion coefficient of dissolved hydrogen in saturated Boom Clay, Applied Geochemistry 61 (2015) 175-184.
- [205] A. Lassin, M. Parmentier, L. Andre, M. Pettenati, J. Tremosa, M.A. Sbai, N. Devau, M. Dymitrowska, 2012 : Impact of H<sub>2</sub> production on the chemical reactivity of partially saturated argillites: towards simulations of scenarios, Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement - 5 International meeting Book of abstracts (2012) 923p, France.
- [206] IAEA GEOSAF Part II Project - The International Intercomparison and Harmonisation Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal. <http://www-ns.iaea.org/projects/geosaf/>
- [207] IAEA Safety Standards, Specific safety Guide No. SSG-14, Geological disposal for radioactive waste. [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1483\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1483_web.pdf)
- [208] Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32013L0059>
- [209] Arrêté du 12 avril 2006 modifiant l'arrêté du 1er juin 2001 modifié relatif au transport des marchandises dangereuses par route (dit « arrêté ADR »). <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000639008&dateTexte=&categorieLien=id>
- [210] Plan A0 Andra, CG-TE-D-PLA-SCVG-AF0-4000-14-005 - Architecture générale - Plan d'ensemble à terminaison des liaisons surface-fond et des installations au fond géo-localisées.
- [211] Rapport AEN n°6184, 2010. Self-sealing of fractures in argillaceous formations in the context of geological disposal of radioactive waste. <https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2010/nea6184-self-sealing.pdf>
- [212] de La Vaissière R., Armand G. and Talandier J., 2014. Excavation damaged zone under imbibition: evidence of self-sealing into claystone. Unsaturated Soils: Research & Applications, Sidney (Australia), Taylor & Francis group.
- [213] Note Andra C.NT.AHVL.00-012, 06/03/00 - « Apports des acquisitions en Laboratoire de recherche souterrain à l'étude des puits d'une éventuelle installation de stockage de déchets HAVL ».
- [214] Jacob C.E. & Lohman S.W., 1952. Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. Trans. AGU 33, p. 559-569.
- [215] Rapport IRSN DES N°408 - « Avis de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire sur la maîtrise de l'impact du laboratoire souterrain et sur le programme d'investigation avant et pendant le fonçage des puits - Site de Bure (Département de la Meuse) », présenté devant le groupe permanent chargé des installations destinées au stockage à long terme des déchets radioactifs le 5 juillet 2000.
- [216] Note Andra C.RP.ASCM.04.0015.B, Dossier 2005 - « Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue ».
- [217] projet FORGE, Fate Of Repository Gases – D3.38-R, « Experiments and modelling on the behaviour of EBS », <https://www.bgs.ac.uk/forge/docs/reports/D3.38-R.pdf>
- [218] Bingham P.A., Connelly A.J., Cassingham N.J. and Hyatt N.C. 2011, Oxidation state and local environment in alkali borosilicate glasses for radioactive waste immobilisation, Journal of non-crystalline Solids, 2011, Volume 357, Issue 14.
- [219] Courrier CEA/DEN/MAR/DTCD/SECM/LDMC DO 92 11KKCD000092 du 15/12/2011 - « Avis sur l'état rédox du sélénium dans les verres de PF ».
- [220] Document Andra CC.NT.ASTR.15.0025 - « Bilan des études de R&D en lien avec l'acceptation du colis C5 en stockage profond Cigéo ».
- [221] Stammose, D., Osmond, M., Barker, E., Wittebroodt, C., 2014. Hydrogen production by iron corrosion under gamma-irradiation. Eurocorr2014.
- [222] El Hajj H., Abdelouas A., Grambow B., Martin C., Dion M., 2010. Microbial corrosion of P235GH steel under geological conditions. Physics and Chemistry of the Earth 35, 248-253.
- [223] AlAbbas F.M., Williamson C., Bholra S.M., Spear J.R., Olson D.L., Mishra B., Kakpovbia A.E., 2013. Influence of sulfate reducing bacterial biofilm on corrosion behavior of low-alloy, high-strength steel (API-5L X80). International Biodeterioration & Biodegradation 78, 34-42.
- [224] Ashassi-Sorkhabi H., Moradi-Haghighi M., Zarrini G., Javaherdashti R., 2012. Corrosion behavior of carbon steel in the presence of two novel iron-oxidizing bacteria isolated from sewage treatment plants. Biodegradation 23, 69-79.
- [225] Videla H.A., 1996. Corrosion inhibition by bacteria. In: Manual of Biocorrosion. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 121-135.

