

RAPPORT D'EXPERTISE

DEMANDE D'AUTORISATION DE CREATION DU PROJET CIGÉO

« GP3 » - SÛRETÉ EN APRÈS FERMETURE

Réunion du Groupe permanent d'experts pour les déchets des 25 et 26 juin 2025

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	10
1.1. OBJET DU PRESENT RAPPORT.....	10
1.2. CONTEXTE	11
1.3. PRESENTATION DU DOSSIER DE L'ANDRA	12
2. DESCRIPTION DU SYSTEME DE STOCKAGE APRES FERMETURE	13
2.1. LE SITE DE MEUSE/Haute-MARNE.....	13
2.1.1. Cartographie du site.....	13
2.1.2. La formation du Callovo-Oxfordien.....	14
2.1.3. Les niveaux aquifères principaux du site de Meuse/Haute-Marne	14
2.2. ARCHITECTURE DU STOCKAGE	15
2.2.1. Les liaisons surface-fond	15
2.2.2. Les ouvrages souterrains.....	16
2.3. LES COLIS DE STOCKAGE	19
2.3.1. Colis de stockage HA.....	19
2.3.2. Colis de stockage MA-VL.....	20
2.4. FERMETURE DU STOCKAGE.....	20
2.4.1. Fermeture des ouvrages souterrains.....	21
2.4.2. Les ouvrages de scellements.....	22
2.5. ADAPTABILITE DE CIGEO A L'INVENTAIRE DE RESERVE	24
3. SUITES GP1 ET GP2 : CORROSION ET SEISME EN PHASE D'EXPLOITATION.....	26
3.1. CORROSION DES ACIERS	26
3.2. DIMENSIONNEMENT AU SEISME PENDANT LA PHASE D'EXPLOITATION	28
4. DEMARCHE D'EVALUATION DE SURETE APRES FERMETURE	30
4.1. DEMARCHE GENERALE	30
4.2. FONCTIONS DE SURETE ET CIP	31
4.3. OBJECTIFS DE PROTECTION	32
4.4. DEFINITION DES BIOSPHERES	35
4.5. MEMOIRE DE CIGEO A LONG TERME.....	37
5. ANALYSE DES RISQUES ET INCERTITUDES, DEFINITION DES SCENARIOS.....	39
5.1. RISQUES D'ORIGINE INTERNE	39
5.1.1. Criticité.....	39

5.1.2.	Effet du gonflement sous eau des déchets bitumés.....	47
5.1.3.	Effet « piston » lié aux gaz.....	48
5.1.4.	Effet des surpressions hydrauliques induites par le fluage de la roche	48
5.2.	RISQUES D'ORIGINE EXTERNE : SEISME.....	49
5.3.	DEFINITION DES SCENARIOS D'EVOLUTION DU STOCKAGE.....	52
5.3.1.	Scénario d'évolution normale	52
5.3.2.	Scénarios d'évolution altérée, <i>What-if</i> et SIHI.....	53
5.3.3.	Indicateurs de performance.....	55
6.	EVALUATION DE LA CAPACITE GLOBALE DE CONFINEMENT	57
6.1.	SCENARIO D'EVOLUTION NORMALE.....	57
6.1.1.	Distribution de l'inventaire dans l'installation de stockage	57
6.1.2.	Conceptualisation du SEN.....	58
6.1.3.	Enseignements des évaluations de performance et d'impact	61
6.2.	SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION ALTÉRÉE ET <i>WHAT-IF</i>	69
6.2.1.	Dysfonctionnement des scellements.....	69
6.2.2.	Dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA	75
6.2.3.	Discontinuité non détectée dans le Callovo-Oxfordien	77
6.2.4.	Effondrement en phase d'exploitation.....	82
6.3.	SCENARIOS D'INTRUSION HUMAINE INVOLONTAIRE.....	86
6.3.1.	Conceptualisation des scénarios d'intrusion humaine	87
6.3.2.	Evaluations quantitatives des scénarios.....	90
7.	ETUDES DE SENSIBILITE A L'ARCHITECTURE DU STOCKAGE	93
7.1.	DISTANCE ENTRE LE QUARTIER DE STOCKAGE MA-VL ET LA BASE DES LSF.....	93
7.2.	POSITION DU QUARTIER DE STOCKAGE MA-VL PAR RAPPORT A LA ZSL	94
7.3.	SCELLEMENTS.....	95
7.4.	PUITS SUPPLEMENTAIRE.....	96
8.	ADAPTABILITE DU STOCKAGE	98
8.1.	DEMARCHE D'EVALUATION DE LA CAPACITE DE CONFINEMENT.....	98
8.2.	EVALUATION DE LA PERFORMANCE DU STOCKAGE.....	99
8.2.1.	Conceptualisation des scénarios.....	99
8.2.2.	Scénario d'évolution normale	100
8.2.3.	SEA adaptabilité dysfonctionnement de tous les scellements.....	102
8.2.4.	Scénario d'intrusion humaine involontaire	103
8.3.	CONCLUSION.....	103

9. CONCLUSION DU GP3	104
10. CONCLUSION GENERALE	106

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figures

Figure 1 : Carte géologique du « secteur de Meuse/Haute-Marne » et position de la zone d'implantation des ouvrages souterrains de stockage (ZIOS) dans la zone de transposition (ZT) ([40] modifiée : la carte intègre la mise à jour par l'Andra de la ZFD [41]).	13
Figure 2 : Logs des principales formations géologiques du secteur de Meuse/Haute-Marne. À gauche : couches du Mésozoïque ([44], modifié). À droite : détail de la formation du COx au niveau du LSMHM ([44], modifiée).	14
Figure 3 : Illustration des LSF ([46], modifiée).	16
Figure 4 : Schéma de l'installation souterraine de Cigéo [47].	17
Figure 5 : Schéma de principe d'un alvéole HA en attente de fermeture [49].	18
Figure 6 : Illustration des différentes parties d'un alvéole MA-VL [46].	19
Figure 7 : Illustration des composants d'un conteneur de stockage HA pour le cas de colis primaires de déchets vitrifiés provenant de l'usine d'Orano La Hague [52].	20
Figure 8 : Illustration des composants d'un conteneur de stockage MA-VL de type CS4.1 [52].	20
Figure 9 : Localisation des scellements de fond pour le quartier MA-VL (1), pour les quartiers pilote et de stockage HA (2), et projection des scellements de descenderies (3) et de puits (4) [53].	21
Figure 10 : Illustration d'un alvéole MA-VL complètement fermé [50].	22
Figure 11 : Schéma de principe de l'option de référence pour les scellements de fond [49].	23
Figure 12 : Schémas de principe des scellements de puits et de descenderies [49].	23
Figure 13 : Illustration du quartier de stockage des CU de l'inventaire de réserve [57].	24
Figure 14 : Illustration du quartier de stockage dédié aux déchets FA-VL de l'inventaire de réserve [57].	25
Figure 15 : « SDD-2025 » (en pointillés rouges) retenu par l'Andra pour la phase d'exploitation.	29
Figure 16 : SEN en situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) - débits molaires au cours du temps au toit du COx pour les radionucléides dont le débit est supérieur à 10^{-10} mol/an ([47], modifiée au cours de l'expertise [118]).	62
Figure 17 : SEN en situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) - Débits molaires au cours du temps au toit du COx pour le sélénium en fonction de sa spéciation [47].	65
Figure 18 : Impact sanitaire radiologique maximum du SEN en situation enveloppe.	68
Figure 19 : SEN, SEA (en haut) et What-if (en bas) de dysfonctionnement des scellements – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : débits molaires au cours du temps d'iode 129 sortant des LSF et au toit de la couche du COx calculés par l'Andra [47].	73
Figure 20 : Représentation schématique de la discontinuité non détectée postulée dans le quartier de stockage MA-VL dans les scénarios retenus par l'Andra [47].	79
Figure 21 : Représentation schématique de la localisation et de l'orientation des discontinuités postulées par PSE-ENV dans les quartiers de stockage MA-VL (gauche) et HA (droite).	79
Figure 22 : Représentation des situations de forage retenues par l'Andra pour l'évaluation de sûreté après fermeture ([68], modifiée).	88
Figure 23 : Architectures (a) « puits MA-VL » et (b) « puits HA » considérées par PSE-ENV.	97

Tableaux

Tableau 1 : Valeurs des conductivités hydrauliques des argilites endommagées mécaniquement (ZFC) pour (a) les SEA « dysfonctionnement des scellements par l'interface » et (b) les scénarios What-if « dysfonctionnement des scellements par l'interface et le noyau argileux ». Les valeurs dégradées sont ombrées. [47], modifié au cours de l'expertise.71

Tableau 2 : Valeurs des débits d'eau sortant des LSF calculées par l'Andra pour le SEN, les SEA (a) et les scénarios What-if (b) de dysfonctionnement des scellements, dans les situations de référence et enveloppe [47]......72

RESUME

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a sollicité l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le Dossier de demande d'autorisation de création (DDAC) du projet Cigéo de stockage des déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) en formation géologique profonde, déposé en 2023 par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra). Cet examen fait suite à plusieurs expertises menées par l'IRSN depuis le Dossier 2005 et plus particulièrement l'examen du Dossier d'options de sûreté (DOS) en 2017. Il est structuré selon trois groupements de thématiques : (i) les données de base retenues pour l'évaluation de la sûreté de Cigéo (GP1), (ii) l'évaluation de sûreté en phase d'exploitation des installations de surface et souterraine (GP2) et (iii) l'évaluation de sûreté en phase d'après fermeture (GP3). Le présent rapport concerne le groupement de thématiques GP3 et s'inscrit dans la continuité de ceux relatifs au GP1 et au GP2 remis respectivement en avril et décembre 2024, avec en particulier l'expertise de compléments nécessaires identifiés à l'issue du GP1 et du GP2 en vue du GP3.

S'agissant de la demande de compléments relative au programme de recherche sur la corrosion des composants métalliques de l'alvéole HA et à ses premiers résultats, PSE-ENV relève l'avancement limité de ce programme de recherche et observe que les quelques résultats complémentaires présentés ont permis à l'Andra de préciser la formulation du matériau cimentaire de remplissage vers laquelle elle s'oriente, sans pour autant constituer des éléments de nature à lever les réserves émises à l'issue de l'expertise GP1 relatives au dimensionnement des composants métalliques de l'alvéole HA. Concernant l'engagement de l'Andra pris à l'issue du GP2 de mise à jour du spectre de dimensionnement (SDD) en phase d'exploitation, PSE-ENV considère que le SDD révisé permet désormais de couvrir les incertitudes relatives à la définition de l'aléa sismique.

De l'examen du DDAC et des informations transmises au cours de l'expertise, PSE-ENV retient les principaux éléments suivants relatifs à l'évaluation de sûreté en phase d'après fermeture.

PSE-ENV estime pertinente la démarche de l'évaluation de la sûreté de Cigéo après sa fermeture retenue par l'Andra, fondée sur l'évaluation de la capacité globale de confinement de l'installation, via des scénarios d'évolution du stockage déduits d'une analyse des risques sur le long terme et des incertitudes relatives à la performance de ses composants, puis sur la vérification du respect d'objectifs de protection sanitaires et environnementaux. Les fonctions de sûreté, les composants importants pour la protection (CIP) et le choix des biosphères pour évaluer les impacts à long terme sont globalement satisfaisants. Sur un plan méthodologique, l'évaluation des incidences sanitaires chimiques devra être complétée, sans toutefois que les compléments attendus soient de nature à remettre en cause leur niveau très faible. Enfin, le travail de préfiguration des dispositifs de maintien de la mémoire est satisfaisant au stade actuel de développement du projet Cigéo et devra être accompagné d'une réflexion sur la méthode de sélection des données à archiver et sur leurs modalités de conservation.

Concernant les risques liés aux agressions d'origine interne, la démonstration de la maîtrise du risque de criticité après fermeture, ainsi que des effets sur la capacité de confinement du stockage du gonflement sous eau des déchets bitumés, des gaz durant le transitoire hydraulique-gaz ou des surpressions hydrauliques induites par le fluage de la roche, est globalement satisfaisante au stade d'un DDAC. L'Andra s'est engagée à compléter la justification du caractère enveloppe des modèles d'évolution du stockage considérés dans ses analyses de sûreté-criticité vis-à-vis notamment des dégradations attendues des matériaux cimentaires. Enfin, s'agissant de l'adaptabilité de Cigéo au stockage de l'inventaire de réserve, PSE-ENV souligne que les efforts à mener pour démontrer l'absence de risque de criticité après fermeture pour le stockage des combustibles usés (CU) restent substantiels, dès lors que leur dégradation ne permet plus de garantir le maintien de leur géométrie. Concernant les risques externes liés aux séismes, il importe que l'Andra démontre, avant le creusement des ouvrages souterrains, le caractère enveloppe du séisme maximum physiquement possible vis-à-vis de séismes pouvant se produire d'une part entre 2 et 5 km de profondeur, d'autre part en lien avec l'hypothèse d'une origine tectonique des structures détectées dans le Trias. Enfin, la sélection par l'Andra de scénarios d'évolution du stockage, qui tient compte d'événements perturbateurs supplémentaires (faille non détectée et effondrement d'un alvéole en phase d'exploitation) en cohérence avec l'expertise du DOS est globalement pertinente au regard des risques et des incertitudes identifiés.

PSE-ENV considère que l'évaluation du scénario d'évolution normale (SEN) met en évidence la bonne capacité globale de confinement du système de stockage en « situation de référence », évolution attendue du stockage, et « en situation enveloppe », qui cumule des données conservatives et des hypothèses pénalisantes et conduit ainsi à majorer, de manière probablement excessive, les transferts de radionucléides. Les résultats confirment la large prédominance des transferts vers les encaissants par diffusion, phénomène lent, via la voie Callovo-Oxfordien (COx, par rapport à la voie « ouvrages » (galeries et liaisons surface-fond (LSF)). PSE-ENV constate que les impacts sanitaires radiologiques restent inférieurs, ou du même ordre de grandeur pour l'impact maximal en situation enveloppe, à l'objectif de protection (valeur repère de 0,25 mSv/an). Ces évaluations d'incidences sanitaires en situation enveloppe montrent l'importance pour l'Andra, dans l'objectif de disposer de marges par rapport aux objectifs de protection, de poursuivre les efforts de consolidation des données, en particulier relatives à la solubilité du sélénium ou encore aux propriétés hydrauliques du COx sain (conductivité hydraulique et surpression). Par ailleurs, des compléments devront être apportés par l'Andra pour confirmer l'absence d'impact significatif du ^{14}C sous forme gazeuse pendant le transitoire hydraulique-gaz. Enfin, PSE-ENV convient que, pour le domaine d'évolution normale du stockage à long terme, l'impact pour la faune et la flore est négligeable.

S'agissant des scénarios d'évolution altérée (SEA) ou des scénarios *What-if*, PSE-ENV constate, en cas de dysfonctionnement des scellements, qu'en situation de référence, les scellements des galeries assurent une redondance avec les scellements des LSF et convient que la prédominance du transfert diffusif via le COx traduit le maintien de la bonne capacité de confinement du stockage. En situation enveloppe, PSE-ENV estime que le transfert significatif de solutés par les ouvrages met en exergue le rôle essentiel des scellements des LSF pour s'opposer à la circulation de l'eau dans le stockage et ainsi favoriser les transferts diffusifs via le COx. Dans cette situation enveloppe, l'impact radiologique maximal en cas de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements reste toutefois du même ordre de grandeur (jusqu'à 0,3 mSv/an) que pour le SEN, de même que les impacts sanitaires dus aux substances toxiques chimiques ainsi que l'impact environnemental. En outre, PSE-ENV considère que le dysfonctionnement précoce des conteneurs de stockage HA a des conséquences limitées en termes de performance de confinement et d'impact sanitaire du stockage, dès lors que les autres composants du stockage, en particulier les scellements, remplissent leurs fonctions de sûreté.

L'évaluation d'un scénario *What-if* de discontinuité (faille non détectée postulée) dans le quartier de stockage MA-VL met en évidence un impact significatif des radionucléides à vie longue peu mobiles (jusqu'à 22 mSv/an), et en particulier des actinides et de leurs descendants. PSE-ENV constate que cet impact, qui doit être nuancé au regard de la vraisemblance du scénario retenu et de la sévérité des hypothèses qui le fondent, reste toutefois de l'ordre de grandeur des objectifs de protection à retenir pour ce type de scénarios ; ceci traduit, selon PSE-ENV, un bon niveau de robustesse du stockage en cas de discontinuité traversant le quartier de stockage MA-VL. Des compléments devront être apportés pour confirmer l'absence d'impact d'un tel scénario dans le quartier de stockage HA au-delà de cet ordre de grandeur. Par ailleurs, la performance de confinement du stockage sur le long terme en cas de d'effondrement d'un alvéole en phase d'exploitation illustre la capacité de la roche hôte à assurer ses fonctions de sûreté, malgré sa dégradation locale, et démontrent ainsi la robustesse du système de stockage vis-à-vis de ce type de scénario. Enfin, PSE-ENV souligne qu'au regard de la durée séculaire de l'exploitation de Cigéo, l'abandon du stockage avant sa fermeture, suite par exemple à des bouleversements socio-économiques, constitue un scénario possible, régulièrement soulevé par la société civile et évalué par PSE-ENV à titre exploratoire au cours de cette expertise, qu'il importe de considérer afin d'en tirer des enseignements, notamment en matière de fermeture préventive anticipée du stockage, et ainsi d'en limiter les conséquences sur la sûreté à long terme.

S'agissant des scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI), les expositions radiologiques d'un foreur dans des scénarios de forage au niveau du stockage, suite à une remontée de déchets ou d'un panache de gaz radioactifs, de l'ordre de quelques mSv, ne sont pas rédhibitoires selon PSE-ENV notamment compte tenu de la sévérité de l'hypothèse de remontée de déchets en surface. De la même manière, l'exposition radiologique liée à l'utilisation d'eau contaminée après transfert sur le long terme de radionucléides à travers un court-circuit induit par un forage d'exploration abandonné et mal scellé ne conduit pas à des niveaux d'exposition au-delà des objectifs de protection à retenir pour ce type de scénario. PSE-ENV considère qu'il importe toutefois que l'Andra analyse si un gain pourrait être apporté par des compartimentages supplémentaires (localisation et nombre de scellements) dans les quartiers de stockage.

En l'absence d'un ensemble d'études étayées de différentes options d'optimisation de l'architecture du stockage qui identifie les avantages et inconvénients de ces options, du point de vue de la sûreté et de la radioprotection, en considérant l'ensemble des phases du stockage (exploitation et après fermeture), PSE-ENV n'est pas en mesure de se prononcer sur le caractère optimisé de l'architecture du stockage retenue au stade du DDAC, sans toutefois préjuger qu'elle ne l'est pas. Pour la phase d'après fermeture, PSE-ENV souligne, comme au stade du DOS, que cette architecture fait reposer un poids supplémentaire sur les scellements des galeries du quartier de stockage MA-VL, dont la performance reste à démontrer, en ne mettant pas à profit le gain avéré lié au positionnement en aval hydraulique de la base des LSF de ce quartier de stockage. A cet égard, PSE-ENV convient que des critères autres que techniques en lien notamment avec l'adaptabilité du stockage puissent intervenir dans les choix effectués. En outre, il importe que le nombre (réduit de 22 à 11 depuis le DOS), la localisation et la performance des scellements des galeries dans l'architecture retenue au stade du DDAC soient justifiés au regard de leur rôle de compartimentage dans les SIHI et de redondance des scellements des LSF dans les scénarios d'évolution du stockage. PSE-ENV convient toutefois, au vu des conclusions précitées issues de l'examen des évaluations de la performance globale de confinement du stockage et des impacts associés dans les différents scénarios d'évolution précités, ainsi que sur la base de ses propres modélisations, de la bonne capacité globale de confinement du système de stockage dans l'architecture retenue et de sa robustesse vis-à-vis des risques et incertitudes liées à son évolution. Enfin, au titre de la flexibilité, la possibilité, vis-à-vis de la sûreté à long terme, de créer un puits supplémentaire déporté de la base des LSF a été étudiée par PSE-ENV. Les résultats préliminaires de cette approche exploratoire tendent à montrer que l'ajout d'un tel puits est conditionné à la démonstration de la performance des scellements.

S'agissant de l'adaptabilité de Cigéo à l'inventaire de réserve, basée sur une architecture de stockage dont les principes pour les CU et les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) sont similaires à ceux développés pour, respectivement, les déchets HA et les déchets MA-VL, PSE-ENV convient du maintien de la capacité globale de confinement de Cigéo, y compris dans les scénarios d'évolution altérée de type SEA « dysfonctionnement de tous les scellements » ou SIHI étudiés.

En conclusion de ce troisième volet de l'expertise, PSE-ENV considère que la démonstration de sûreté de Cigéo après fermeture est d'un niveau conforme à l'attendu au stade d'une demande d'autorisation de création d'un stockage. Les principaux compléments identifiés par PSE-ENV à l'issue du présent examen, résumés ci-dessus, ont tous fait l'objet d'un engagement de la part de l'Andra en vue des prochaines étapes du développement de Cigéo. Le principal point d'attention de PSE-ENV à l'issue de ce troisième volet de l'expertise concerne l'optimisation de l'architecture du stockage retenue au stade de la DAC, sans toutefois qu'il remette en cause, selon PSE-ENV, la création de l'installation.