- [226] Schütz M.K., Moreira R., Bildstein O., Lartigue J.E., Schlegel M.L., Tribollet B., Vivier V., Libert M., 2014. Combined geochemical and electrochemical methodology to quantify corrosion of carbon steel by bacteria activity. *Bioelectrochemistry* 97, 61-68.
- [227] Urios L., Marsal F., Pellegrini D. and Magot M., 2012. Microbial diversity of the 180 million-year-old Toarcian argillite from Tournemire, France. *Applied Geochemistry*, vol. 27, issue 7, 1442-1450
- [228] Document Andra Cigeo.NT.ASGP.11.0004/A, juillet 2011, « Prise en compte des facteurs organisationnels et Humains (FOH) dans les projets Andra ».
- [229] Note Andra CIGEO.SP.ASGP.11.0002 ind. B du 5 janvier 2012 - « Spécifications de management de la Maitrise d'Œuvre Système ».
- [230] Note Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-EX0-0000-15-00007 ind. B du 16 novembre 2015 - « Principes préliminaires et modalités d'exploitation de Cigéo - Vision exploitation ».
- [231] Note GAIYA CG-TE-D-NTE-TGYA-XEE-0000-16-0012 ind. A du 29 septembre 2016 - « Doctrine d'Exploitation »
- [232] Arrêté du 23/02/2017 pris en application du décret n°2017-231 du 23 février 2017 pris pour application de l'article L.542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs.
- [233] Décision ASN n° 2008-DC-0110 de l'ASN homologuée par arrêté du 8 décembre 2008.
- [234] Décision ASN n° 2014-DC-0417 du 28 janvier 2014 relative aux règles applicables aux installations nucléaires de base (INB) pour la maîtrise des risques liés à l'incendie.
- [235] Note GAIYA CG-TE-F-TGYA-EFH-0000-12-0001/02 ind. A du 11 juin 2012 - « Plan de management FOH ».
- [236] Note de synthèse sur les résultats du programme d'étude conjointe Andra/AREVA/CEA/EDF sur les enrobés bitumineux - Note du 24/12/2014.
- [237] Note CEA DEN/MAR/DTC/SPDE/NT 2014/DO n°23/indice A, 2014 - « Etude de la variabilité de la composition chimique des enrobés bitumineux sur le comportement thermique : méthodologie ».
- [238] Note CEA-AREVA DPAD/CMDT/NT/2014-012 Ind.0 - « Plan d'expérience pour l'étude de la réactivité thermique des enrobés STE La Hague (STE2/STE3) et STEL Marcoule (Période 3/4) ; interprétation des résultats expérimentaux ».
- [239] Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018.
- [240] Avis CODEP-MEA-2017-014920, Avis et Recommandations du Groupe Permanent pour les Déchets et du Groupe Permanent pour les laboratoires et usines du 28/03/2017 - Spécification de production et acceptabilité en stockage géologique du colis C5.