Au vu des conclusions de l'ensemble des volets de son expertise, PSE-ENV estime que la démonstration de sûreté de Cigéo a atteint le niveau de maturité requis au stade d'un DDAC pour la plupart de ses composantes. Il importe désormais de compléter et consolider cette démonstration durant la phase industrielle pilote, sur la base notamment de démonstrateurs réalisés *in situ* dans des conditions d'environnement et de fonctionnement industriel, en vue de la mise en service de l'installation. En amont de cette prochaine grande étape réglementaire, actuellement envisagée par l'Andra à l'horizon 2050, les points d'attention majeurs soulevés au cours de l'expertise devront faire l'objet de rendez-vous d'évaluation visant à examiner le bien-fondé des solutions techniques retenues.

1. INTRODUCTION

1.1. OBJET DU PRESENT RAPPORT

Par lettre citée en référence [1] (cf. Annexe A1), l'Autorité de sûreté nucléaire (**ASN**) a demandé l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le Dossier de demande d'autorisation de création (**DDAC**) du projet Cigéo, et a sollicité une expertise organisée selon les trois groupements de thématiques suivants :

- les données de base retenues pour l'évaluation de sûreté de Cigéo ;
- l'évaluation de sûreté en phase d'exploitation des installations de surface et souterraine ;
- l'évaluation de sûreté en phase d'après fermeture.

L'ASN a en outre identifié des thèmes transverses, en vue de leur intégration dans l'expertise de chacun de ces trois groupements thématiques. Il s'agit notamment des éléments de définition de la phase industrielle pilote, des optimisations présentées, des spécifications préliminaires d'acceptation des colis de déchets, de la réversibilité ainsi que des conséquences liées au changement climatique.

L'ASN a précisé que chacun des groupements de thématiques identifiés ci-avant fera l'objet d'un examen par le Groupe permanent d'experts (**GPE**) pour les déchets (**GPD**). Ces examens sont nommés « GP1 », « GP2 » et « GP3 » dans la suite du présent rapport. L'expertise du premier groupement de thématiques par l'IRSN est présentée dans le rapport IRSN n°2024-00212 [2], ainsi que dans l'avis IRSN n°2024-00051 du 12 avril 2024 [3] ; l'expertise du second groupement est présentée dans le rapport IRSN n°2024-00623 [4], ainsi que dans l'avis IRSN n°2024-00167 du 29 novembre 2024 [5]. L'expertise du GPD fait l'objet des avis référencés CODEP-MEA-2024-028272 [6] pour le GP1 et CODEP-MEA-2025-001992 [7] pour le GP2.

Le présent rapport concerne le troisième groupement de thématiques. Pour celui-ci, l'ASN a demandé à l'IRSN de se prononcer sur la pertinence des dispositions de conception, de construction et d'exploitation retenues, en examinant : (i) la démarche de sûreté en après fermeture au regard de la définition des scénarios prenant en compte les situations d'évolutions du système de stockage normale et altérées à long terme, (ii) l'évaluation des performances du système de stockage au regard des risques internes et externes et (iii) l'estimation des incidences radiologiques et chimiques associées à chaque scénario. L'ASN a précisé que cet examen devra notamment tenir compte des conclusions qu'elle a formalisées à l'issue de l'examen du Dossier d'options de sûreté (**DOS**), des réponses aux demandes et engagements résultant des examens précédents, du cadre réglementaire, ainsi que de son avis sur les études relatives à la gestion des déchets de haute activité (**HA**) et de moyenne activité à vie longue (**MA-VL**) remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (**PNGMDR**) 2016-2018.

Concernant la démarche de sûreté après fermeture du stockage, l'ASN a demandé à l'IRSN d'examiner notamment :

- la sélection des scénarios pour les situations d'évolution normale et altérées ;
- la démarche de sélection des biosphères tenant compte du changement climatique.

Concernant l'évaluation de sûreté, l'ASN a demandé à l'IRSN de l'examiner au regard :

- de l'analyse des risques internes et externes dans les installations souterraines (criticité, séisme...) ;
- de la modélisation du système de stockage (pertinence des phénomènes représentés, des hypothèses et paramètres retenus, des incertitudes prises en compte...) pour évaluer la capacité de confinement ;
- des études de sensibilité associées.

Concernant l'impact sanitaire et environnemental, l'ASN a demandé à l'IRSN d'inclure dans son expertise :

- la méthodologie d'évaluation des impacts radiologiques et chimiques sur l'homme et l'environnement ;
- les résultats de ces évaluations pour les scénarios étudiés.

En outre, l'examen des dispositions prévues pour la gestion de la mémoire durant la phase d'exploitation (sélection des informations, modalités de constitution des dossiers de mémoire et de conservation des données après fermeture), demandé par l'ASN dans le cadre du deuxième groupement de thématiques, a été reporté à ce troisième groupement. Des compléments demandés par le GPD à l'issue de son examen des deux premiers groupements thématiques, relatifs à la corrosion des aciers et au séisme de dimensionnement pour la phase

d'exploitation, font également l'objet de la présente expertise. Une conclusion générale, portant sur l'expertise de l'ensemble des trois groupements thématiques, vient clore ce troisième et dernier rapport d'expertise du DDAC.

Au 1^{er} janvier 2025, l'ASN et l'IRSN ont été réunis au sein de la nouvelle Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (**ASNR**). Le présent rapport de la Direction de la recherche et de l'expertise en environnement (**PSE-ENV**) de l'ASNR constitue l'expertise sollicitée pour le GP3 par la lettre précitée. Dans la suite de ce rapport, les acronymes ASN et IRSN sont maintenus lorsqu'il est fait référence à des documents ou positions émis par ces organismes avant leur fusion.

Par ailleurs, dans sa lettre du 13 mai 2025 [8], l'ASNR a demandé à la Présidente du GPD l'avis du groupe d'experts qu'elle préside sur ce troisième groupement thématique, avec l'appui en tant que de besoin de l'expertise des membres du Groupe permanent d'experts pour les laboratoires et les usines (**GPU**) et du Groupe permanent d'experts pour la radioprotection et l'environnement (**GPRP**).

Comme pour les deux premiers GP, la présente expertise a fait l'objet d'un dialogue technique (**DT DAC Cigéo**), organisé conjointement par l'Association nationale des comités et commissions locales d'information (**Anccli**), le Comité local d'information et de suivi du laboratoire de Bure (**Clis de Bure**) et l'IRSN (devenu ASNR), dans la continuité des actions d'ouverture à la société civile sur les déchets HA et MA-VL engagées depuis 2012. Ce DT DAC Cigéo a pour objectifs : (i) de tenir compte des préoccupations et des questions de la société civile pour rendre plus robuste l'expertise de l'ASNR et (ii) de permettre à la société civile de se forger sa propre opinion sur les enjeux de sûreté nucléaire et de radioprotection et de participer ainsi à la décision publique. Ce dialogue fait l'objet d'une Annexe dédiée (cf. Annexe T1) et les principaux sujets d'intérêt pour les participants sont repérés par le pictogramme ci-contre au fil du texte du présent rapport.



Le présent rapport rappelle le contexte général de l'expertise et décrit le contenu du DDAC (chapitre 1) puis l'installation Cigéo telle que présentée dans ce dossier (chapitre 2). Il présente ensuite l'expertise par PSE-ENV de ce dossier (chapitres 3 à 8) et comprend une liste des références, une liste des acronymes ainsi que des annexes administratives et techniques.

Les conclusions de PSE-ENV résultant de l'expertise sont repérées dans le texte de la façon suivante :

- en **caractères gras** sont mentionnées les conclusions de PSE-ENV ;
- lorsque ces conclusions de PSE-ENV ont conduit à un **engagement de la part de l'Andra** pris à l'issue de la « réunion préparatoire » à la réunion du GP tenue le 8 avril 2025, ceux-ci sont mentionnés en caractères **bleus gras** sous forme d'un numéro précédé de la mention « **2025-E** », et renvoient à la lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 [9] (cf. Annexe A2). Il est à noter à cet égard que l'ensemble des recommandations de PSE-ENV ont fait l'objet d'un engagement de l'Andra.

PSE-ENV précise que la formulation « prochaine révision du rapport de sûreté » utilisée dans ses conclusions s'entend comme la révision du rapport de sûreté après la mise à jour du DDAC, prévue en vue de l'enquête publique (cf. *infra*).

1.2. CONTEXTE

Pour rappel [2][4], la loi de programme du 28 juin 2006 [10] 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* ». Par ailleurs, l'ASN a publié le 12 février 2008 son guide de sûreté relatif au stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde, appelé ci-après « guide n°1 de l'ASN » [11].

A la suite du débat public préalable au dépôt du DDAC pour une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs HA et MA-VL (tenu en 2013), l'Andra a proposé une modification du calendrier de développement du projet Cigéo par délibération de son conseil d'administration du 5 mai 2014 [12], en intégrant en particulier le dépôt d'un DOS, ainsi qu'en introduisant une « phase industrielle pilote » avant le passage à l'exploitation courante de l'installation. La Loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016 (dite « Longuet-Namy ») [13], précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible, modifie la loi de programme n°2006-739 du 28 juin 2006 [10] en portant à 2018 l'instruction du DDAC, et modifie l'article L. 542-10-1 du code

de l'environnement en définissant la réversibilité¹ et en introduisant la phase industrielle pilote dans la réglementation. Le DOS, transmis à l'ASN par l'Andra le 6 avril 2016 [14], se positionnait entre la fin des études d'avant-projet sommaire (APS) et le début de celles de l'avant-projet détaillé (APD). Il a marqué l'entrée du projet dans un processus encadré par la réglementation relative aux installations nucléaires de base (INB), notamment au travers de l'article R. 593-14 du code de l'environnement.

Sur le plan de l'expertise scientifique et technique de la sûreté de Cigéo, l'ASN a pris position lors des principales étapes de développement de l'installation, en s'appuyant sur les expertises menées par l'IRSN et les conclusions des GPE. Ces étapes sont notamment le « Dossier 2005 Argile » (Dossier 2005) relatif à la faisabilité d'un stockage profond en couche géologique argileuse [15][16][17], le choix d'une « Zone d'Intérêt pour une Reconnaissance Approfondie » (ZIRA) [18][19], le « Dossier 2009 » présentant les options de conception, de sûreté et de réversibilité de l'installation de stockage [20][21][22], le jalon intermédiaire de conception au stade de l'esquisse en 2012 [23][24], les études remises depuis 2009 comprenant notamment les résultats de la reconnaissance par sismique 3D [25][26][27], les ouvrages de fermeture en 2014 [28][29][30], les risques en exploitation en 2015 [31][32][33], le plan de développement des composants du projet en 2016 [34][35] et enfin le DOS en 2018 [36][37][38]. L'Annexe T2 synthétise les demandes formulées par l'ASN et les engagements pris par l'Andra à l'issue de ces expertises en vue du DDAC.

1.3. PRESENTATION DU DOSSIER DE L'ANDRA

Par lettre DG/23.008 du 16 janvier 2023 [39], l'Andra a déposé le DDAC du projet Cigéo auprès de la Ministre de la Transition énergétique en charge de la sûreté nucléaire. Ce dossier est constitué de « pièces de base » (cf. Annexe A3), appelées par l'article R. 593 16 du code de l'environnement (cartes et plans, étude d'impact, version préliminaire du rapport de sûreté, etc.) ou d'autres articles du code de l'environnement et demandes des autorités (version préliminaire des spécifications d'acceptation, plan de développement de l'INB de stockage), ainsi que de « notes support » (dossiers de justification des choix de conception, référentiels de connaissances thématiques, etc.). Ce DDAC a été complété par une documentation demandée par l'ASN lors de la réunion du 10 mai 2023 relative au cadrage de l'instruction de la demande d'autorisation de création, puis, au cours de l'expertise, par d'autres documents techniques et par les réponses apportées par l'Andra aux questions de l'IRSN, puis de PSE-ENV.

¹ La réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion (Article L542-10-1 du Code de l'environnement).

2. DESCRIPTION DU SYSTEME DE STOCKAGE APRES FERMETURE

Le présent chapitre, exclusivement descriptif, est dédié à la présentation générale de l'installation Cigéo en lien avec l'évaluation de sûreté après la fermeture du stockage. Cette présentation est réalisée à partir des éléments transmis par l'Andra dans le DDAC et au cours de l'expertise. Elle rappelle les principaux éléments concernant le site de Meuse/Haute-Marne, l'architecture de Cigéo, l'installation souterraine, la fermeture du stockage et l'adaptabilité de Cigéo, présentés dans les rapports d'expertise de l'IRSN relatifs aux GP1 [2] et GP2 [4].

2.1. LE SITE DE MEUSE/Haute-MARNE

2.1.1. Cartographie du site

La formation géologique du Callovo-Oxfordien (**COx**) retenue pour l'implantation de Cigéo est située sur le site de « Meuse/Haute-Marne » (**MHM**), en bordure orientale du bassin sédimentaire Parisien. Ce site est encadré par des discontinuités présentant des décalages verticaux de plusieurs dizaines de mètres, en particulier les discontinuités de la Marne à l'ouest et de Gondrecourt à l'est (cf. Figure 1). Au nord, les couches forment le synclinal de Savonnières, une cuvette de faible amplitude allongée est-ouest. Au sud-ouest se trouve la « zone de fracturation diffuse » (**ZFD**), un faisceau de discontinuités situé dans le prolongement des discontinuités de la Marne, qui atteint (voire traverse pour certaines structures) les discontinuités de Gondrecourt. Au stade du DDAC, l'Andra a mis à jour la cartographie des discontinuités constituant la ZFD. La large zone ainsi délimitée par ces accidents tectoniques est appelée « secteur de MHM ». Enfin, des discontinuités majeures sont présentes à une distance d'environ 10 km de cette zone au nord (faisceau de discontinuités de Metz) et au sud (discontinuité de Vittel).

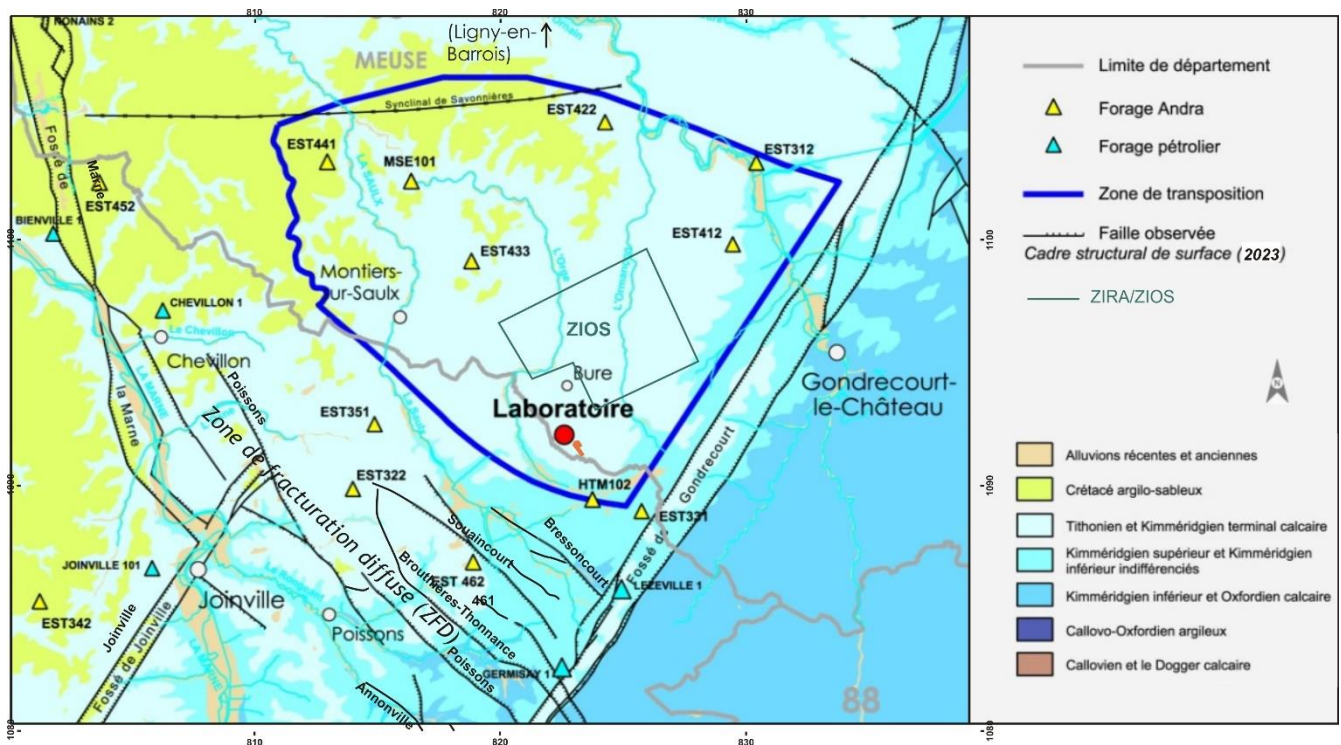


Figure 1 : Carte géologique du « secteur de Meuse/Haute-Marne » et position de la zone d'implantation des ouvrages souterrains de stockage (ZIOS) dans la zone de transposition (ZT) ([40] modifiée : la carte intègre la mise à jour par l'Andra de la ZFD [41]).

La « zone de transposition » (**ZT**), d'environ 250 km², a été définie par l'Andra en 2005 comme la zone présentant des propriétés similaires à celles du Laboratoire souterrain de MHM (**LSMHM**). Au sein de cette ZT, l'Andra a défini en 2009 une « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie » (**ZIRA**), d'environ 30 km², pour l'implantation de l'installation souterraine et des installations en surface. Au stade du DDAC, l'Andra définit la « zone d'implantation des ouvrages souterrains de stockage » (**ZIOS**), correspondant au volume de roche qui

permet d'accueillir les ouvrages souterrains de Cigéo, c'est-à-dire celui des ouvrages d'accès depuis la surface à la zone souterraine ainsi que le volume du COx délimité par la ZIRA, comprenant les quartiers de stockage des colis de déchets radioactifs et les zones de soutien logistique [42].

2.1.2. La formation du Callovo-Oxfordien

La couche du COx est localisée stratigraphiquement entre deux formations sédimentaires calcaires : le Dogger sous-jacent et l'Oxfordien sus-jacent, surmonté par le semi-perméable marneux et argileux du Kimméridgien, et enfin l'aquifère superficiel des calcaires du Barrois. C'est une couche sédimentaire compactée, assez homogène d'un point de vue lithologique et minéralogique, et communément appelée « argilites du COx ». Elle est essentiellement composée d'argiles et de carbonates [40].

Sur la ZIOS, la couche présente une épaisseur comprise entre 142 m et 162 m. Elle est légèrement inclinée, avec un pendage d'environ 1,9 % en moyenne vers l'ouest-nord-ouest. Son toit est situé entre environ 340 m et 530 m de profondeur, et son mur entre environ 500 m et 675 m [43]. Le COx est constitué de quatre séquences sédimentaires et composé de trois grandes unités géologiques (cf. Figure 2) : l'unité argileuse (UA), dans laquelle l'implantation de l'installation de stockage est envisagée et dont l'épaisseur varie entre 100 m à 120 m sur la ZIRA, l'unité de transition (UT) d'une quinzaine de mètres d'épaisseur et l'unité silto-carbonatée (USC) d'environ 30 m d'épaisseur.

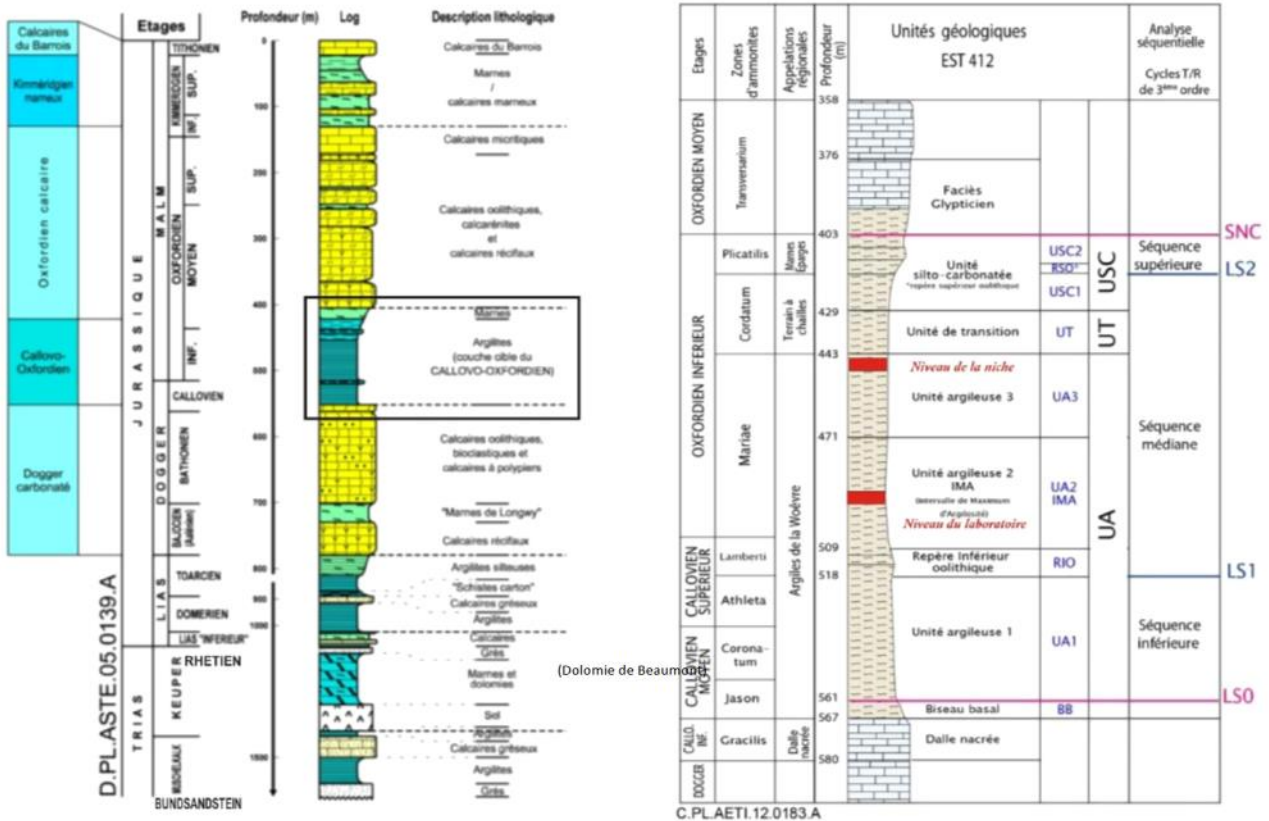


Figure 2 : Logs des principales formations géologiques du secteur de Meuse/Haute-Marne. À gauche : couches du Mésozoïque ([44], modifié). À droite : détail de la formation du COx au niveau du LSMHM ([44], modifiée).