- [241] Biasi, G.P., Wesnousky, S.G., 2016. Steps and gaps in ground ruptures: Empirical bounds on rupture propagation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (3), pp. 1110-1124.
- [242] Wesnousky, S.G., Biasi, G.P., 2011. The length to which an earthquake will go to rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101 (4), pp. 1948-1950.
- [243] Li & Gregory, 1974. Diffusion of ions in sea water and deep-sea sediments. *Geochimica & Cosmochimica Acta* 38, 703-714.
- [244] Mégnien C., 1980. Synthèse géologique du bassin de Paris. Vol. III. Lexique des noms de formation. BRGM, mém. 103, Orléans, 467 p.
- [245] Maubeuge P.L., 1974. Carte géologique de la France, feuille de Neufchâteau, notice explicative de la carte géologique à 1/50 000, BRGM, Orléans.
- [246] Avis IRSN N°2015-00421 du 22 décembre 2015 : Agressions extrêmes retenues pour la mise en place du « noyau dur » des réacteurs à eau sous pression. <http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/Avis-IRSN-2015-00421.pdf>
- [247] Dautères, A., De Windt, L., Marsal, F., Maillet, A., 2012. The OXITRAN project: Measuring and understanding the oxygen consumption in argillaceous media.
- [248] Brigaud, B., Durllet, C., Deconinck, J.-F., Vincent, B., Pucéat, E., Thierry, J., Trouiller, A., 2009. Facies and climate/environmental changes recorded on a carbonate ramp: A sedimentological and geochemical approach on Middle Jurassic carbonates (Paris Basin, France). *Sedimentary Geology*. 222, 181-206.
- [249] Matray, J.M., Lambert, M., Fontes, J.Ch., 1994. Stable isotope conservation and origin of saline waters from the Dogger aquifer of the Paris Basin, France. *Appl.Geochem.* 9, 297-309.
- [250] Wei, H.F., Ledoux, E., De Marsily, G., 1990. Regional modelling of groundwater flow and salt and environmental tracer transport in deep aquifers in the Paris Basin. *J. Hydrol.* 120 (1-4), 341-358.
- [251] Gonçalves, J., Violette, S., Guillocheau, F., Robin, C., Pagel, M., Bruel, D., de Marsily, G., Ledoux, E., 2004. Contribution of a three-dimensional regional scale basin model to the study of the past fluid flow evolution and the present hydrology of the Paris Basin, France. *Basin Res.* 16, 569-586.
- [252] Brigaud B, Durllet C., Deconinck J.-F., Vincent B., Pucéat E., Thierry J., Trouiller A., 2009. Facies and climate/environmental changes recorded on a carbonate ramp: A sedimentological and geochemical approach on Middle Jurassic carbonates (Paris Basin, France). *Sedimentary Geology*, Vol. 222, 3-4, p. 181-206.