2.1.3. Les niveaux aquifères principaux du site de Meuse/Haute-Marne

L'aquifère à surface libre du Barrois est de type karstique lorsqu'il affleure dans le secteur de MHM et il est très productif lorsqu'il est saturé. Au sein de la ZIOS, son épaisseur peut atteindre 130 m.

L'aquifère calcaire de l'Oxfordien, d'environ 280 m d'épaisseur, présente une transmissivité globale comprise entre 10⁻⁷ et 10⁻⁵ m²/s et des transmissivités plus élevées comprises entre 10⁻³ et 10⁻² m²/s dans la ZFD [40]. Au niveau

de la ZT, les écoulements sont orientés vers le nord-ouest avec un gradient hydraulique d'environ 0,4 %. Cet aquifère présente une alternance entre des niveaux peu producteurs (voire non producteurs) et plus producteurs. Dans la partie nord-est du secteur, la nappe de l'Oxfordien est divisée par des couches marneuses appelées « série grise » [40], séparant certains des horizons producteurs précités.

L'aquifère calcaire du Dogger, d'environ 250 m d'épaisseur, présente une transmissivité globale comprise entre 10^{-9} et 10^{-5} m²/s et des transmissivités plus élevées comprises entre 10^{-6} et 10^{-4} m²/s dans la ZFD [40]. Les écoulements sont également orientés vers le nord-ouest avec un gradient plus faible que dans l'Oxfordien, de l'ordre de 0,1 %. 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 (cf. Figure 2).

Le gradient hydraulique vertical à travers la couche du COx, résultant des différences de charge entre l'Oxfordien carbonaté (290 m NGF au niveau du LSMHM) et le Dogger (305 m NGF au niveau du LSMHM), varie entre une valeur légèrement négative d'environ -0,02 m/m au sud-est de la ZIOS (gradient descendant) et d'environ +0,12 m/m au nord-ouest de cette zone (gradient ascendant) [45]. L'Andra estime que ce gradient vertical pourrait doubler en 500 000 ans en fonction des modifications géodynamiques liées à l'érosion. Par ailleurs, les mesures de charges hydrauliques dans le COx révèlent l'existence d'une surcharge par rapport à la différence de charges entre l'Oxfordien et le Dogger, qui peut atteindre une valeur d'environ 50 m [45]. La valeur moyenne de cette surcharge sur la couche est d'environ 30 m.

2.2. ARCHITECTURE DU STOCKAGE

La demande d'autorisation de création (**DAC**) de Cigéo porte sur un périmètre d'INB constitué de trois zones :

- une « zone descendrière » en surface, principalement dédiée à la réception des colis de déchets radioactifs, à leur contrôle et à leur préparation pour le stockage avant transfert dans l'installation souterraine ;
- une « zone puits » en surface, dédiée aux installations de soutien aux activités réalisées dans l'installation souterraine et en particulier aux travaux de creusement des ouvrages ;
- la ZIOS, comprenant l'installation souterraine (quartiers de stockage de colis de déchets radioactifs et zones de soutien logistique (**ZSL**)), ainsi que les liaisons surface-fond (**LSF**).

Les zones de surface sont décrites dans le rapport d'expertise GP2 [4] ; les éléments de description ci-après concernent l'installation souterraine à terminaison, en lien avec la sûreté de Cigéo après sa fermeture. La fermeture de l'installation souterraine est décrite au chapitre 2.4 ci-après.

2.2.1. Les liaisons surface-fond

Les LSF [46] comprennent deux descendrières et cinq puits (cf. Figure 3), dont les principales caractéristiques sont rappelées ci-après. Les dispositifs de scellement envisagés dans ces ouvrages sont décrits dans le chapitre 2.4 relatif à la fermeture du stockage.

Les deux tunnels qui constituent la descendrière « colis » (**DSC**) et la descendrière « de service » (**DSS**) sont inclinés d'environ 12 % et s'étendent depuis la zone descendrière en surface vers le sud-ouest [46]. Ils sont parallèles et distants d'environ 60 mètres. La DSC et la DSS, de diamètre excavé de 10 m, sont d'une longueur totale de l'ordre de 4 200 m et 4 600 m, respectivement. Ces tunnels convergent vers la zone de soutien logistique exploitation (**ZSLE**). La descendrière intermédiaire, de l'ordre de 1000 m, résulte de la bifurcation du tunnelier servant à creuser la DSC (cf. Figure 3).

Cinq puits permettent de connecter la zone puits en surface aux ZSL souterraines. Ils sont répartis entre la zone nucléaire et la zone travaux, avec des diamètres utiles de 6 à 8 m et une hauteur comprise entre 520 m et 560 m.

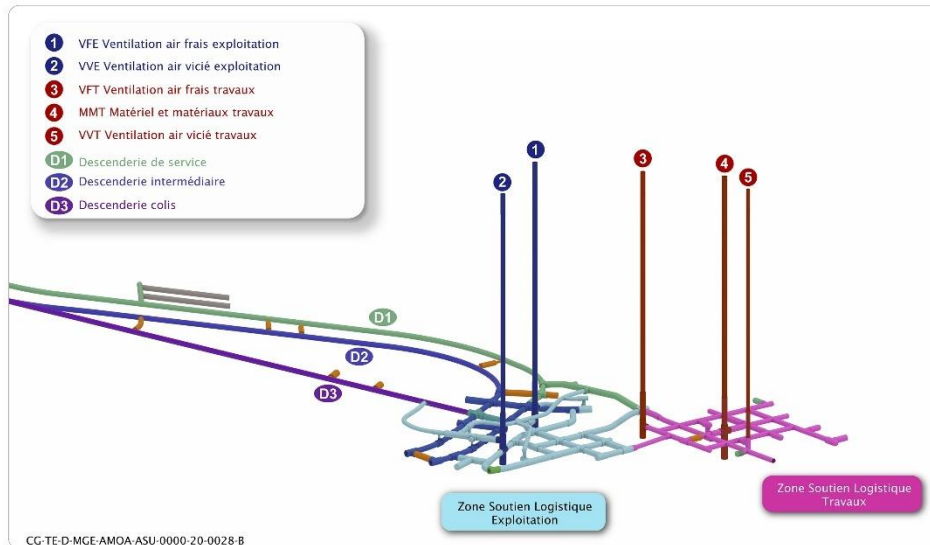


Figure 3 : Illustration des LSF ([46], modifiée).

2.2.2. Les ouvrages souterrains

Principes d'architecture

L'architecture générale de l'installation souterraine (cf. Figure 4) est proche, dans ses grands principes, de celle retenue au stade du DOS, avec notamment [46] :

- des quartiers de stockage sur un seul niveau, afin de maximiser les gardes de COx sain de part et d'autre de l'installation ;
- deux ZSL (ZSLE et zone de soutien logistique « travaux » (**ZSLT**)) regroupant l'arrivée de l'ensemble des LSF, ce qui permet de limiter les différences de charges hydrauliques entre les puits et d'éviter les circulations d'eau en U au sein du stockage ;
- des quartiers de stockage distincts et à terminaison « borgne », limitant les possibilités de drainance hydraulique du stockage et donc la circulation de flux d'eau. Ces quartiers comprennent un quartier de stockage MA-VL, un quartier pilote HA et un quartier de stockage HA, placés respectivement à l'est, au nord-ouest et plus au nord des ZSL ;
- chaque quartier de stockage relié par une galerie de liaison (**GLI**) à la ZSLE avec en son sein des galeries d'accès (**GA**) ;
- dans chaque quartier, des alvéoles de stockage alignées « en peigne » face aux galeries d'accès et orientées selon la contrainte tectonique majeure, pour réduire l'endommagement de la roche par le creusement ;
- des longueurs significatives d'alvéoles de stockage et des alvéoles HA borgnes, favorisant le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques depuis les alvéoles de stockage par diffusion au sein du COx ;
- des scellements, en particulier ceux des LSF, hydrauliquement performants, permettant de limiter les flux d'eau au sein du stockage et d'isoler le stockage de l'Oxfordien calcaire.

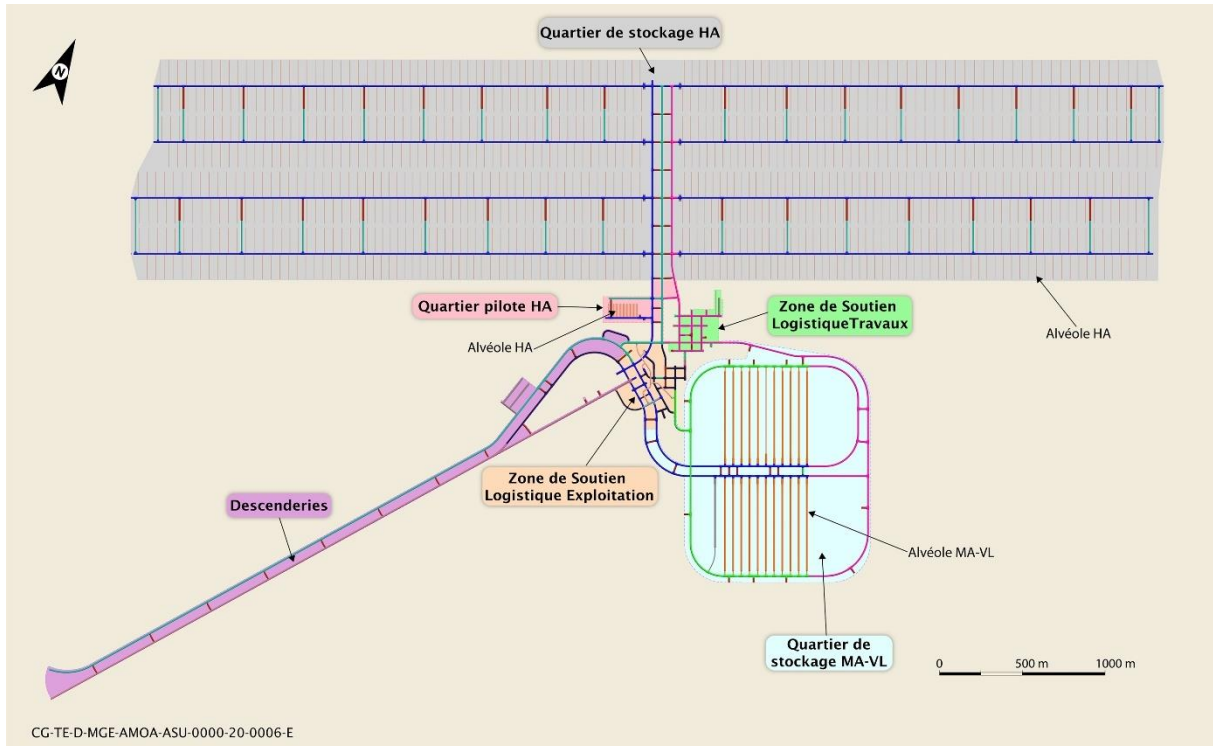


Figure 4 : Schéma de l'installation souterraine de Cigéo [47].

Les principales évolutions de conception depuis le DOS pour les quartiers de stockage HA et MA-VL sont les suivantes :

- le quartier de stockage HA contient désormais quatre GA, contre six au stade du DOS ;
- les alvéoles de stockage HA sont allongées à 150 m (100 m au stade du DOS) ;
- la section excavée de la partie utile de l'alvéole MA-VL de l'ordre de 85 m² (au lieu de 65 m² au maximum au stade du DOS), augmentant la capacité de stockage d'un alvéole et par conséquent, un nombre d'alvéoles réduit à une vingtaine (au lieu d'une cinquantaine), ainsi qu'un quartier moins grand.

En outre, au stade du DDAC, les surfaces occupées par les quartiers de stockage HA et MA-VL de l'inventaire de référence sont d'environ 8 km² et 1,5 km² respectivement. Cette architecture laisse ainsi des emplacements de la ZIOS vacants au-delà du quartier de stockage MA-VL (jusqu'à la bordure est de la ZIOS) et au-delà du quartier de stockage HA (bordure nord de la ZIOS).

Quartier pilote HA et quartier de stockage HA

Le quartier pilote HA [46], constitué d'une vingtaine d'alvéoles, est destiné à recevoir des colis HA parmi les moins exothermiques (colis HA0). Le quartier de stockage HA sera exploité aux alentours de 2080, sur la base du retour d'expérience de l'exploitation du quartier pilote ; il est prévu pour accueillir environ un millier d'alvéoles dédiés principalement au stockage des colis de déchets vitrifiés fortement exothermiques (colis HA1/HA2) (cf. Figure 9). Ces deux quartiers sont en interface avec la ZSL en pied des LSF par l'intermédiaire des trois GLL.

Les alvéoles HA [48] (cf. Figure 5) sont des micro-tunnels montants (pente de l'ordre de 2 % afin de drainer passivement les eaux de ruissellement), borgnes, de l'ordre de 80 m de long pour le quartier pilote HA et 150 m pour le quartier de stockage HA. Ils comprennent une partie utile destinée au stockage des colis et une tête d'alvéole, qui intègre les équipements d'exploitation et de fermeture, et une galerie d'accès en tête d'alvéole. La partie utile de l'alvéole est constituée d'un chemisage en acier non allié dont le diamètre et l'épaisseur sont de l'ordre de 70 cm et 25 mm respectivement. Un matériau de remplissage de l'espace annulaire (**MREA**), à base de ciment, remplit l'espace annulaire entre l'extrados du chemisage et la roche du COx.

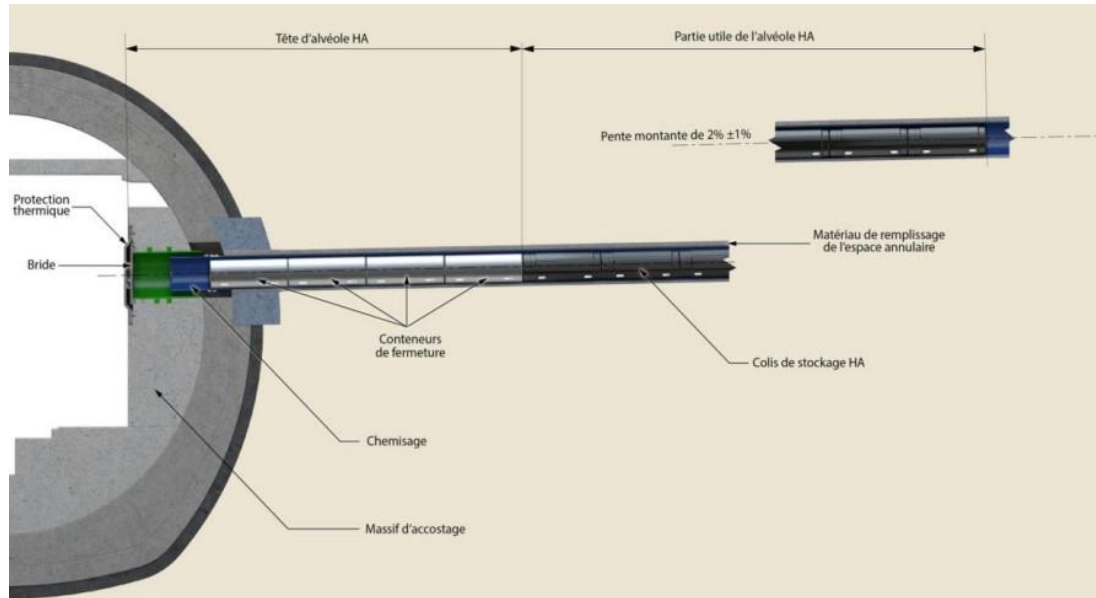


Figure 5 : Schéma de principe d'un alvéole HA en attente de fermeture [49].

Quartier de stockage MA-VL

Le quartier de stockage MA-VL [46] est constitué de 22 alvéoles (plus 4 alvéoles optionnels, cf. chapitre 2.5) et de galeries qui servent à l'exploitation de ces alvéoles (cf. Figure 4). Les alvéoles et leur GA sont placés perpendiculairement à la GLI et à la galerie de retour d'air (**GRA**) (diamètres utiles de l'ordre de 8 m). Les GLI sont formées par un bitube d'entraxe 60 m, formant une boucle autour des alvéoles, et de galeries de recoupe assurant des fonctions techniques et/ou d'évacuation/interventions. Les deux GRA, situées respectivement au nord et au sud des alvéoles et directement connectées au fond des alvéoles, se rejoignent et se raccordent sur le puits « ventilation air vicié exploitation » (**VVE**). Le quartier de stockage MA-VL est ainsi organisé suivant une boucle (« boucle MA-VL ») formée par les GLI et GRA, à partir de laquelle les alvéoles sont progressivement déployés, en s'éloignant de la ZSLE. Par rapport à l'architecture présentée au stade du DOS, il est à noter que le fond des alvéoles du fond du demi-quartier MA-VL nord constitue désormais le point le plus proche de la base des LSF en raison de la galerie de recoupe entre la GRA du demi-quartier nord et la ZSLT (cf. Figure 4).

Les alvéoles MA-VL [50] sont des tunnels d'axe quasi horizontal. Ils sont constitués d'une cellule de manutention (pour la mise en place des colis dans l'alvéole lors de l'exploitation), d'une partie utile de stockage et d'une jonction de retour d'air (**JRA**) en fond de partie utile. La longueur de la partie utile est d'environ 500 m, avec une pente montante ou descendante de l'ordre de 1 % afin de tenir compte du pendage de la couche géologique. Les diamètres utiles diffèrent pour chaque partie de l'alvéole (cf. Figure 6) : de l'ordre de 8 m pour la partie utile et de 4 m pour la JRA.

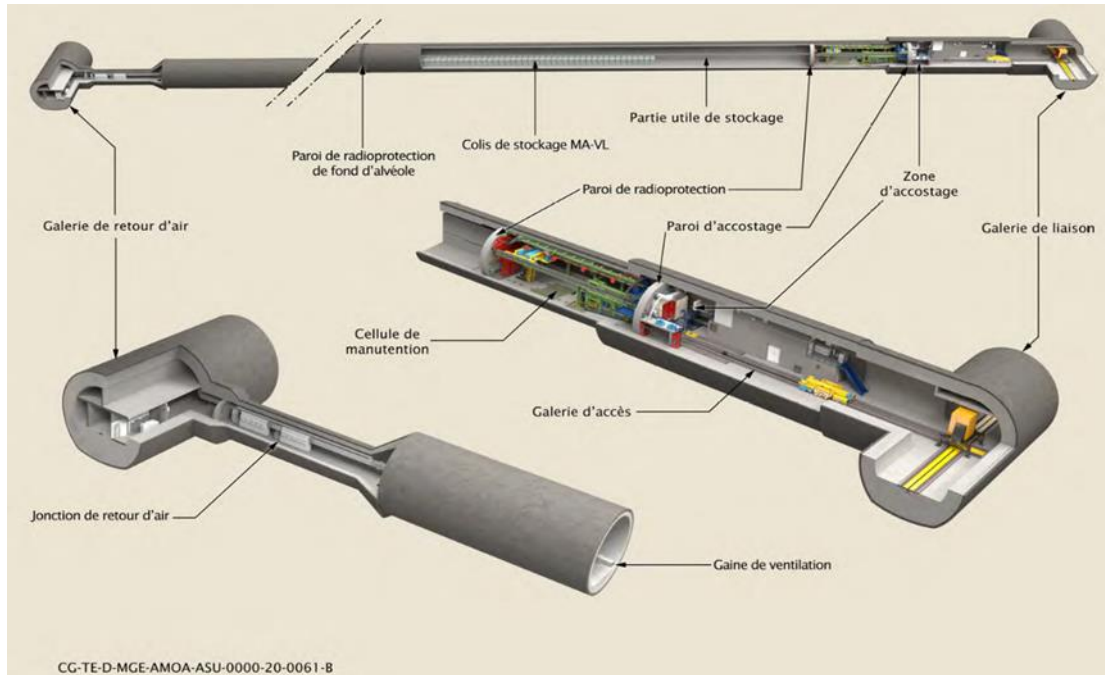


Figure 6 : Illustration des différentes parties d'un alvéole MA-VL [46].

La partie utile de l'alvéole MA-VL comprend un revêtement en béton, avec la présence d'un matériau compressible entre celui-ci et la roche. Les alvéoles MA-VL sont tous semblables, à l'exception de ceux dédiés au stockage des colis de type CS 6 (conteneurs métalliques), de diamètres plus petits. Par ailleurs, l'Andra définit des dispositions de conception restrictives en matière de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL. L'Andra définit une exigence de séparation des colis de déchets MA-VL susceptibles de générer des perturbations chimiques de ceux n'en générant pas ou peu, en les plaçant dans des alvéoles dédiés.

2.3. LES COLIS DE STOCKAGE

L'inventaire de référence retenu par l'Andra dans le DDAC est défini à partir des colis de déchets déjà produits ainsi que des prévisions de production établies dans le cadre de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (IN), qui correspondent à l'exploitation (sur 50 ans pour les réacteurs d'EDF) et le démantèlement de l'ensemble des installations nucléaires (réacteurs, usines, etc.) en fonctionnement ou ayant obtenu leur décret d'autorisation de création avant 2016. Cet inventaire, examiné par l'IRSN dans le cadre du GP1 [2], représente environ 10 000 m³ de déchets HA (près de 56 000 colis primaires) et 73 000 m³ de déchets MA-VL (près de 167 000 colis primaires).

2.3.1. Colis de stockage HA

Les déchets HA de l'inventaire de référence sont principalement (99,4 %) des déchets issus du traitement des combustibles usés des centrales nucléaires, vitrifiés. Le colis de stockage HA [51] est composé d'un conteneur de stockage étanche contenant un ou deux colis primaires (cf. Figure 7). L'Andra retient six modèles de conteneurs de stockage HA, de forme cylindrique, qui se composent d'un corps constitué d'une virole, d'un fond soudé et d'un couvercle de forme convexe muni d'une gorge de manutention, tous trois réalisés en acier à bas carbone non allié (nuance P 285 NH [51]). Quatre patins en céramique massive sont prévus sur le corps du conteneur de stockage pour éviter un contact direct acier/acier entre le colis de stockage et le chemisage de l'alvéole. La longueur des six modèles de conteneurs de stockage HA retenue à ce stade par l'Andra est comprise entre environ 1 m et 2,2 m ; leur diamètre est de l'ordre de 62 cm. Le corps du conteneur a une épaisseur de 65 mm sur la partie courante et 53 mm à l'extrémité, sauf pour le modèle CS 15² (épaisseurs respectivement de 32,5 mm et 20,5 mm).

² Destiné aux colis primaires AVM, moins exothermiques que la plupart des déchets vitrifiés.

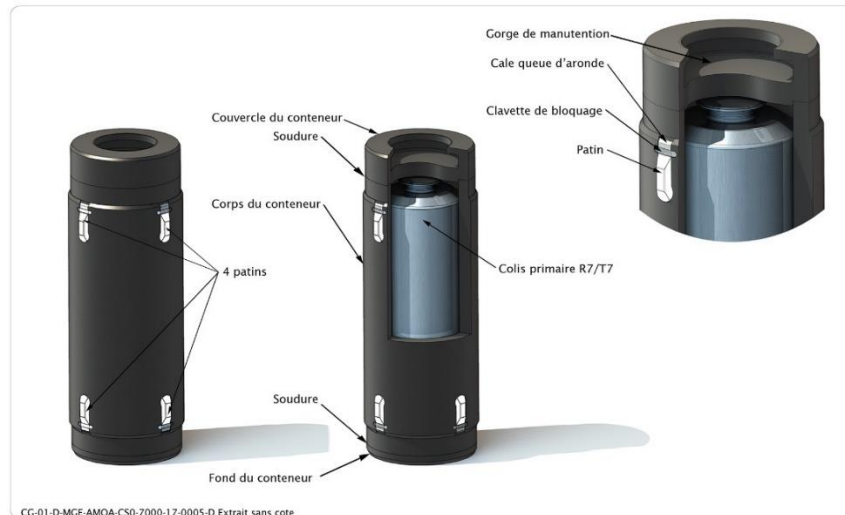


Figure 7 : Illustration des composants d'un conteneur de stockage HA pour le cas de colis primaires de déchets vitrifiés provenant de l'usine d'Orano La Hague [52].

2.3.2. Colis de stockage MA-VL

Les déchets MA-VL [52] de l'inventaire de référence sont principalement des déchets de structure issus du traitement des combustibles usés (37 % des colis de déchets MA-VL), des déchets résultant du traitement des effluents liquides des installations nucléaires (38 %) et des déchets technologiques activés (3 %) ou contaminés (19 %) issus de l'exploitation ou du démantèlement des installations nucléaires. Deux modes de stockage sont retenus pour le stockage de déchets MA-VL : le stockage des colis primaires en conteneur de stockage (cf. Figure 8) ou le « stockage direct », consistant à la mise en place du colis primaire directement en alvéole de stockage.

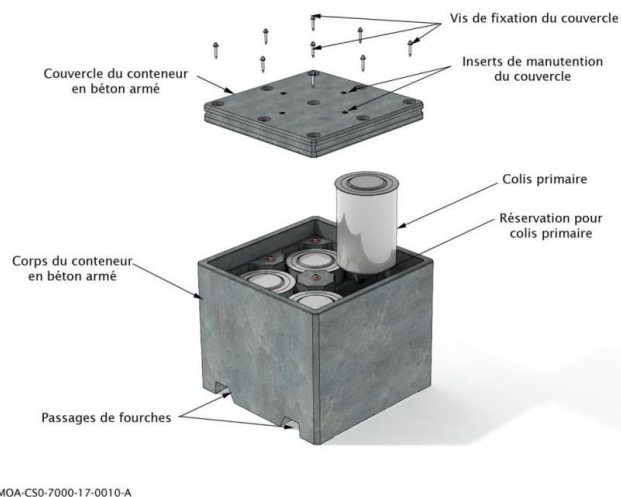


Figure 8 : Illustration des composants d'un conteneur de stockage MA-VL de type CS4.1 [52].

L'Andra a retenu 13 modèles de conteneurs de stockage MA-VL, rassemblés en 7 types nommés CS 1 à CS 7. Les conteneurs sont de forme parallélépipédique, en béton armé pour la majorité des familles de colis (CS 1 à CS 5) et en acier non allié (nuance S355) pour quelques familles de colis (CS 6 et CS 7). Les conteneurs de stockage MA-VL sont dimensionnés pour accueillir un à cinq colis primaires. Les colis de stockage MA-VL ont des dimensions de 1,28 m à 2,25 m de côté.

2.4. FERMETURE DU STOCKAGE

Après décret de démantèlement, à l'horizon de 2150 dans le calendrier actuel présenté par l'Andra, la phase de démantèlement et de fermeture (cf. expertise GP2 [4]) vise l'arrêt des opérations, la déconstruction des bâtiments

nucléaires de surface et la mise en sécurité passive du stockage. Après l'autorisation de fermeture et de passage en phase de surveillance, une phase de surveillance, puis une phase de « post-surveillance » constituent la période après fermeture. Cigéo est destiné, une fois fermé, à assurer de manière passive les fonctions de sûreté après fermeture.

La fermeture de Cigéo comprend notamment l'obturation des alvéoles de stockage, un remblayage des ouvrages souterrains et la mise en place de scellements. Les scellements, décrits ci-après au chapitre 2.4.2 et intégrés à l'expertise du GP1 [2], sont des ouvrages de faible perméabilité dont le rôle principal est de s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage. Ils contribuent également à la fonction de soutien mécanique de la roche, au même titre que les remblais.

2.4.1. Fermeture des ouvrages souterrains

Les opérations de fermeture dans le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA sont identiques. Un bouchon de fermeture est mis en place dès la fin du remplissage d'un alvéole HA. Il consiste en quatre conteneurs métalliques remplis d'un matériau argileux, dont le gonflement va conduire à l'ouverture des conteneurs et à l'obturation de la tête d'alvéole. Les équipements dans la GA présentant un important volume de vides ou en acier sont démantelés. Les radiers et les revêtements sont laissés en place. Les vides résiduels, la galerie d'accès HA et les recoupes sont remblayés intégralement par un matériau composé d'argilites issues des déblais de creusement (provenant des « verses vives »), additionné le cas échéant d'autres matériaux destinés à en ajuster les propriétés, faciliter sa fabrication ou sa mise en place. La fermeture des GLI commence également par des opérations de démantèlement des équipements, de comblement des radiers et de remblayage, de façon similaire aux GA. Six scellements de fond sont prévus dans les GLI de la zone de stockage HA (cf. Figure 9).

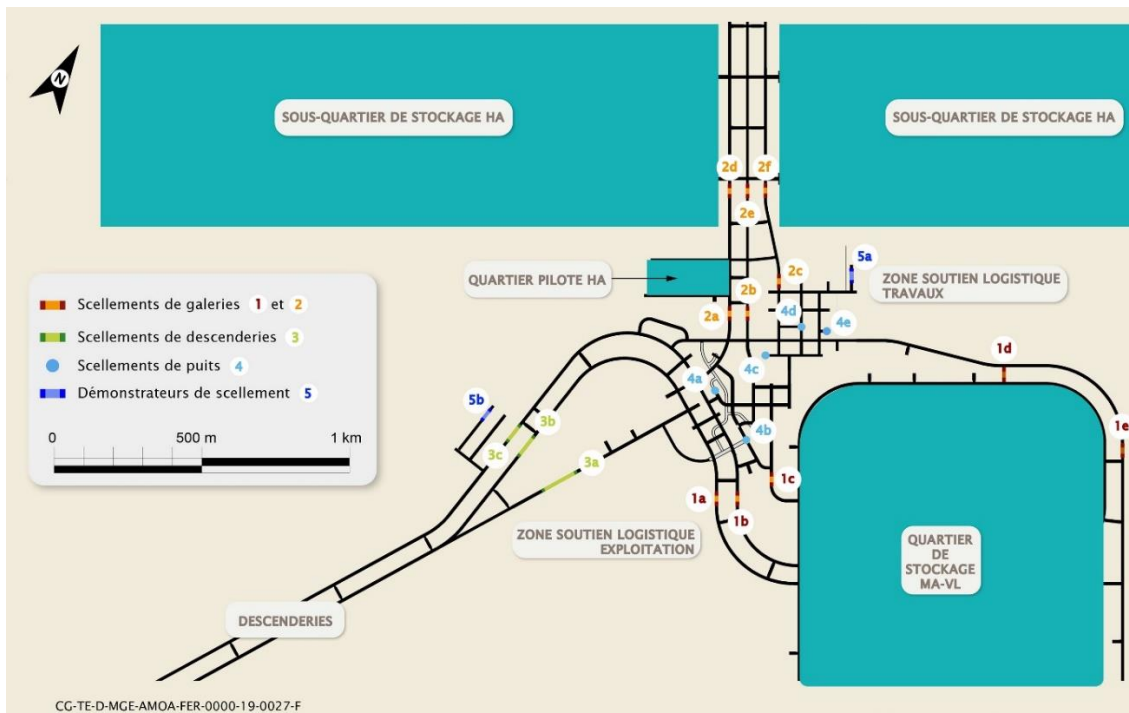


Figure 9 : Localisation des scellements de fond pour le quartier MA-VL (1), pour les quartiers pilote et de stockage HA (2), et projection des scellements de descenteries (3) et de puits (4) [53].

La fermeture des alvéoles MA-VL [49] commence par un démantèlement des équipements, l'arrêt de la ventilation nucléaire et la mise en place d'une ventilation secondaire, puis la GA et la JRA sont remblayées (cf. Figure 10). Dans la partie utile de l'alvéole, la limitation des taux de vides est assurée par les colis (pas de remblayage). La fermeture des galeries restantes se fait par tronçons successifs et commence par des opérations similaires aux GA. Au stade du DDAC, les options de conception de référence ne prévoient pas la mise en place de scellement aux extrémités des alvéoles MA-VL (cf. Figure 10), mais l'architecture en laisse la possibilité de choix aux

générations futures [50]. Cinq scellements de fond sont prévus pour le quartier de stockage MA-VL (cf. chapitre 2.4.2).

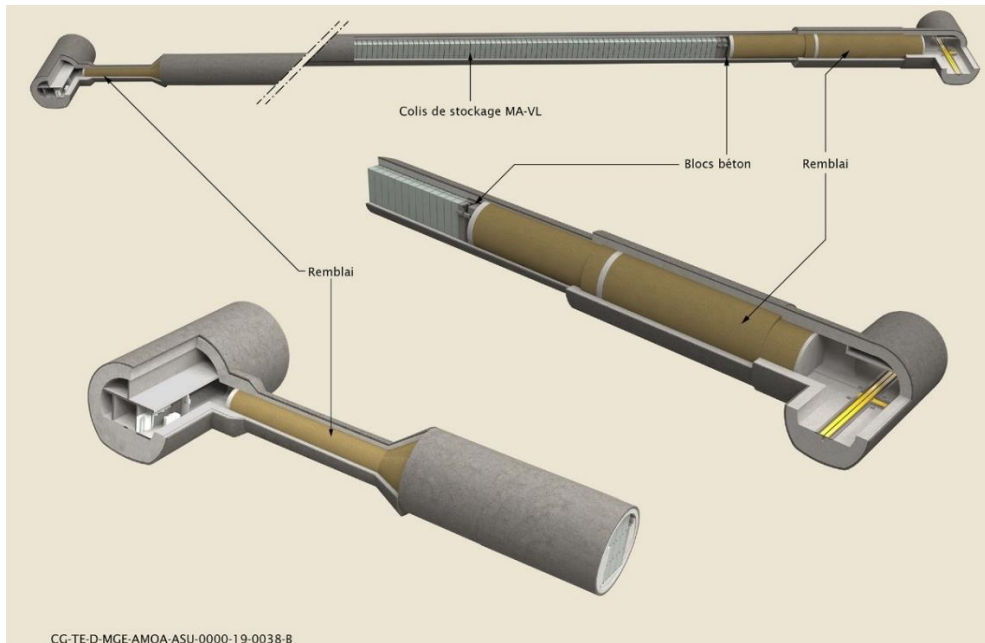


Figure 10 : Illustration d'un alvéole MA-VL complètement fermé [50].

Enfin, lorsque toutes les galeries des deux zones de stockage sont comblées et les différents scellements réalisés, les galeries des ZSL exploitation et travaux sont intégralement remblayées avec un matériau similaire à celui utilisé pour la fermeture des quartiers de stockage.

2.4.2. Les ouvrages de scellements

Les scellements de fond

L'Andra prévoit d'implanter des « scellements horizontaux » ou « scellements de fond » dans des galeries du niveau principal du stockage, c'est-à-dire dans l'UA du COx. Ils sont localisés (cf. figure 9) de telle sorte que chaque quartier de stockage soit séparé de la surface par à minima deux scellements (un voire deux de scellements de fond, un scellement de LSF). Les tronçons de galerie destinés à recevoir des scellements horizontaux sont orientés parallèlement à la contrainte horizontale majeure afin de limiter la zone endommagée induite par l'excavation [54]. Le concept de référence prévu par l'Andra pour les scellements de fond consiste à mettre en place un noyau à base d'argile gonflante (bentonite) sur une longueur de l'ordre de 20 m, après dépose du revêtement sur une partie de cette longueur (cf. Figure 11). Afin de contraindre son gonflement et favoriser la mise en contact avec la roche, des massifs d'appui en béton ancrés dans la roche, d'une longueur de l'ordre de 14 m, sont placés de part et d'autre du noyau. La mise en œuvre des composants du scellement est permise par la réalisation de murs de soutènement. Afin de limiter les pressions de gaz attendues après fermeture du stockage, la conception des ouvrages de fermeture prévoit désormais qu'ils soient « passants au gaz » (évolution par rapport au DOS). Pour satisfaire à cette exigence, les noyaux de scellement sont composés d'un mélange de bentonite et d'additifs, tels que du sable [54].

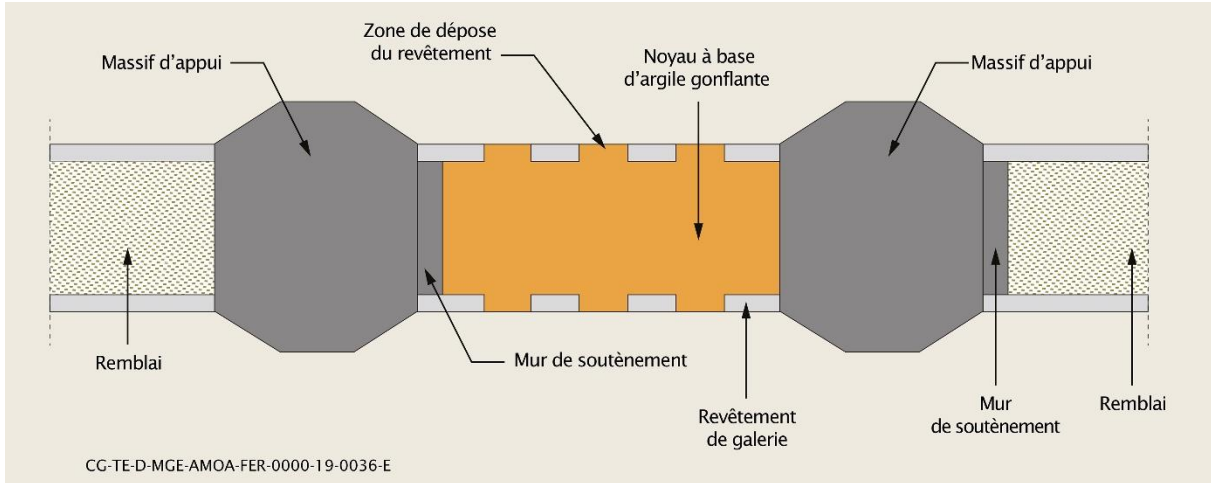


Figure 11 : Schéma de principe de l'option de référence pour les scellements de fond [49].

Les scellements des liaisons surface-fond

L'Andra prévoit que les LSF soient intégralement remblayées avec une compacité maximale afin de minimiser les vides. Au cours de ce remblayage, dans la partie supérieure du COx, les descenderies et les puits sont chacun fermés par un scellement à base d'argile gonflante. Ainsi qu'illustré en Figure 12, le scellement est mis en place au droit de l'USC, zone disponible de l'unité géologique la plus carbonatée, et de l'UT sous-jacente [49]. Pour assurer un contact direct entre l'argile gonflante du noyau et les argilites, les revêtements des puits et des descenderies sont déposés au moment de la mise en place du noyau de scellement. La longueur du noyau d'argile est de 23 à 40 m selon les puits, et d'environ 60 ou 100 m selon les descenderies [55][56]. Le confinement mécanique du noyau gonflant, assuré par des massifs d'appui en béton, permet de garantir la pérennité des performances hydrauliques et de stabilité hydromécanique du noyau. En puits, ces massifs de béton sont coulés sur toute la hauteur sous-jacente du noyau d'argile gonflante et, sur la partie supérieure, ils sont frottants et maintenus en place gravitairement par la pression du remblai sus-jacent. En descenderie, ils sont ancrés dans les argilites.

Des ouvrages de fermeture de séparation des formations aquifères de l'Oxfordien calcaire et du Tithonien sont prévus en partie supérieure du Kimméridgien, conformément au Code de l'environnement. Enfin, le trou de forage permettant le passage de la colonne à carburant est mis à nu et scellé à l'aide de bentonite à partir de la surface.

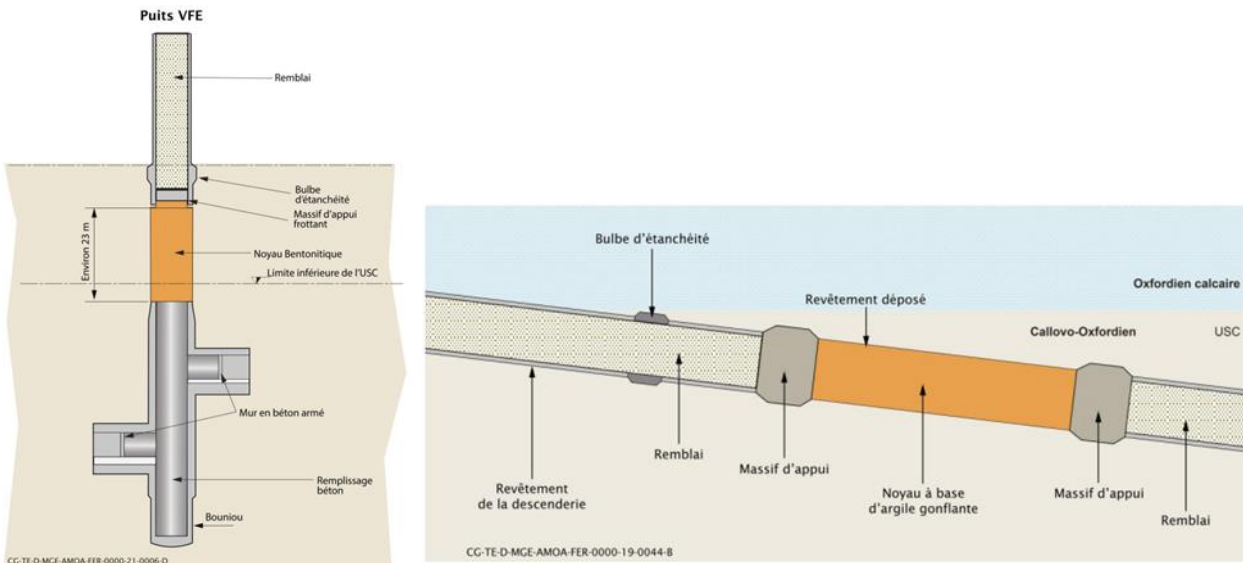


Figure 12 : Schémas de principe des scellements de puits et de descenderies [49].