- [253] Décision n° 2017-DC-0587 de l'ASN du 23 mars 2017 relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage.
- [254] Note NT DPC/SECR 09-032 ind. A, 2009 - « Modèle d'évolution opérationnel des combustibles usés en système fermé. Conséquences sur le relâchement instantané des radionucléides (IRF) ».
- [255] De Loriol P., Royer E. et Tombeck H., 1872. Description géologique et paléontologique des étages jurassiques supérieurs de la Haute-Marne. Mémoire de la société linnéenne de Normandie, 542 p.

## LISTE DES ACRONYMES

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique  
AIP : Activités importantes pour la protection  
APD : Avant-projet définitif  
APM : Atelier pilote de Marcoule  
APS : Avant-projet sommaire  
BHP : Béton haute performance  
CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
CP : Colis primaire  
CS : Colis de stockage  
CSA : Centre de stockage de l'Aube  
CtS : Conteneur de stockage  
CU : Combustibles usés  
DAC : Demande d'autorisation de création  
DAD : Déchets activés de déconstruction  
DAE : Déchets activés d'exploitation  
DAIE : Demande d'Autorisation d'Installation et d'Exploitation d'un laboratoire souterrain dans le site de l'Est  
DORec : Référence [42]  
DOS : Dossier d'options de sûreté  
DOS-AF : Référence [40]  
DOS-Expl : Référence [39]  
DPCI : dispositions de protection contre l'incendie  
EDF : Electricité de France  
ECS : Evaluations complémentaires de sûreté  
EDZ : Excavation damaged zone  
EiP : Entreposage intermédiaire polyvalent  
EIP : Eléments importants pour la protection  
EP1, EP2 : Installations de surface  
EPR : European pressurized water reactor  
EQRS : Evaluation quantitative de risque sanitaire  
ET : Emballage de Transport  
ET-H : Emballage de type horizontal  
ET-V : Emballage de type vertical  
FAVL : Faible activité à vie longue  
FOH : Facteurs organisationnels et humains  
GPD : Groupe permanent d'experts pour les déchets  
GPU : Groupe permanent d'experts pour les laboratoires et usines  
HA : Haute activité  
HA0 : Haute activité à faible exothermicité  
HA1/HA2 : Haute activité exothermique  
ICEDA : Installation de conditionnement et d'entreposage des déchets activés  
IN : Inventaire national  
INB : Installation nucléaire de base  
INBS : Installation nucléaire de base secrète  
IRF : Instant release fraction

*ITER : Thermonuclear experimental reactor*

*MAVL : Moyenne activité à vie longue*

*MHM : Meuse/Haute-Marne*

*MOA : maîtrise d'ouvrage*

*MOE : maîtrise d'œuvre*

*MOX : Mixed oxides (ou Mélange d'oxydes)*

*ML : Métal lourd*

*PDD : Plan de développement des composants du projet [Cigéo](#) (version de 2014 en référence [35])*

*PDE : Référence [41]*

*PIGD : Programme industriel de gestion des déchets*

*PIVIC : Procédé d'incinération-vitrification in can*

*PUI : Plan d'urgence interne*

*REP : Réacteur à eau pressurisée*

*RES : Réacteur d'essais*

*RFS : Règle fondamentale de sûreté, émise par l'ASN*

*RGE : Règles générales d'exploitation*

*RJH : Réacteur expérimental Jules Horowitz*

*RNR : Réacteurs à neutrons rapides*

*RPS : Rapport préliminaire de sûreté*

*SEA : Scénario d'évolution altérée*

*SEN : Scénario d'évolution normale*

*SI : Scénario industriel*

*SMF : Séisme minimum forfaitaire (défini par le RFS 2001-01)*

*SMHV : Séisme maximal historiquement vraisemblable*

*SMPP: Séisme maximal physiquement possible (défini dans la [RFS 2001-01](#))*

*SMS : Séisme majoré de sécurité (défini dans la [RFS 2001-01](#))*

*SPX : Superphénix*

*SSC : structures, systèmes et composants importants pour la sûreté*

*THE : Très haute efficacité (filtre)*

*TOP : Traitement Oxyde Pilote*

*TOR : Traitement Oxyde Rapide*

*UNGG : Uranium naturel graphite gaz*

*UOX : Uranium oxide (ou oxyde d'uranium)*

*URE : Uranium de retraitement enrichi*

*UA : unité argileuse du Callovo-Oxfordien (divisée en UA1, UA2 et UA3), au sein de laquelle est implanté le niveau principal du Laboratoire souterrain et où l'Andra prévoit également d'implanter l'installation souterraine de [Cigéo](#)*

*USC : unité silto-carbonaté du Callovo-Oxfordien, au sein de laquelle est implantée la niche du Laboratoire souterrain*

*UT : unité de transition du Callovo-Oxfordien, située entre l'UA et l'USC*

*What-if : Scénario peu vraisemblable visant à tester la robustesse du stockage à long terme*

*ZBS : ZIRA borehole survey*

*ZDN : Zone de déchets nucléaires*

*ZEXP : Zone d'exploitation en surface*

*ZFC : Zone de dracturation connectée*

*ZFd : Zone de fracturation discrète*

*ZFD : Zone de fracturation diffuse*

*ZIRA : Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie*

*ZSL : Zone de soutien logistique*

*ZT : Zone de transposition*