2.5. ADAPTABILITE DE CIGEO A L'INVENTAIRE DE RESERVE

Conformément à l'article D.542-91 du Code de l'environnement, l'Andra présente dans le DDAC, en complément de l'inventaire de référence, un inventaire de réserve sur la base duquel sont menées les études d'adaptabilité³ de Cigéo [57]. Cet inventaire de réserve intègre :

- des colis de stockage HA et MA-VL liés à l'augmentation de la durée de fonctionnement du parc actuel entre 50 et 60 ans selon les réacteurs (scénario de politique énergétique prospectif dit « SR1 ») ;
- des combustibles usés (CU) en cas d'arrêt du recyclage (scénario dit « SNR enveloppe ») ;
- et des déchets FA-VL au titre des incertitudes liées à la mise en place de leur filière de gestion (scénario dit « FAVL »).

De plus, à la demande de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), l'Andra a réalisé une étude de l'impact sur les filières de gestion, dont Cigéo, des déchets radioactifs générés par le déploiement de six réacteurs EPR2, mis en service par paires tous les quatre ans entre 2035 et 2044 pour une durée de 60 ans (projet nouveau nucléaire français (NNF)) [57], nommé inventaire de réserve « augmenté » dans les expertises GP1 et GP2. L'Andra a également étudié l'impact sur Cigéo des déchets générés par l'allongement de la durée de fonctionnement de l'ensemble du parc actuel à 60 ans. Ces déchets ne sont pas intégrés par l'Andra à l'inventaire de réserve transmis dans le DDAC ; ils seront intégrés dans sa mise à jour avant l'enquête publique. PSE-ENV rappelle que dans le cas où il serait envisagé de stocker dans Cigéo d'autres déchets que ceux autorisés par un décret pris sur la base du dossier objet de la présente expertise, une démonstration de sûreté complémentaire devra être apportée.

Dans le cadre des études d'adaptabilité de Cigéo au stockage des colis de l'inventaire de réserve tel que présenté dans le DDAC, l'Andra conserve les grands principes d'architecture de l'installation, en particulier le stockage sur un seul niveau à environ 500 m de profondeur dans le COx, des quartiers de stockage distincts et à terminaison « borgne » (séparation des quartiers HA-CU, MA-VL et FA-VL), ainsi que le regroupement de la base des LSF. Les concepts des alvéoles de stockage des colis FA-VL et des CU sont respectivement similaires à ceux des colis MA-VL et des colis HA. Les principes de dimensionnement du quartier de stockage des colis HA (alvéoles horizontales et borgnes, exigences thermiques, entraxes selon les critères thermo-hydropneumatique (THM)) de l'inventaire de référence sont également maintenus. Les Figures 13 et 14 illustrent l'architecture des deux zones de stockage dans le cas du scénario « SNR enveloppe + FA-VL ».

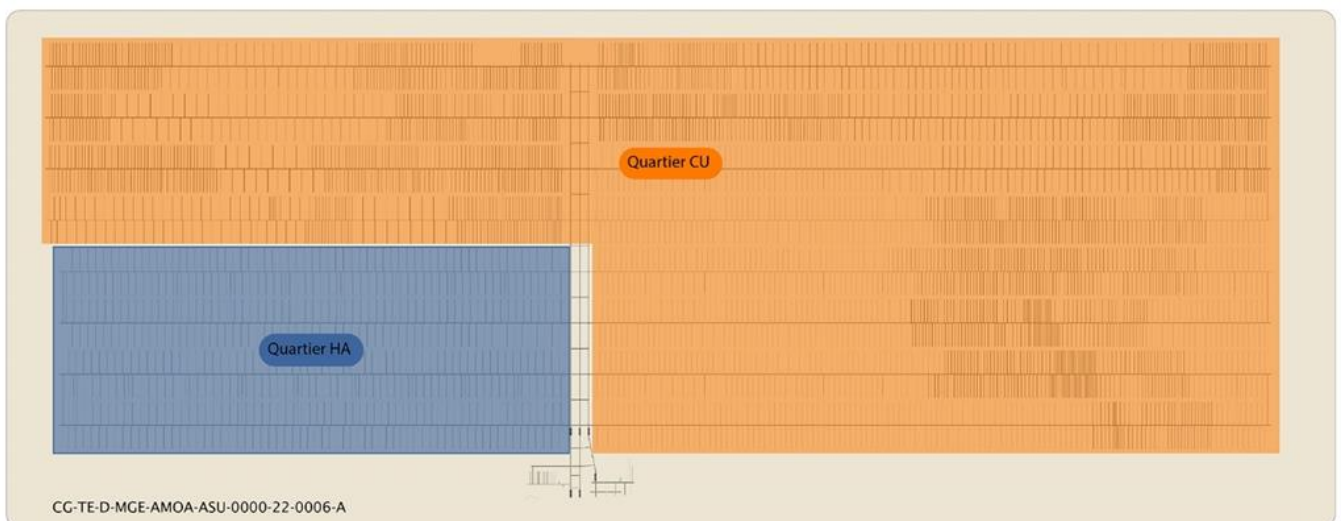


Figure 13 : Illustration du quartier de stockage des CU de l'inventaire de réserve [57].

³ D'après l'Andra, « l'adaptabilité consiste à couvrir les incertitudes sur les inventaires en nombre et typologies de colis liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique par la vérification de la faisabilité du stockage des colis de l'inventaire de réserve et par l'identification d'évolutions dans sa conception et/ou de dispositions conservatoires à mettre en place dès sa construction initiale ».

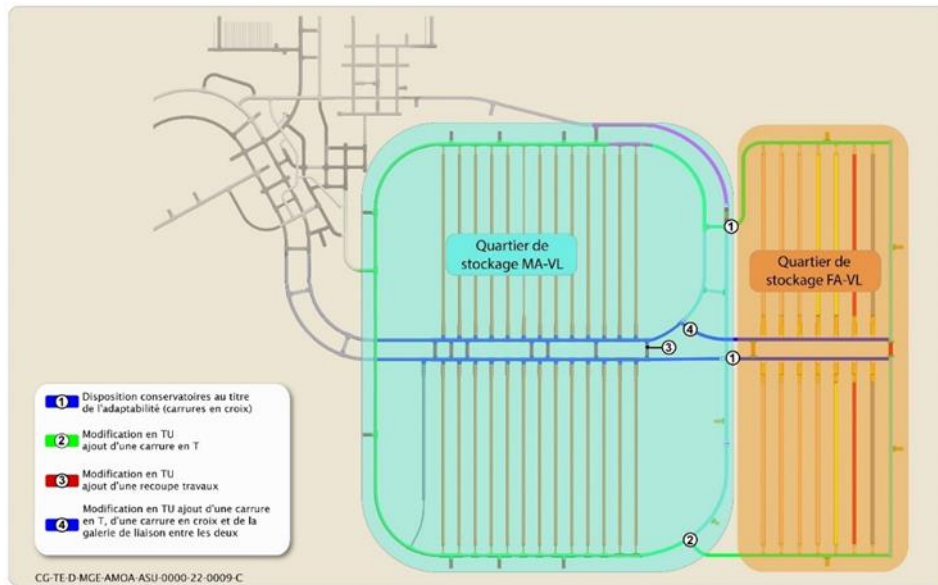


Figure 14 : Illustration du quartier de stockage dédié aux déchets FA-VL de l'inventaire de réserve [57].

3. SUITES GP1 ET GP2 : CORROSION ET SEISME EN PHASE D'EXPLOITATION

3.1. CORROSION DES ACIERS

Pour rappel, l'expertise GP1 [2] a mis en évidence des vitesses de corrosion significatives en présence de la première formulation du matériau cimentaire prévu dans l'espace annulaire entre la roche et le chemisage (MREA) testée par l'Andra au stade du DDAC, qui ne permettent pas de garantir la réalisation des fonctions associées au chemisage et au conteneur de stockage d'un alvéole HA. L'Andra avait alors indiqué travailler à l'élaboration d'autres formulations, avec des résultats préliminaires encourageants, et présenté les grandes lignes de son programme de recherche avec ces nouvelles formulations de MREA. En conséquence et sur la base de la recommandation formulée par le GPD [6], l'ASN a demandé à l'Andra, par lettre CODEP-DRC-2024-027947 du 30 mai 2024 [59], de préciser son programme de recherche et les échéances d'obtention des résultats au cours de la phase industrielle pilote afin de pouvoir en temps utile conforter le dimensionnement retenu des composants métalliques de l'alvéole HA, et de transmettre les premiers résultats qu'elle a obtenus par ce programme. Aussi, l'Andra a transmis, au cours de l'expertise du GP3, une présentation synthétique du programme qu'elle conduit sur la corrosion des composants métalliques des alvéoles HA [60], complétée par les principaux résultats obtenus à la date de fin août 2024 [61].

S'agissant du programme de recherche, le document présente les orientations des travaux, en cours et à venir, qui suivent deux grands objectifs corrélés : (i) consolider la démonstration du respect des exigences applicables au chemisage et au conteneur de stockage HA vis-à-vis de la corrosion et (ii) préparer la réalisation du quartier pilote HA, notamment via le choix de la formulation du MREA injecté à l'extrados du chemisage. Ce programme est construit autour de trois jalons temporels principaux :

- 2028 pour le choix de(s) formulation(s) de MREA pour les démonstrateurs d'alvéole HA qui seront réalisés au laboratoire LSMHM ;
- 2032 pour le choix d'une formulation de MREA pour la réalisation des alvéoles du quartier pilote HA, qui sera testée dans un démonstrateur d'alvéole HA au LSMHM ;
- 2035 et 2040 pour des ajustements éventuels de cette formulation.

Les grandes thématiques d'études sont précisées, en lien avec les différentes conditions d'environnement auxquelles seront confrontés les éléments métalliques des alvéoles HA en situation de stockage, à savoir la corrosion sous eau et/ou atmosphère humide, en présence de MREA et avec la prise en compte de facteurs environnementaux tels que le transitoire oxydant, la température, les rayonnements ionisants, l'activité bactérienne ou encore les contraintes mécaniques inhérentes au comportement de la roche hôte. Elles comprennent l'évaluation de l'effet d'un éventuel contact avec des débris de roche sur les types et vitesses de corrosion des aciers. Ce programme de recherche présente également les différents types d'essais (i.e., essais simplifiés ou paramétriques, essais intégrés de type maquette, démonstrateurs *in situ* ; sur des surfaces métalliques préalablement corrodées ou non), de moyens de mesure de la vitesse de corrosion (i.e., mesures gravimétriques, électrochimiques ou résistives et méthodes de caractérisation post-mortem) et de modélisation mis en œuvre ou prévus.

Parmi les orientations retenues par l'Andra et comme annoncé au cours de l'expertise GP1 [2], PSE-ENV relève en particulier l'abandon de la première formulation étudiée de MREA à pH modéré (III/C-FS50B) et l'orientation des recherches vers des formulations à pH plus élevé, caractérisées par une réserve alcaline plus importante et une diminution des teneurs en soufre. A cet égard, l'Andra indique prioriser les études associées à une formulation de MREA (II/A-fc-adj) basée sur un ciment de type CEM II qui, selon elle, présente dans l'état actuel des connaissances les meilleures garanties de protection/passivation de l'acier du fait de ses caractéristiques particulières (pH initial élevé, absence de soufre, faible porosité à l'état sec). Le programme de recherche spécifie que certains essais concernant une formulation précédente (III/A-FS10B), déjà engagés et mis en place *in situ* dans différents démonstrateurs d'alvéole HA et dans des essais en laboratoire jour, seront poursuivis. A cet égard, PSE-ENV relève que l'Andra prévoit toujours [61] la réalisation de deux démonstrateurs d'alvéoles HA (HAR2 et HAR3), respectivement fin 2025 et fin 2026 au LSMHM, qui mettent tous deux en jeu cette même formulation de MREA (III/A-FS10B) contenant des sulfures et donc très certainement amenée à être abandonnée comme formulation de référence. Au cours de la réunion préparatoire à la troisième séance d'examen par le GPD, tenue

le 8 avril 2025, l'Andra a indiqué qu'il s'agit de disposer de résultats acquis aux différentes échelles (laboratoires jour, *in situ*) avec une même formulation de MREA et ainsi consolider l'interprétation de ces essais en termes de processus de corrosion en jeu ; elle a précisé que les démonstrateurs HAR4, 5 et 6, également prévus au LSMHM (entre 2028 et 2030), seraient réalisés avec la nouvelle formulation priorisée de MREA.

PSE-ENV souligne, comme lors de l'expertise GP1, la complétude de la démarche qui fonde le programme de recherche sur la corrosion développé par l'Andra, en termes d'approches expérimentales jour/fond et de prise en compte des paramètres environnementaux représentatifs des conditions pouvant prévaloir en stockage. PSE-ENV convient en outre que la formulation sur laquelle l'Andra priorise ses recherches présente, en première approche, des caractéristiques plus favorables à la protection de l'acier (pH plus élevé, absence de soufre et diminution de la porosité), ce qui est de nature à diminuer les vitesses de corrosion mises en exergue par l'IRSN lors du GP1 [2] et à limiter les processus de corrosion localisée. Néanmoins, PSE-ENV constate que le programme de recherche transmis concerne principalement la corrosion en présence du MREA et considère que les études menées devraient également porter sur le matériau MREA, en particulier sur son ouvrabilité (injectabilité garantissant le remplissage de tout le volume de l'espace annulaire sur la longueur de l'alvéole par un matériau de composition homogène) ainsi que sur la vérification de l'absence d'impact sur les matrices vitreuses des colis de déchets au regard de la sûreté à long terme (en lien notamment avec l'évolution du pH dans l'environnement cimentaire du MREA). PSE-ENV relève à cet égard que l'Andra soulignait au stade du GP2 [4] que l'injection du MREA dans l'espace annulaire entre le chemisage et la roche faisait partie des incertitudes résiduelles relatives à la constructibilité, et a précisé au cours de la présente expertise que la sélection de la formulation qu'elle prévoit de tester est soumise notamment à la vérification de sa pompabilité [61].

S'agissant des résultats obtenus par l'Andra à ce stade, PSE-ENV observe que les résultats disponibles, outre ceux relatifs à la formulation III/C-FS50B abandonnée, **concernent quasi-exclusivement des études menées avec la formulation de MREA III/A-FS10B (à l'exception d'un essai avec la formulation II/A-B10), formulation contenant des sulfures qui ne devrait pas être retenue *in fine* (cf. *supra*).** Les résultats présentés sur cette formulation III/A-FS10B font état de modes de corrosion majoritairement homogènes et de valeurs de vitesse de corrosion qui, dans l'ensemble, diminuent avec le temps et sont pour la grande majorité inférieures à 10 µm/an (vitesse de corrosion de référence retenue par l'Andra pour le dimensionnement du chemisage et du conteneur de stockage en acier au carbone des alvéoles HA), donc plus faibles que celles obtenues avec la première formulation de MREA testée. PSE-ENV constate néanmoins la formation de sulfures de fer et, localement, la présence de piqûres dont la profondeur peut atteindre jusqu'à 34 µm après 16 semaines d'interaction. Ceci montre, selon PSE-ENV, que la formulation précitée ne garantit pas les conditions de passivation de l'acier recherchées. Par ailleurs, l'Andra souligne l'existence probable de perturbations des mesures électrochimiques, induites par la présence de soufre et de sulfures s'oxydant en présence d'oxygène, qui tendraient à majorer les vitesses de corrosion obtenues via ces méthodes expérimentales. A cet égard, PSE-ENV encourage l'Andra à procéder, pour tous les types d'essais à venir, à des mesures directes des vitesses de corrosion par gravimétrie pour fonder le dimensionnement vis-à-vis de la corrosion généralisée, couplées à des caractérisations *post-mortem* pour évaluer l'occurrence de phénomènes de corrosion localisée et mesurer la profondeur des piqûres le cas échéant, et ce même si différentes techniques électrochimiques complémentaires sont utilisées en parallèle.

De manière plus générale, au vu des éléments ci-avant, **PSE-ENV relève l'avancement limité du programme de recherche à ce stade** et observe que les quelques résultats complémentaires présentés suite au GP1 ont permis à l'Andra de préciser la formulation vers laquelle elle s'oriente, sans pour autant constituer des éléments de nature à lever les réserves émises à l'issue de l'expertise GP1. **Aussi, comme à l'issue de l'expertise GP1, PSE-ENV estime qu'à ce stade, les données disponibles pour justifier le dimensionnement des composants métalliques de l'alvéole HA restent marquées par des incertitudes significatives, ce qui constitue un point d'attention pour statuer sur la pertinence du concept d'alvéole HA retenu dans le DDAC.** PSE-ENV considère en outre que les échéances annoncées pour les principaux jalons du programme de recherche paraissent globalement plausibles mais attire l'attention sur le fait que leur respect est notamment conditionné à la robustesse des résultats qui seront acquis avec la formulation priorisée (II/A-fc-adj) aux diverses étapes de ce programme. PSE-ENV encourage à cet égard l'Andra à poursuivre les travaux prospectifs engagés de manière parallèle sur des conceptions alternatives de composants des alvéoles HA (conteneurs en céramique,

protection cathodique et revêtements sacrificiels, coulis d'injection de type géopolymère, etc.) [62]. Enfin, PSE-ENV rappelle, comme indiqué à l'issue de l'expertise GP2 [4], que l'Andra devra présenter, avant le creusement du quartier pilote HA, les résultats du programme de démonstrateurs d'alvéole HA et compléter sur cette base la démonstration de sûreté du stockage des colis HA ; ce point a fait l'objet de l'engagement 2024-E28 pris par l'Andra à l'issue de l'expertise GP2.

3.2. DIMENSIONNEMENT AU SEISME PENDANT LA PHASE D'EXPLOITATION

A l'issue de l'expertise GP2 [4], l'IRSN a souligné que le spectre envisagé par l'Andra comme spectre de dimensionnement (**SDD**) dans le DDAC, nommé ci-après SDD-2023, était insuffisant pour couvrir les incertitudes relatives à la définition de l'aléa sismique. Aussi, l'IRSN a recommandé à l'Andra de retenir, pour les études ultérieures de dimensionnement de l'installation, un SDD en phase d'exploitation au niveau 1,5 x SDD-2016 dans la mesure où ce spectre couvrirait selon l'IRSN les incertitudes de manière satisfaisante. L'Andra a pris sur ce point l'engagement 2024-E41, qui visait à établir, avant fin décembre 2024, un nouveau SDD basé sur une mise à jour de son exploration des incertitudes au niveau du séisme majoré de sécurité (**SMS**) qui tienne compte d'une majoration de 0,5 de la magnitude du moment (**Mw**) et d'une propagation de l'ensemble des spectres explorés pour construire la distribution.

En réponse à l'engagement précité, l'Andra a défini [63] un nouveau SDD, appelé « SDD-2024 », sur la base d'une mise à jour de son analyse de robustesse menée sur SMS. Suite à des échanges avec PSE-ENV sur les évolutions de ce spectre aux fréquences inférieures à 5 Hz, l'Andra a transmis [64] un autre spectre de dimensionnement révisé, dit « SDD-2025 », finalement retenu pour la phase d'exploitation de Cigéo. La Figure 15 ci-dessous représente le SDD-2025 (en pointillés rouges) ainsi que les spectres précédemment envisagés par l'Andra pour le dimensionnement de l'installation. L'Andra précise que cette mise à jour intègre les points d'attention relevés par PSE-ENV [4] concernant la majoration de la magnitude du séisme maximal historiquement vraisemblable (**SMHV**) et préserve la diversité des estimations des spectres médians issues de l'exploration des incertitudes au niveau SMS exprimées sur la base de distributions de spectres associés aux centiles visés. PSE-ENV estime que la dernière mise à jour du spectre de dimensionnement suit les préconisations émises lors de l'expertise GP2 [4], dans la mesure où ce SDD-2025 est proche du 75 % percentile de la distribution de GMM⁴ pour les fréquences supérieures à 5 Hz, **ce qui est satisfaisant**.

⁴ Ground Motion Model – Modèle ou équation de prédiction du mouvement sismique.

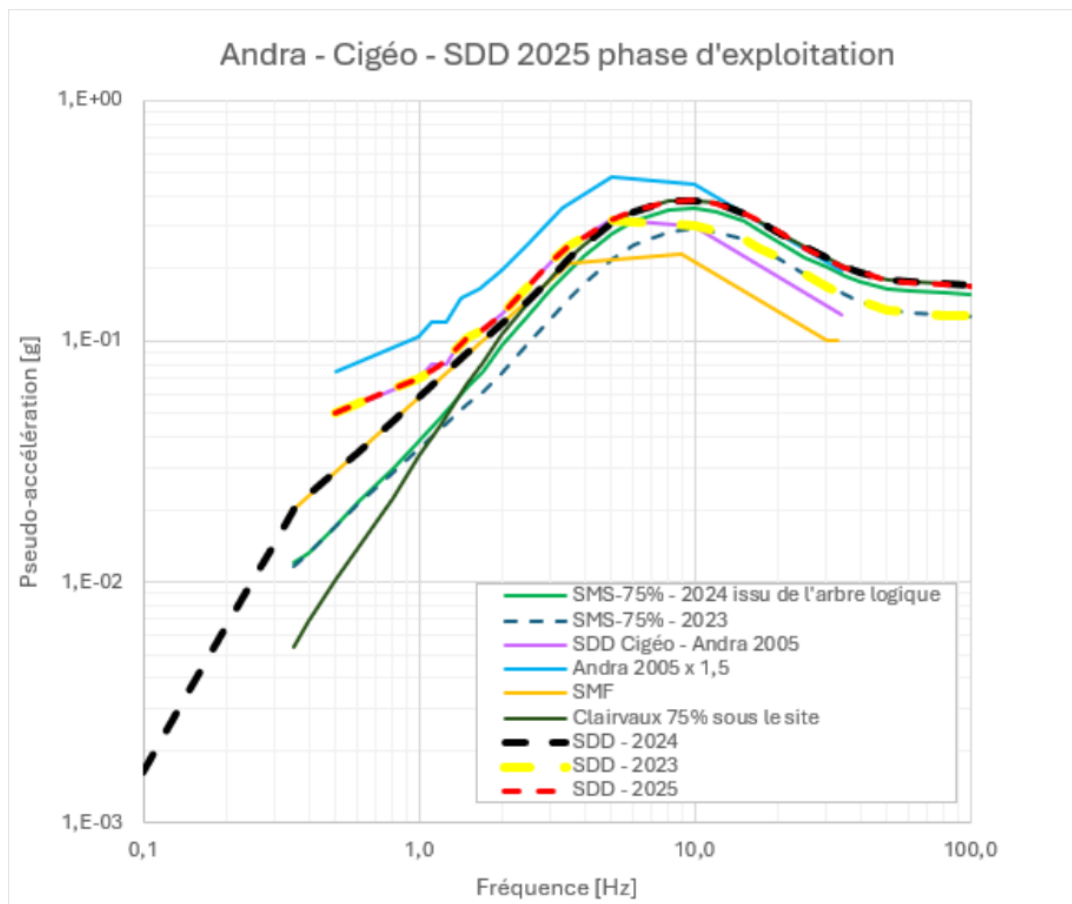


Figure 15 : « SDD-2025 » (en pointillés rouges) retenu par l'Andra pour la phase d'exploitation.

4. DEMARCHE D'EVALUATION DE SURETE APRES FERMETURE

En liminaire, l'Andra indique que l'évaluation de la sûreté après fermeture de Cigéo a pour principal objectif, en cohérence avec le guide n°1 de l'ASN [11], de s'assurer de sa sûreté passive sur le long terme, c'est à dire sans qu'il soit nécessaire d'intervenir, afin de protéger les personnes et l'environnement envers les risques liés à la dissémination des substances radioactives et toxiques chimiques. Cette évaluation doit en outre montrer la sûreté et la robustesse du système de stockage, composé du milieu naturel (*i.e.* la roche hôte du COx), des composants ouvragés du stockage et des colis de déchets, en regard des incertitudes liées à l'état des connaissances (ou « données de base », cf. GP1) et en particulier celles relatives à l'évolution à long terme de ce système et du milieu géologique.

Dans le présent chapitre, PSE-ENV examine la démarche générale suivie par l'Andra pour évaluer la sûreté de Cigéo après sa fermeture, ainsi que les fonctions de sûreté et les objectifs de protection qu'elle retient. La définition des biosphères et les dispositifs relatifs à la mémoire de Cigéo à long terme sont également expertisés ci-après. Les scénarios d'évolution du système de stockage après fermeture ainsi que les évaluations quantitatives associées font quant à eux l'objet des chapitres 5 à 8 du présent rapport.

4.1. DEMARCHE GENERALE

Comme au stade du DOS, l'évaluation de sûreté en phase après fermeture menée par l'Andra comprend deux volets : l'analyse qualitative des risques⁵ et des incertitudes (**ARI**) associées à l'évolution future des composants du stockage, et l'évaluation quantitative de la prise en compte de ces risques et incertitudes en regard notamment de l'impact radiologique. Pour un composant contribuant à une fonction de sûreté (cf. chapitre 4.2) et sur la base des données et connaissances scientifiques relatives au système de stockage dont l'examen par l'IRSN a fait l'objet du GP1 [2], l'analyse qualitative conduit à examiner si les risques et incertitudes identifiés peuvent affecter la réalisation de la fonction de sûreté et l'atteinte des performances allouées à ce composant et/ou avoir une influence sur un autre composant au regard de ses fonctions de sûreté et performances associées. Ainsi, s'agissant du premier volet, l'ARI conduit l'Andra à définir des scénarios d'évolution du stockage après sa fermeture (cf. chapitre 5.3), classés selon leur probabilité d'occurrence :

- le scénario d'évolution normale (**SEN**) ou « domaine d'évolution normale », qui correspond à l'évolution prévisible de l'installation et du milieu géologique, avec toutes les fonctions de sûreté définies considérées comme satisfaites ;
- des scénarios d'évolution altérée (**SEA**), associés à des événements incertains mais plausibles, qui visent à évaluer les conséquences de dysfonctionnements de composants pouvant entraîner une dégradation significative de leur performance ou la perte d'une fonction faisant sortir le système de stockage du domaine d'évolution normale, et à vérifier les lignes de défense ;
- des scénarios de type *What-if*⁶ (« *Et si ?* »), qui postulent des événements très peu plausibles afin de tester la robustesse du système de stockage.

A ces trois classes de scénarios vient s'ajouter une famille spécifique de scénarios d'intrusion humaine involontaire (**SIHI**), sans considération de niveau de vraisemblance, intégrés dans l'évaluation de sûreté afin de tester la robustesse du système de stockage vis-à-vis de ce type d'événement.

S'agissant du second volet de la démarche, l'Andra indique que les enseignements tirés de l'analyse des résultats des évaluations quantitatives de ces scénarios et des performances des composants pris isolément puis dans leur ensemble, sur la base notamment d'indicateurs de performance (cf. chapitre 5.3) définis en lien avec les fonctions de sûreté du stockage (cf. *infra*), peuvent la conduire à réviser la conception et les études de sûreté du stockage, suivant une démarche itérative [47]. Enfin, sur la base des incidences sanitaires et environnementales déduites des scénarios d'évolution du stockage, l'Andra vérifie le respect des objectifs qu'elle retient (cf. chapitre 4.3 ci-après) pour la protection de la santé des personnes et de l'environnement.

⁵ Risques internes liés à des perturbations dues à la présence du stockage (thermiques, hydrauliques, gazeuses, chimiques...) ou risques externes liés à des événements climatiques, géodynamiques, à l'aléa sismique ou encore aux intrusions humaines involontaires dans la zone du stockage.

⁶ Les scénarios *What-if* permettent d'explorer des situations extrêmes ou inattendus mais susceptibles d'avoir des conséquences significatives.

PSE-ENV estime satisfaisante la démarche générale d'évaluation de sûreté après fermeture de Cigéo qui, dans la continuité des éléments présentés au stade du DOS et conformément aux normes et guides en vigueur (notamment ASNR [11], Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) [65][66], Commission internationale de protection radiologique (CIPR) [67]...), repose sur l'évaluation quantitative de scénarios d'évolution du stockage, déduits d'une analyse des risques et des incertitudes relatives à la performance des composants et visant à représenter l'évolution attendue ainsi que des évolutions altérées tenant compte d'événements perturbateurs de manière graduée en terme de vraisemblance.



4.2. FONCTIONS DE SURETE ET CIP

L'Andra définit [47] deux "*grandes fonctions de sûreté fondamentales*", identiques à celles définies au stade du DOS, à savoir : isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines banales⁷ et limiter le transfert des substances radioactives et toxiques chimiques contenues dans les déchets vers la biosphère. Selon l'Andra, la première fonction fondamentale est assurée par les caractéristiques de l'environnement géologique ainsi que par la profondeur d'implantation retenue, celle-ci réduisant la probabilité d'une intrusion humaine involontaire banale, et de manière significative l'influence des processus climatiques et d'autres processus de surface. L'Andra décline la deuxième fonction fondamentale en trois fonctions de sûreté, qui elles-mêmes se déclinent en sous-fonctions de sûreté :

- s'opposer à la circulation d'eau, déclinée en :
 - limiter les flux d'eau provenant des formations sus-jacentes durant la resaturation ;
 - limiter le flux d'eau via les LSF vers les formations sus-jacentes ;
 - limiter les vitesses de circulation de cette eau depuis les alvéoles, dans la couche du COx jusqu'au toit et au mur de la formation, et dans les LSF.

La couche du COx (notamment du fait de ses propriétés hydrauliques au niveau du site retenu), l'architecture de l'installation (en particulier le regroupement des LSF et le caractère « borgne » des quartiers de stockages par rapport au reste de l'installation souterraine) et les scellements concourent à la fonction « s'opposer à la circulation d'eau ».

- limiter le relâchement des substances radioactives et toxiques chimiques, et les immobiliser dans les alvéoles, déclinée en :
 - protéger les déchets de l'eau ;
 - limiter la mise en solution des radionucléides et des substances toxiques chimiques ;
 - limiter la mobilité des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans l'alvéole de stockage.

La matrice vitreuse des déchets HA contribue à cette fonction. Dans l'objectif de préserver le plus longtemps ses capacités d'immobilisation, les conteneurs de stockage HA disposent d'une exigence sur leur durée d'étanchéité, de 350 à 500 ans dès la mise en stockage selon le type de colis primaire HA, afin d'éviter une altération accrue de la matrice vitreuse à une température supérieure à 50°C pour les colis de déchets HA0 et 70°C pour les colis de déchets HA1/HA2. Aucune fonction de sûreté après fermeture n'est attribuée par l'Andra aux conteneurs de stockage des déchets MA-VL ou aux conteneurs des colis primaires MA-VL et HA. En revanche, les déchets MA-VL ainsi que l'éventuelle matrice présente peuvent contribuer à la fonction « *limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, et les immobiliser dans les alvéoles* ». La phénoménologie d'évolution des colis a été examinée par l'IRSN dans le cadre du GP1 [2] ; le risque de corrosion des conteneurs de stockage HA fait l'objet du chapitre 3.1 du présent rapport.

- retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques relâchées depuis les alvéoles de stockage.

Le COx et les ouvrages (galeries et scellements) retardent et atténuent les flux de radionucléides, notamment de par leurs propriétés chimiques et/ou hydrauliques. L'Andra précise en outre que la capacité naturelle de dispersion

⁷ C'est-à-dire très limitées en termes de profondeur.

et de dilution des formations encaissantes n'est pas altérée par la présence du stockage. A cet égard, PSE-ENV souligne que l'Andra, comme au stade du DOS, n'assigne pas de fonction de sûreté aux formations encaissantes.

Par ailleurs, l'Andra identifie un objectif de « préserver les propriétés favorables des argilites de la couche du COx et des composants ouvragés impliqués dans la réalisation des fonctions de sûreté après fermeture », pour les phases de conception et d'exploitation du centre de stockage Cigéo, qui est transverse à toutes ces fonctions de sûreté après fermeture, en cohérence avec le guide n°1 de l'ASN [11]. Enfin, l'Andra fixe également un objectif de maîtriser le risque de criticité lié à la présence d'isotopes fissiles dans les déchets.

Les fonctions de sûreté du système de stockage Cigéo en après fermeture retenues par l'Andra ainsi que les objectifs spécifiques précités sont globalement identiques à ceux retenus au stade du DOS. **Ils n'appellent pas de commentaire de la part de PSE-ENV sur le plan des principes.** La capacité globale de confinement du système de stockage est examinée par PSE-ENV au regard de ces fonctions de sûreté au chapitre 6 du présent rapport.

L'Andra décline les fonctions de sûreté après fermeture en un ensemble de dispositions de conception, qui doivent permettre le respect de l'ensemble des exigences applicables au projet Cigéo [68], telles que l'épaisseur minimale de garde d'argilites saine de 50 m ou encore l'étanchéité des conteneurs de stockage HA tant que la température de la matrice vitreuse des colis HA est supérieure à 70 °C. L'Andra définit sur cette base les composants importants pour la protection (CIP) au stade du DDAC : la couche du COx, les scellements des LSF, les scellements horizontaux en galeries, les conteneurs de stockage HA et la matrice vitreuse. **PSE-ENV estime que cette liste de CIP pour la sûreté après fermeture de Cigéo est cohérente avec les fonctions de sûreté présentées par l'Andra.** A cet égard, PSE-ENV rappelle que les modalités de surveillance de ces CIP, pendant les phases de creusement des ouvrages souterrains et le fonctionnement de Cigéo, ont fait l'objet des engagements [2024-E18] et [2024-E19] à l'issue de l'expertise du GP2 [4] afin de s'assurer de leur capacité à remplir les fonctions de sûreté à long terme qui leur sont assignées. Dans ce cadre, l'Andra s'est engagée à fournir l'ensemble des paramètres-clés liés à chaque CIP avant le début des travaux de creusement des ouvrages souterrains, ainsi que les dispositions de surveillance associées en amont de la réalisation des ouvrages concernés. S'agissant plus particulièrement du CIP « COx », l'Andra présentera les dispositions lui permettant de caractériser son état initial et de suivre son évolution.

Par ailleurs, l'Andra indique [49] que certains dispositifs de surveillance mis en place avant la fermeture définitive du stockage, tels que des instruments pour suivre l'évolution du comportement des ouvrages de fermeture des LSF, pourraient être maintenus si besoin pour une utilisation après la fermeture. Elle ajoute que la mise en œuvre de techniques non intrusives depuis la surface (tomographie sismique, techniques basées sur l'acoustique...) pourrait permettre d'accéder à certains paramètres liés à l'évolution du stockage après sa fermeture. PSE-ENV encourage l'Andra à poursuivre les travaux qu'elle a engagés en ce sens. L'Andra précise toutefois que la sûreté après fermeture est assurée de manière passive, sans qu'une intervention soit nécessaire, ce dont PSE-ENV convient.



4.3. OBJECTIFS DE PROTECTION

Objectifs de protection contre les rayonnements ionisants

S'agissant des objectifs de protection sanitaire radiologique, l'Andra s'appuie sur le guide n°1 de l'ASN [11] et vérifie que :

- l'exposition individuelle est inférieure à la contrainte de dose (au sens de la CIPR 103 [69]) de 0,25 mSv/an pour le SEN pendant les 10 000 ans suivant la fermeture du stockage ;
- le SEN n'aboutit pas à des doses individuelles inacceptables au-delà de 10 000 ans après la fermeture, la valeur de 0,25 mSv/an étant alors utilisée comme référence ;
- les incidences sur la population des SEA « *sont très inférieures* » aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes et que celles des scénarios *What-if* [47] ou SIHI « *sont inférieures* » à ces niveaux.

PSE-ENV estime que les objectifs de protection associés au SEN, en termes de valeur et d'approche déclinée en contrainte de dose puis en référence sur le plus long terme, sont bien conformes au guide ASNR précité. Les objectifs qualitatifs retenus par l'Andra pour les autres scénarios (SEA, *What-if*, SIHI)

au regard des niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes sont globalement cohérents, dans leur principe, avec ce guide. En effet, celui-ci indique que les expositions doivent être maintenues « *suffisamment faibles* » par rapport à ces niveaux puisque la possibilité d'interventions en vue de limiter les conséquences ne doit pas être retenue lors de la conception pour assurer la sûreté du stockage après sa fermeture.

Toutefois, l'Andra adopte la valeur de 100 mSv/an [47] comme seuil pour les effets déterministes. Sur ce point, PSE-ENV estime que l'assertion de l'Andra, selon laquelle le respect d'une référence de 100 mSv/an (i.e. 100 mGy/an pour les expositions externes avec des rayonnements fortement pénétrants) permet de vérifier que des effets déterministes ne surviennent pas, est recevable si, par effet déterministe, on entend les effets à seuil survenant rapidement après l'exposition (effets précoces⁸) puisque de tels effets adviennent pour des expositions brèves et au-delà du Gy (i.e. du Sv pour les rayonnements fortement pénétrants). La situation est un peu moins tranchée si, par effet déterministe, on entend les réactions tissulaires tardives susceptibles de survenir pour des doses de l'ordre d'une ou plusieurs centaines de mGy (vie entière) ou des débits de dose de l'ordre de la centaine de mGy/an voire de quelques dizaines de mGy/an [71].

En outre, il convient de rappeler que pour les scénarios stylisés de type *What-if* (équivalents selon PSE-ENV à ceux relevant d'événements perturbateurs sévères très improbables ou extrêmes dans la dénomination CIPR) et SIHI, la CIPR [67] propose d'utiliser un indicateur d'effets stochastiques⁹ (la dose efficace) et de comparer les doses calculées aux niveaux de référence recommandés pour les situations d'exposition existante (1-20 mSv/an) et/ou pour les situations d'exposition d'urgence (20-100 mSv la première année) une fois l'exposition reconnue¹⁰. PSE-ENV souligne à cet égard qu'une situation d'urgence requiert, par définition [67], une action urgente pour éviter ou réduire les expositions, et comme indiqué *supra* sur la base du guide n°1 de l'ASN [11], considère que ce type d'action n'est pas applicable lors de la conception pour assurer la sûreté du stockage après sa fermeture. La CIPR comme l'AIEA [67][65] préconisent que la comparaison des doses calculées à ces niveaux de référence soit utilisée comme un indicateur de la robustesse du système de stockage. La CIPR [67] précise que la conception optimale d'une installation de stockage peut donner lieu à une distribution des doses en cas d'événement perturbateur naturel sévère ou d'une intrusion humaine involontaire, dont certaines pourraient être supérieures à ces niveaux de référence. Aucun niveau de référence chiffré n'est en revanche disponible dans ce cadre normatif pour les SEA.

De manière plus générale, la CIPR [67] indique que les doses estimées sur le long terme (plusieurs centaines d'années) doivent être interprétées de manière qualitative et utilisées à des fins de comparaisons d'options plutôt que comme moyen d'évaluer le détriment sanitaire, compte tenu des incertitudes affectant les bases scientifiques sous-jacentes à l'évaluation de ce détriment sur de telles périodes. De la même façon, l'AIEA [65] soulève les difficultés concernant l'application de critères à très long terme compte tenu des incertitudes, qui augmentent avec l'éloignement dans le futur ; l'AIEA incite ainsi à la prudence quant à l'utilisation de ces critères. Enfin, PSE-ENV rappelle [11] que le caractère acceptable des expositions est à apprécier en tenant compte des caractéristiques du scénario considéré (vraisemblance, niveau, durée et nature des transferts de substances radioactives dans la biosphère, etc.) et que cette appréciation, outre la comparaison des doses calculées aux valeurs de référence indiquées, résulte de l'analyse des efforts faits par le concepteur du stockage pour que les expositions individuelles soient aussi faibles que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux.

Aussi, PSE-ENV considère, dans son expertise objet du présent rapport, que les doses estimées pour les scénarios de types SEA, *What-if* et SIHI doivent être utilisées de manière prudente et interprétées en termes de sûreté et de robustesse des options de conception de manière nuancée au regard de la vraisemblance des scénarios retenus et de la sévérité des hypothèses qui les fondent.

⁸ Effet dont le délai d'apparition est de l'ordre de quelques heures à quelques semaines et dont la sévérité augmente avec la dose.

⁹ Ils ne surviennent pas systématiquement pour tous les individus mais sont détectables, au sein d'une population, grâce à l'observation d'une relation statistiquement fiable entre l'exposition et les pathologies. Ils sont d'apparition tardive par rapport au moment de l'exposition (principalement, le cancer).

¹⁰ La CIPR [67] précise qu'« *une fois qu'un événement s'est produit, il n'est pas certain qu'une autorité compétente soit consciente de la perturbation. Si la situation est reconnue, l'autorité compétente l'évalue et applique les critères de protection et les contre-mesures appropriés* ».

S'agissant des objectifs de protection radiologique de l'environnement (faune et flore), l'Andra a transmis au cours de l'expertise la description de sa démarche et les résultats de son évaluation de l'impact radiologique à l'environnement pour le SEN uniquement. PSE-ENV rappelle que l'évaluation de l'impact environnemental est une exigence [128], y compris pour les SEA. Aussi, **PSE-ENV estime que l'Andra pourrait compléter son étude d'impact des SEA avec l'évaluation des impacts environnementaux radiologiques**. Ce point est repris au chapitre 6.2.1 du présent rapport. Pour évaluer l'impact sur la faune et la flore des rejets radioactifs du stockage pour le SEN, l'Andra a mis en œuvre la méthode graduée préconisée dans le guide ASN/IRSN [72] et utilisé l'outil de calcul Erica [73]. En pratique, elle a (i) calculé l'exposition à la radioactivité d'espèces représentatives après la dispersion des radionucléides dans les biosphères d'intérêt, à partir des valeurs de flux des radionucléides à l'exutoire puis (ii) comparé les expositions ainsi évaluées (pour chaque espèce) à la valeur de débit de dose considérée comme sans effet pour l'environnement (10 µGy/h) [74]. Ces indices de risque (exposition évaluée / valeur considérée sans effet) calculés pour l'ensemble des espèces retenues étant très faibles, l'Andra n'a pas réalisé d'évaluation de niveau 2 (plus détaillée, en levant certains conservatismes). **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de PSE-ENV.**

L'Andra ne présente pas d'étude d'impact à la faune et la flore des relâchements issus du stockage dans les scénarios *What-if* et les SIHI. PSE-ENV estime que cette absence n'est pas réhivatoire dans la mesure où les scénarios *What-if* et SIHI servent principalement à apprécier la robustesse des options de sûreté du stockage. Le critère de jugement (la métrique) peut aussi bien être un excès de risque à la faune ou à la flore, une dose efficace au groupe de référence ou un flux de substances toxiques aux exutoires. Autrement dit, les estimations de flux de radionucléides aux exutoires et l'évaluation de la dose efficace aux personnes représentatives faites par l'Andra concourent déjà à cette évaluation.

Objectifs de protection pour les substances toxiques chimiques

Pour évaluer l'impact sanitaire des relâchements de substances toxiques chimiques du stockage, l'Andra compare dans un premier temps leurs concentrations maximales aux exutoires aux normes de qualité (**NQ**) [75] en vigueur pour ces substances. Si leurs concentrations maximales sont inférieures à leurs NQ respectives, l'Andra conclut à l'absence d'impact chimique du stockage. Bien que la comparaison de la concentration d'une substance dans l'eau à la NQ correspondante soit un élément pertinent de l'analyse (utile notamment dans le contexte de l'interprétation de l'état des milieux), **PSE-ENV estime qu'en se limitant à cette comparaison, l'Andra omet une partie de la démarche d'évaluation prospective du risque préconisée par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) [76] et notamment, l'évaluation de la dispersion de la substance dans les milieux, l'évaluation de la concentration dans les matrices environnementales, l'évaluation des scénarios d'exposition des populations et le calcul des quotients de danger ou des excès de risque individuels nécessaires pour objectiver cette évaluation**. Ce point est repris au chapitre 6.2.1 du présent rapport.

S'agissant de l'impact à l'environnement des relâchements de substances toxiques chimiques, à l'image du calcul d'impact pour les radionucléides, l'Andra évalue l'impact des substances chimiques sur l'écosystème aquatique par une approche graduée à trois niveaux. Des valeurs-repères telles les « Predicted No Effect Concentration » (**PNEC**) sont utilisées pour caractériser le risque chimique. Les informations proviennent majoritairement de fiches de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques de l'INERIS, ou de l'agence européenne des produits chimiques (**ECHA**). En comparant les « Predicted Environmental Concentration » (**PEC**) calculées dans les situations considérées avec les PNEC, l'Andra calcule un indice de risque pour chaque toxique chimique. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de PSE-ENV.**

Enfin, l'Andra précise que concernant les substances toxiques chimiques, l'évaluation de l'impact sanitaire est menée uniquement pour le SEN et les SEA, tandis que l'évaluation de l'impact environnemental n'est réalisée que pour le SEN. Dans le même esprit qu'énoncé *supra* pour l'impact radiologique à la faune et la flore, **PSE-ENV estime d'une part que l'Andra pourrait compléter son étude d'impact des SEA avec l'évaluation des impacts environnementaux liés aux substances toxiques chimiques, d'autre part** que l'étude des scénarios *What-if* et SIHI, conçue non pas comme une démonstration de l'acceptabilité des impacts, mais comme une étude de sensibilité pour éprouver la robustesse des options de sûreté et de conception du stockage, ne nécessite pas d'utiliser des indicateurs relatifs aux substances toxiques chimiques. En effet, PSE-ENV convient que les

principales conclusions en termes de robustesse du système de stockage qui pourraient être tirées de l'étude des transferts des substances toxiques chimiques dans les cas des scénarios *What-if* et SIHI devraient être couvertes par celles issues de l'étude des transferts de radionucléides.

4.4. DEFINITION DES BIOSPHERES

La biosphère correspond à la partie de l'environnement habitée par des organismes vivants et constitue ainsi le dernier maillon de la chaîne de transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis de déchets. Comme au stade du DOS, l'Andra évalue l'impact des transferts des solutés de l'exutoire jusqu'à l'homme pour la période d'après fermeture en retenant la démarche de définition de biosphères préconisée par l'AIEA [77]. Cette méthode d'évaluation est ainsi basée sur la représentation conceptuelle de l'environnement en « biosphères » de référence, correspondant à un écosystème (*i.e.* espèces animales, végétales, types de cultures, etc.), à un type de population humaine (sédentaires, chasseurs-cueilleurs, etc.) et à des voies d'exposition (par exemple, consommation de produits agricoles, consommation d'eau issue de forages en nappe, etc.) représentatifs de conditions climatiques données. Conformément au guide n°1 de l'ASN [11], dans la mesure où il n'apparaît pas possible de prévoir l'évolution locale de la biosphère sur de très longues périodes, l'Andra retient des biosphères-types représentatives des différents états que pourrait prendre à plus grande échelle la biosphère, compte tenu de grands événements climatiques régionaux. Sur la base d'études sur l'évolution du climat, tenant compte de l'évolution naturelle et des effets anthropiques, et sur l'évolution géomorphologique du site, l'Andra considère ainsi pour son évaluation d'impact à long terme du stockage une biosphère type tempérée préexistante et deux biosphères extrêmes chaude et froide (respectivement de type subtropicale humide et boréal) visant à encadrer le domaine des évolutions climatiques possibles. PSE-ENV considère, comme lors de précédentes expertises (e.g. [20]), que cette démarche générale de l'Andra, qui intègre les travaux réalisés dans le cadre du projet international BIOCLIM de l'AIEA portant sur la modélisation de la biosphère [77] **est satisfaisante et estime qu'elle permet, sur le plan des principes, d'intégrer les incertitudes inhérentes à la prédiction climatique sur le très long terme en retenant des biosphères chaude et froide enveloppes pour les estimations d'incidences radiologiques** (notamment en considérant l'exploitation des ressources et en particulier en eau).

PSE-ENV rappelle toutefois que lors de son examen du DOS [36], l'IRSN soulignait le besoin d'étayer davantage le choix de l'Andra de ne pas retenir, parmi les évolutions possibles lors du prochain million d'années, les biosphères de type toundra et de type subtropical à pluie d'hiver. A cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'expertise que la biosphère de type subtropical à pluie d'hiver n'apparaît que sur des temps courts, jusqu'à 50 000 ans seulement, alors que le panache de radionucléides n'aura pas atteint les formations encaissantes du COx. L'Andra privilégie donc la biosphère chaude de type subtropicale humide qui apparaît sur plusieurs périodes et sur des temps longs entre 50 000 et 500 000 ans cohérents avec les évaluations après fermeture des scénarios étudiés (SEN, SEA, *What-if* et SIHI). S'agissant de la biosphère de type toundra, l'Andra considère que la présence d'un pergélisol limite l'accessibilité à l'eau en profondeur, et potentiellement au niveau de la rivière de l'Ornain après mise à affleurement de l'Oxfordien par érosion. L'Andra ajoute que cet état climatique ne permet qu'une exploitation très limitée des ressources en surface (culture, élevage) et des ressources en eau (pas d'irrigation). Ces raisons ont conduit l'Andra à retenir une biosphère froide de type boréal qui permet une plus grande diversité d'utilisation de la ressource en eau et conduira donc à un impact majorant par rapport à la biosphère de type toundra. PSE-ENV considère que, compte tenu de l'état des connaissances actuelles, les justifications apportées par l'Andra pour écarter ces biosphères chaude et froide (subtropical à pluie d'hiver et toundra) des évaluations d'impact de Cigéo après fermeture sont acceptables. Au vu des incertitudes liées à ce type de prédiction, PSE-ENV encourage toutefois l'Andra à poursuivre une veille sur les travaux internationaux en la matière en vue le cas échéant de réviser sa sélection des biosphères.

La biosphère type tempérée est analogue à celle qui existe aujourd'hui en Meuse et en Haute-Marne. L'exutoire de la rivière Ornain y est considéré en situation enveloppe (décrite dans le chapitre 5.3 du présent rapport). Ce faisant, l'Andra répond de manière satisfaisante à l'observation de l'IRSN, lors de l'examen du DOS, selon laquelle il apparaît difficile, au regard des incertitudes, de ne pas retenir que l'incision de l'Ornain atteindra l'Oxfordien d'ici un million d'années et que l'Andra pourrait donc considérer plus avant les voies d'exposition par consommation de gibiers et de poissons de rivière pour cet exutoire naturel [36]. Les précipitations annuelles et le besoin en irrigation sont évalués à partir des données Météo-France de la station de Houdelaincourt sur la période 2012-

2017. Les paramètres de transfert dans les compartiments de l'environnement sont principalement fixés à des valeurs recommandées internationalement [78]. Les personnes représentatives exposées appartiennent à des groupes de référence hypothétiques. Le groupe « multi-activités » comprend un adulte ainsi que des enfants de 1 et 10 ans ; il possède un élevage bovin, une basse-cour, quelques porcs et ovins, un jardin potager, un verger et des cultures de blé. PSE-ENV relève que l'irrigation des cultures de blé est maintenant prise en compte, ce qui répond positivement à une précédente observation de l'IRSN [36]. Les rations alimentaires retenues sont basées sur une enquête locale [79] complétée par les rapports enfants/adulte de l'enquête nationale la plus récente [80]. Trois autres groupes de référence hypothétiques permettent d'étudier respectivement l'influence d'une forte consommation de viande et de produits laitiers (éleveur bovin), de fruits et légumes (villageois jardinier), de la pratique de la pêche dans la rivière Ornain et de la chasse (pêcheur chasseur) par les adultes. L'ensemble des personnes représentatives est considéré en autarcie alimentaire complète, ce que PSE-ENV considère raisonnablement prudent. Elle note que l'Andra n'a pas étudié l'influence de consommations alimentaires accrues de certaines denrées chez les enfants, comme elle a pu le faire pour l'adulte. Elle convient cependant que l'ordre de grandeur des doses qui pourraient être calculées avec ces autres paramètres de consommation n'en seraient pas significativement modifiées. **Aussi, comme au stade du DOS, PSE-ENV considère que la définition de la biosphère tempérée retenue par l'Andra, fondée sur des données récentes locales pour chacune de ses composantes (écosystème, conditions climatiques, population humaine et voies d'exposition), est globalement pertinente pour l'évaluation quantitative de l'impact sanitaire de Cigéo après fermeture.**

Dans la biosphère chaude type subtropicale humide, il pleut moins en été et les cours d'eau sont à sec pendant cette saison. Le besoin en irrigation est plus important d'environ 60% par rapport à la biosphère tempérée et l'abreuvement du bétail est doublé. La consommation d'eau de boisson est augmentée d'environ 15%. Cette biosphère chaude, dont la définition découle des travaux internationaux précités [77], n'apparaîtrait que dans un scénario d'évolution climatique perturbée par les activités anthropiques et retarderait l'érosion par incision des vallées avec une mise à l'affleurement de l'Oxfordien au-delà du million d'années dans la vallée de l'Ornain. En conséquence, l'exutoire dans la rivière Ornain n'est pas pris en compte. Un seul groupe de référence hypothétique est considéré, comprenant enfants et adulte ; sa ration alimentaire est basée sur une enquête réalisée autour du centre du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) de Cadarache dont le climat actuel est proche de celui envisagé pour la biosphère chaude, avec en particulier une consommation plus importante d'agneau, de fruits et de légumes. Les hypothèses retenues par l'Andra augmentent l'exposition radiologique des personnes représentatives du groupe de référence hypothétique de l'ordre de 10 à 40% pour les principaux radionucléides par rapport à la biosphère tempérée. **Cela n'appelle pas de commentaire de PSE-ENV.**

Dans la biosphère froide de type boréal, la période végétative est écourtée et les cultures sont affectées par un gel saisonnier. Le besoin en irrigation est moindre qu'en biosphère tempérée (de plus de deux fois), conformément à des valeurs observées dans les pays scandinaves. Les deux groupes de référence hypothétiques multi-activités et pêcheur-chasseur sont considérés, avec des personnes représentatives adultes uniquement. Les régimes alimentaires sont supposés identiques à ceux de la biosphère tempérée, sans diminution de la consommation d'eau de boisson, ce qui majore l'exposition. Sur le plan méthodologique, PSE-ENV relève que l'Andra n'a pas évalué la dose reçue par les enfants pour cette biosphère. Evaluer spécifiquement les doses reçues par les différentes classes d'âge participant à la recherche de la personne représentative la plus exposée dans l'ensemble de la population [81][82]. Néanmoins, il n'est pas attendu de différence significative en termes d'ordre de grandeur du résultat. De plus, la CIPR indique que la contamination de la biosphère due aux relâchements du stockage restera vraisemblablement stable sur des périodes beaucoup plus longues que la vie humaine et qu'il est donc raisonnable de calculer une dose annuelle moyennée sur la durée de vie des individus, laquelle peut être représentée de façon adéquate par la dose annuelle reçue par un adulte [83]. **PSE-ENV convient que cette dernière constitue un indicateur pertinent et suffisant dans ce contexte.**

En conclusion, **PSE-ENV considère que le choix et la définition des biosphères par l'Andra pour évaluer l'impact radiologique et des substances toxiques chimiques post-fermeture sont satisfaisants**, même s'il estime que l'analyse de sensibilité faite pour la biosphère tempérée (au travers de la définition de plusieurs groupes de référence et plusieurs régimes alimentaires) aurait aussi pu être réalisée pour les biosphères chaude

et froide, ce qui aurait permis de mieux mettre en perspective les résultats pour chacune des biosphères et améliorer l'homogénéité du dossier présenté.

En ce qui concerne l'estimation de l'impact du stockage à la faune et à la flore, l'Andra ne retient que la biosphère tempérée. Si l'étude des autres biosphères aurait été souhaitable en toute théorie, PSE-ENV reconnaît la difficulté de mettre convenablement en perspective l'impact sur les écosystèmes lié à la toxicité des substances relâchées en faibles quantités par le stockage et celui lié à des changements climatiques importants, vraisemblablement bien supérieur ; il considère que l'évaluation des expositions environnementales calculées pour la biosphère tempérée (tant pour les toxiques radiologiques que pour les toxiques chimiques) permet de réaliser une estimation de l'ordre de grandeur des impacts environnementaux du stockage.



4.5. MEMOIRE DE CIGEO A LONG TERME

Les modalités de maintien de la mémoire de Cigéo sont présentées par l'Andra dans le DDAC [84][42][49]. Ce maintien de la mémoire a pour principaux objectifs :

- d'assurer la disponibilité des informations nécessaires aux opérateurs de Cigéo pendant toute la durée de son fonctionnement ;
- de transmettre aux générations successives les données et connaissances acquises afin qu'elles puissent prendre des décisions éclairées relatives à Cigéo ;
- d'exclure, conformément au guide n°1 de l'ASN [11], une intrusion humaine pendant 500 ans après fermeture du stockage.

Ces objectifs généraux n'appellent pas de remarque de la part de PSE-ENV. La démarche de l'Andra s'appuie sur la constitution et l'organisation de dispositions mémorielles, telles que des dossiers descriptifs du stockage, prévus à différents niveaux de détail, ainsi que sur leur préservation et mise à disposition des générations suivantes. Elle repose également sur l'inscription et le suivi réglementaire du site ainsi que sur les interactions avec la société civile. Ces éléments sont examinés *infra*. En liminaire, PSE-ENV constate que ces éléments tiennent compte des réflexions internationales menées en particulier dans le cadre de l'initiative « Preservation of Records Knowledge and Memory Across Generations » [85], sous l'égide de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN), **ce qui est satisfaisant.**

S'agissant des dossiers descriptifs du stockage, l'Andra prévoit de produire, conformément au Code de l'environnement, un dossier synthétique de mémoire (**DSM**) et un dossier détaillé de mémoire (**DDM**). Le DDM, exigé pour le passage en phase de surveillance (article R.593-75 du code de l'environnement), devra selon l'Andra contenir l'ensemble des informations nécessaires à la compréhension des phénomènes constatés en lien avec Cigéo. Il devra pouvoir contribuer entre autres à la résolution des éventuels problèmes ainsi qu'à l'étude de toute transformation envisagée de l'installation. L'Andra précise que le DDM sera développé progressivement au fur et à mesure de la conception, de la construction et du fonctionnement de l'INB Cigéo. Le DSM, pour sa part destiné, selon l'Andra, à mobiliser la société pour porter la connaissance de l'existence du stockage, est attendu d'après le décret n° 2016-846 précité en version préliminaire au moment du passage de Cigéo en phase de démantèlement et de fermeture ; selon ce décret il devra décrire l'installation telle que construite et comporter des informations telles que l'inventaire des déchets stockés, avec la localisation des différents déchets et leurs propriétés physico-chimiques ainsi que radiologiques. Au cours de l'expertise, l'Andra a indiqué que le travail de préfiguration de ces deux dossiers était engagé et que les résultats n'étaient à ce stade pas encore formalisés.

PSE-ENV souligne que l'Andra dispose d'une expérience dans le développement d'un DSM et d'un DDM, avec de premières versions déjà disponibles pour le centre de stockage de la Manche (**CSM**), dont l'exploitation a cessé en 1992. Ainsi, pour ce centre dont le DDM est actuellement en cours de refonte, la première version du dossier représentait environ 11 000 documents imprimés sur papier permanent, le tout étant conservé en deux exemplaires distincts au CSM et aux archives nationales de France.

Pour rappel, l'IRSN attirait l'attention lors de l'expertise du Dossier 2009 sur la nécessité d'inclure dans la constitution de la mémoire de Cigéo, dès sa création, les données relatives à sa phase initiale de construction. Aussi, **PSE-ENV estime satisfaisant que soit engagé le travail de préfiguration des dispositifs de maintien de la mémoire (DSM et DDM) au stade actuel du projet Cigéo.** Dans le même esprit, s'agissant des mesures

environnementales existantes dans le secteur de MHM et des mesures issues du LSMHM, ainsi que des données qui seront acquises pendant la construction et l'exploitation, l'Andra a indiqué, au cours de l'expertise, que le choix des données à conserver, la durée associée et les modalités de conservation n'étaient pas définies à ce stade. A cet égard, PSE-ENV attire l'attention sur l'importance, lors de la sélection des données à archiver, du type et du niveau d'information qui leur est associée (e.g. stratégie d'échantillonnage et techniques de mesure pour les données environnementales), pour le DDM comme pour l'archivage courant.

Aussi, PSE-ENV considère qu'il conviendrait d'une part, que la réflexion sur la méthode de sélection des données à archiver, incluant leurs conditions d'acquisition, qu'il s'agisse de données environnementales, de construction, ou de surveillance des ouvrages et du COx, soit consolidée avant les travaux de terrassement et d'autre part, que l'Andra définisse les modalités de conservation de l'ensemble de ces données, a minima jusqu'au passage en phase de surveillance de Cigéo.

S'agissant de l'inscription et du suivi réglementaire du site, l'Andra prévoit [49] l'institution d'un périmètre de protection en surface de l'INB souterraine et son inscription dans les documents d'aménagements du territoire. Selon elle ces dispositions, accompagnées d'un contrôle à long terme par l'Autorité administrative, permettront de garantir une surveillance institutionnelle du site *a minima* sur 500 ans pour exclure l'occurrence d'une intrusion humaine involontaire dans le stockage par le biais de forages profonds. PSE-ENV constate que cette durée est bien prise en compte dans l'évaluation de sûreté à long terme réalisée par l'Andra qui considère l'occurrence d'une situation d'intrusion humaine dès 500 ans après la fermeture du stockage (cf. chapitre 6.3 du présent rapport). **Ceci est cohérent avec les préconisations de l'AIEA à ce sujet.**

Par ailleurs, l'Andra effectue de nombreux échanges avec le public en lien avec la transmission de la mémoire de ses différents sites de stockage. Dans ce cadre, un « groupe mémoire », constitué de riverains du LSMHM a pour objectif de porter régulièrement un regard extérieur sur le programme mémoire de l'Andra et de se l'approprier, ainsi que d'échanger sur des solutions mémorielles propres au site de Cigéo. Selon l'Andra, ce programme permettra notamment de tester la lisibilité et l'intérêt, pour un public non averti, des dispositifs retenus tels que par exemple le DSM. L'Andra réfléchit également à confier au territoire proche de Cigéo un rôle dans la transmission de la mémoire de l'installation en abritant des capsules temporelles¹¹ contenant des exemplaires du DSM et du DDM. PSE-ENV convient de l'utilité de transmettre le DSM à une large population de générations futures et de le faire perdurer sur le très long terme afin d'alerter sur les risques encourus en cas de réalisation d'un forage intrusif dans Cigéo. Néanmoins, ces capsules étant destinées à un public potentiellement non averti, PSE-ENV s'interroge sur l'opportunité d'y inclure le DDM étant donné que son contenu est plutôt destiné aux exploitants de l'installation.

Enfin, l'Andra envisage également la mise en place de dispositions mémorielles au droit et à proximité de l'INB en visant leur maintien aussi longtemps que possible. Bien que la nature de ces dispositions reste à définir, l'Andra étudie la possibilité d'utiliser des marqueurs implantés dans le paysage (e.g. ouvrages d'art, céramiques enfouies dans le sol, etc.) et visant à signaler à très long terme la présence du site et d'alerter sur sa dangerosité. **Ceci n'appelle pas de remarque.**

Ainsi, PSE-ENV estime que les dispositions prévues par l'Andra en plus des dossiers de mémoire (échanges sociétaux, utilisation de capsules et marqueurs à long terme), bien que décrits de façon sommaire à ce stade, apparaissent pertinentes dans leur principe au stade actuel du projet.

¹¹ Œuvres de sauvegarde collective de biens et d'informations comme témoignage destiné aux générations futures.



5. ANALYSE DES RISQUES ET INCERTITUDES, DEFINITION DES SCENARIOS

Pour rappel (cf. chapitre 4), l'évaluation de sûreté en phase après fermeture présentée par l'Andra comprend deux volets : l'ARI associés à l'évolution future des composants du stockage, puis l'évaluation quantitative de la prise en compte de ces risques et incertitudes sur la base de scénarios d'évolution du stockage sur le long terme. Le présent chapitre porte sur l'ARI réalisée par l'Andra au stade du DDAC et sur la définition des scénarios d'évolution du stockage qui en découlent. Les risques d'origine interne (chapitre 5.1) ont trait à la criticité, au gonflement sous eau des déchets bitumés, aux gaz générés par l'installation ainsi qu'aux suppressions hydrauliques induites par le fluage de la roche ; les risques externes (chapitre 5.2) sont liés aux séismes. La définition des scénarios ainsi que les indicateurs de performance retenus par l'Andra pour l'évaluation quantitative (chapitre 5.3) sont examinés en regard des fonctions de sûreté du stockage. L'évaluation quantitative de chacun des scénarios d'évolution du stockage fait quant à elle l'objet du chapitre 6 du présent rapport.

5.1. RISQUES D'ORIGINE INTERNE

Les risques dits « internes » au système de stockage après sa fermeture correspondent aux perturbations liées à ses composants (colis, ouvrages souterrains remblayés et scellés, roche hôte) et à leurs interactions. Ces perturbations, susceptibles d'être couplées, sont d'origines variées : thermique, hydraulique, gazeuse, mécanique, chimique, radiologique et bactériologique. La pertinence et la suffisance des données disponibles pour les évaluer, ainsi que l'impact de ces perturbations sur la roche hôte (zone de roche endommagée, fracturation par les gaz, panache salin, etc.), des choix de conception (scelllements de fermeture passant au gaz par exemple), de dimensionnement (génie civil, entraxe des alvéoles HA, nature et épaisseurs des aciers, etc.) et d'exploitation de l'installation (règles de co-stockage dans les alvéoles MA-VL selon les caractéristiques des déchets par exemple) ont fait l'objet d'un examen par l'IRSN dans le cadre des GP1 et GP2 [2][4]. Dans le présent rapport, sont examinés plus particulièrement la maîtrise du risque de criticité après la fermeture du stockage, ainsi que les effets sur la capacité de confinement global après fermeture, du gonflement sous eau des déchets bitumés, des gaz durant le transitoire hydraulique-gaz (effet piston¹², le risque de fracturation de la roche au gaz est traité dans le cadre du GP1 [2]) ou des suppressions hydrauliques induites par des ruptures d'ouvrages ou le fluage de la roche.

5.1.1. Criticité

Afin de préserver les caractéristiques favorables du COx d'une excursion critique liée à la présence de matières fissiles (MF) dans les déchets, l'Andra fixe un objectif de maîtrise du risque de criticité à long terme dans le stockage après sa fermeture. L'examen par PSE-ENV du risque de criticité, présenté ci-après, porte sur les analyses de sûreté-criticité relatives à l'inventaire de référence, puis de réserve.

5.1.1.1. Analyse de sûreté-criticité pour l'inventaire de référence

Démarche de prévention du risque de criticité

L'évaluation par l'Andra de la sous-criticité du stockage après sa fermeture repose sur des études visant à déterminer l'influence des phénomènes d'évolution envisageables des colis et des alvéoles jusqu'à un million d'années sur le « facteur de multiplication effectif » (k_{eff}). Comme pour l'analyse du risque de criticité en phase d'exploitation (cf. expertise GP2 [4]), cette grandeur est retenue par l'Andra pour la prévention du risque de criticité à long terme après fermeture. Pour rappel, un k_{eff} inférieur à 1 traduit une configuration sous-critique (état sûr recherché pour les installations nucléaires hors réacteurs), égal à 1 une configuration critique (recherchée dans les réacteurs nucléaires en phase de production de puissance) et supérieur à 1 une configuration sur-critique (accident de criticité ou applications militaires). Pour la phase d'après fermeture, l'Andra retient comme critère

¹² Déplacement d'eau induit par la pression des gaz.

d'admissibilité un k_{eff} maximal¹³ de 1, en considérant un biais de calcul¹⁴ de 500 pcm¹⁵ pour les configurations prenant en compte des déchets de type CSD-C¹⁶ (soit un k_{eff} maximal admissible de 0,995) et un biais nul dans les autres cas. La qualification des moyens de calculs, conduisant à la justification des biais précités, est examinée ci-après. **PSE-ENV estime que cette démarche de prévention du risque de criticité à long terme est satisfaisante sur le principe. PSE-ENV relève toutefois que l'Andra, contrairement à la démarche qu'elle a adoptée pour la phase d'exploitation, ne retient aucune marge de sécurité pour le critère d'admissibilité en après fermeture, hormis celle liée aux biais de calcul.** Ce point est examiné ci-après, notamment au regard des marges retenues par ailleurs par l'Andra dans ses études de sûreté-criticité et des incertitudes liées à l'évolution du stockage jusqu'à un million d'années.

Modèles d'évolution des colis et alvéoles retenus dans les analyses de sûreté-criticité

Sur la base de sa connaissance de l'évolution du système de stockage, l'Andra détermine trois modèles [47], auxquels elle ne confère pas de caractère représentatif d'une évolution attendue du stockage mais qu'elle considère enveloppes vis-à-vis du risque de criticité et de l'ensemble des phénomènes susceptibles de se produire. Au cours de l'expertise, l'Andra a indiqué que le choix de ces modèles vise à tenir compte de plusieurs phénomènes qui peuvent influencer sur la criticité : la resaturation du stockage par les eaux du COx, la dégradation des matériaux, l'évolution chimique des matériaux et matières et enfin les mécanismes gouvernant la migration et le regroupement des MF. De l'étude de ces modèles, l'Andra déduit, pour un type de déchets donné dans une configuration donnée (stockage direct ou non), la masse critique de MF la plus faible obtenue par calcul correspondant au critère d'admissibilité précité ($k_{\text{eff}} < 1$), puis la compare à la MF maximale réelle déclarée par les producteurs de déchets (de l'ordre de quelques grammes à quelques centaines de grammes par colis de l'inventaire de référence). Ces résultats sont reportés dans en Annexe T3 du présent rapport.

Dans le modèle « état initial », la géométrie des colis est supposée maintenue et la configuration est la même que celle des alvéoles en exploitation (sphères de mélange homogène de MF et CH₂ à l'optimum de modération pour la plupart des types de déchets)¹⁷.

Dans le modèle « dégradation des colis », comme pour le modèle ci-avant, la géométrie des colis est supposée maintenue, la MF est toujours présente à l'intérieur et l'Andra considère que le vieillissement a conduit à dégrader la totalité des épaisseurs d'acier ainsi que la moitié des épaisseurs de béton des colis primaires (CP). L'Andra a précisé au cours de l'expertise que, dans le cas des conteneurs de stockage (CtS) en béton, leurs épaisseurs sont en revanche supposées intègres, car « *le béton haute performance constitutif des conteneurs de stockage placé dans l'environnement favorable des alvéoles est peu sensible à des dégradations majeures* ». L'Andra suppose également que les paniers accueillant certains CP en stockage direct sont complètement dégradés.

Enfin, dans le modèle « migration de la MF », l'Andra considère que les alvéoles sont resaturés en eau, les colis complètement dégradés et que les MF sont totalement oxydées¹⁸ (i.e. sous forme de PuO₂ modéré par de l'eau) et ont migré vers des zones dites « *chimiquement favorables* » afin de prendre en compte un regroupement pénalisant vis-à-vis du risque de criticité. S'agissant des matières non fissiles des déchets, l'Andra fait l'hypothèse qu'elles ont disparu hors du modèle de manière à ne pas considérer de dilution des MF, hormis pour le zirconium (Zr) présent dans les déchets MA-VL de type coques et embouts¹⁹ qui fait l'objet d'une prise en compte différenciée

¹³ L'analyse de sûreté-criticité pour la phase d'exploitation considérait des critères d'admissibilité différents : $k_{\text{eff}} \leq 0,95$ en conditions normales et $\leq 0,97$ en situations anormales, équivalentes aux situations incidentelles et accidentelles. Ils présentaient ainsi des marges de sécurité définies par rapport à la valeur de 1.

¹⁴ Le biais de calcul correspond à l'incertitude liée par exemple aux approximations considérées ou encore aux incertitudes relatives aux données nucléaires.

¹⁵ Le biais de calcul s'exprime en « pour cent mille » : un biais de 500 pcm signifie que les résultats de simulations numériques conduisent à un k_{eff} calculé sous-estimant de 0,005 en moyenne le k_{eff} réel d'une configuration donnée.

¹⁶ Conteneur standard de déchets compactés.

¹⁷ Deux conditions favorisant la réaction de fissions en chaîne.

¹⁸ Le milieu fissile de référence (MFR) pour les états initial et dégradé étant, pour la plupart des types de déchets, un mélange homogène de Pu métallique et de CH₂, milieu plus réactif que le mélange PuO₂-H₂O.

¹⁹ Les coques et embouts sont des déchets constitués des gaines de combustible usé à base d'alliage de zirconium, après leur traitement.

selon le mode de conditionnement (cimenté ou compacté) ou de stockage (cf. *infra*). Les configurations *in fine* retenues et considérées pénalisantes par l'Andra sont celles où la MF se retrouve :

- pour l'alvéole MA-VL, sous forme d'une « plaque » ou d'un réseau de « plaques » de longueur et largeur infinies, réfléchi de part et d'autre par 60 cm de béton de teneur en eau égale à 3 %, soit au fond de l'alvéole pour les déchets MA-VL en stockage direct, soit au fond de chaque CtS pour les autres déchets MA-VL sans regroupement des MF provenant de plusieurs CtS ;
- pour l'alvéole HA, sous forme d'un anneau cylindrique au niveau de la surface de la paroi interne (en lieu et place du chemisage), de longueur infinie et réfléchi intérieurement par du verre non boré et extérieurement par 60 cm de béton de teneur en eau égale à 3 %. Les résultats de l'Andra montrent que la prise en compte d'eau au centre de l'anneau est moins pénalisante que celle de verre.

Pour finir, en faisant varier l'épaisseur de la MF de manière à atteindre l'optimum de modération, l'Andra détermine les masses de MF critiques sur la base de considérations méthodologiques et géométriques transmises au cours de l'expertise.

Le modèle « état initial », dont la configuration correspondant à celle des alvéoles en exploitation a fait l'objet de l'expertise de l'IRSN lors du GP2 [4], **n'appelle pas de commentaire supplémentaire de PSE-ENV**. L'examen des autres modèles retenus par l'Andra est présenté dans les paragraphes suivants.

PSE-ENV note que les hypothèses sur lesquelles sont fondés les modèles « dégradation des colis » et « migration de la MF » ne se veulent pas représentatives de l'évolution phénoménologique attendue des colis et alvéoles de stockage. PSE-ENV convient de l'intérêt de définir des états intermédiaires du stockage qui, même s'ils n'ont pas vocation à être représentatifs de son évolution, soient enveloppes de ses états potentiels au regard du risque de criticité. Dans ce contexte, PSE-ENV relève toutefois que certains phénomènes d'évolution du stockage n'ont pas été pris en compte par l'Andra alors qu'ils sont susceptibles d'avoir un impact sur la maîtrise du risque de criticité après fermeture du stockage. S'agissant des variations de la composition chimique/minéralogique des milieux représentés dans les modèles précités, l'Andra a réalisé une étude de sensibilité paramétrique du k_{eff} à l'évolution de la composition chimique du béton ou du ciment de certains colis de stockage MA-VL (colis CSD-C, colis de coques et embouts cimentés (CEC), etc.). Il est à noter que les variations de la concentration de certains éléments chimiques (O, C, Ca, H₂O et Cl notamment), étudiées sur des plages allant de -50 % à +50 %, conduisent à des variations importantes du k_{eff} . Pour autant, l'Andra ne fournit pas d'analyse mettant en regard les variations considérées de la teneur en un élément chimique donné et l'évolution réaliste de la composition chimique des milieux ; elle ne tire pas non plus d'enseignement des variations du k_{eff} calculées sur le risque de criticité. PSE-ENV convient que l'évolution chimique de l'environnement des colis sur un million d'années est assortie d'incertitudes importantes, mais estime que des hypothèses crédibles relatives à certaines tendances peuvent néanmoins être formulées, telles que l'augmentation de la teneur des éléments chimiques présents en abondance dans la roche environnante ou dans les matrices des colis de déchets et la diminution de la teneur initiale en d'autres éléments par lixiviation. Aussi, PSE-ENV estime nécessaire, au regard des variations significatives du k_{eff} que l'évolution de la composition chimique du milieu non fissile est susceptible d'induire, que l'Andra consolide son analyse sur ce point, en incluant également une plus grande variété de colis.

En tout état de cause, dans l'objectif de justifier que les modèles qu'elle retient sont bien enveloppes des états futurs potentiels des alvéoles au regard du risque de criticité et de s'assurer de la suffisance des marges retenues dans son analyse de sûreté-criticité, PSE-ENV estime que l'Andra devra approfondir son analyse des évolutions à long terme du stockage, en particulier s'agissant de l'évolution chimique des matériaux du milieu non fissile des alvéoles de Cigéo. **Aussi, PSE-ENV estime que l'Andra devra consolider, à l'échéance de la prochaine révision du rapport de sûreté, sa démonstration de l'absence du risque de criticité en après fermeture :**

- **en justifiant que les modèles retenus pour l'étude de ce risque couvrent les évolutions à long terme du stockage vraisemblables du point de vue phénoménologique, notamment s'agissant de dégradation et d'évolution chimiques des matériaux cimentaires ;**
- **en tirant les conclusions des études de criticité fondées sur ces modèles, éventuellement révisées pour tenir compte en particulier de la phénoménologie des matériaux cimentaires, en termes de marges disponibles vis-à-vis du k_{eff} .**

Ce point fait l'objet de l'**engagement 2025-E1** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. PSE-ENV estime que cet engagement est satisfaisant.

De manière générale, s'agissant de la démonstration de l'absence du risque de criticité en après fermeture, PSE-ENV souligne que les incertitudes liées aux évolutions à long terme du stockage doivent également être mises en regard des marges disponibles par ailleurs dans les analyses de sûreté-criticité de l'Andra. A cet égard, PSE-ENV rappelle l'absence de marge retenue vis-à-vis du critère d'admissibilité en phase après fermeture ($k_{eff} < 1$), contrairement à la phase d'exploitation, mais relève les nombreuses marges présentes par ailleurs dans les modèles étudiés par l'Andra : migration hors de l'alvéole de la matière non fissile pour favoriser la concentration de MF dans le cas du modèle « migration de la MF », choix d'un optimum de modération par de l'eau, regroupement des MF pures à l'optimum de modération sans considérer leur précipitation ni leur sorption sur les surfaces de divers produits de corrosion, masses de MF réelles inférieures à celles critiques (cf. *infra*), etc. Dans l'attente de la justification du caractère enveloppe des modèles d'évolution du stockage considérés dans ses analyses de sûreté-criticité vis-à-vis notamment des dégradations attendues des matériaux cimentaires (cf. *supra*), PSE-ENV n'est pas en mesure de se prononcer sur la suffisance de ces marges. Toutefois, PSE-ENV considère en tout état de cause que d'éventuelles adaptations de la masse de MF réelle placée en alvéole pourraient, en dernier recours, permettre de garantir l'absence de risque de criticité à long terme.

Cas particulier de la migration du Zr

Comme indiqué *supra*, le Zr présent dans les déchets de type coques et embouts fait l'objet d'une prise en compte différenciée selon le mode de conditionnement ou de stockage. Pour les CSD-C en stockage direct (qui constitue la part la plus importante de l'inventaire des déchets de type coques et embouts), l'Andra fait l'hypothèse de sa migration hors de l'alvéole dans le modèle « migration de la MF », afin, de manière conservatrice, de ne pas considérer de dilution des MF. En revanche, les CEC et les CSD-C stockés en CtS ne font pas l'objet d'analyses spécifiques dans le modèle « migration de la MF ».

S'agissant des CEC, l'Andra considère que la configuration retenue pour les modèles « état initial » et « dégradation des colis » couvre celle du modèle « migration de la MF ». Dans ces modèles représentant des phases antérieures du stockage, l'Andra retient un milieu infini hétérogène constitué d'une matrice de béton renfermant des tubes de Zr, dont les parois internes sont tapissées d'une épaisseur variable d'oxyde d'uranium (UO_2) non modéré. Ces modèles reposent ainsi sur une hypothèse de maintien de la géométrie de ces tubes à l'intérieur des colis. Au cours de l'expertise, l'Andra a justifié ce positionnement en indiquant :

- d'une part que le Zr devrait rester présent dans l'environnement des MF compte tenu de ses propriétés de migration comparables à celles des MF, à savoir faiblement mobiles en environnement cimentaire, ce dont PSE-ENV convient ;
- d'autre part, que la dispersion des MF dans le béton conduirait à une configuration moins réactive que le modèle de calcul pour les états antérieurs de l'alvéole.

Concernant ce second point, PSE-ENV considère en effet qu'à l'instar du milieu hétérogène constitué par les crayons d'un réacteur à eau pressurisée (**REP**) entourés d'eau, le milieu hétérogène constitué par les tubes de Zr tapissés d' UO_2 et séparés par du béton représentant les CEC pourrait être plus réactif que tout mélange homogène d'uranium et de béton qui résulterait de la dispersion de l'uranium dans le béton. PSE-ENV relève néanmoins que cet argument implique de considérer que le béton reste mélangé intimement aux coques et embouts à long terme.

Des calculs préliminaires réalisés par PSE-ENV, fondés sur une modélisation des colis CEC similaire à celle réalisée par l'Andra, montrent que le k_{eff} du modèle étudié est fortement dépendant du devenir du béton à long terme. Ainsi, il est largement supérieur à 1 lorsque celui-ci est remplacé par un brouillard d'eau²⁰ de densité inférieure à 0,5, mais reste inférieur à 1 en considérant une densité de l'eau égale à 1. PSE-ENV estime en outre qu'en présence de béton vieilli, d'autres configurations surcritiques pourraient être identifiées en faisant varier l'épaisseur, le diamètre de la gaine et la distance entre deux gaines consécutives par exemple, leurs valeurs constantes considérées par l'Andra étant celles maximisant les k_{eff} en présence de béton intègre uniquement.

²⁰ Représentant un mélange d'eau et d'un matériau inerte vis-à-vis des réactions en chaîne, susceptible de couvrir l'évolution du béton dans les CEC.

Or, PSE-ENV rappelle les incertitudes relatives au vieillissement et à l'évolution chimique des composants des alvéoles, dont les colis (cf. *supra*). Le maintien du béton intègre dans les CEC ne peut être garanti à très long terme dans la mesure où il sera exposé à des agressions telles que l'attaque sulfatique ou l'hydrolyse (cf. GP1 [2]). Par conséquent, PSE-ENV considère que l'Andra devra prendre en compte, dans son analyse de sûreté-criticité des CEC après fermeture du stockage, la présence d'un « mélange » d'eau et de béton à long terme (si le modèle constitué d'un milieu infini est conservé) ou une configuration analogue à celles des autres types de déchets MA-VL après migration (i.e. plaques de matières fissiles modérées par de l'eau et regroupées au fond des CtS ou de l'alvéole). **PSE-ENV estime ainsi que l'Andra devra présenter, dans la prochaine révision du rapport de sûreté, une mise à jour de l'analyse de sûreté-criticité en considérant un modèle « migration de la MF » pour les colis CEC qui tiennent compte de l'évolution des matériaux cimentaires.**

Ce point fait l'objet de l'**engagement 2025-E2** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. PSE-ENV estime que cet engagement est satisfaisant.

S'agissant des CSD-C stockés en CtS, comme indiqué dans le tableau en Annexe T3, l'Andra considère *a priori* que la masse critique du modèle « migration de la MF » est supérieure à celle calculée pour les entreposages tampons de CP ou CtS en surface (530 g), sur la base d'une comparaison peu étayée entre les masses critiques en exploitation et après fermeture d'autres types de colis. PSE-ENV regrette que l'Andra n'ait pas davantage étayé sa démonstration de la maîtrise du risque de criticité après fermeture des colis CSD-C en CtS. Toutefois, en admettant la conservation du Zr (cf. *supra*), PSE-ENV relève que les configurations de calcul finies étudiées (ruine des CP et extension des « galettes » de PuO₂-Zr-H₂O sur la surface des fonds des logements des CtS) couvrent les hypothèses retenues pour l'état « migration de la MF ». Ces configurations conduisent à des k_{eff} largement inférieurs à 1 en considérant 450 g de MF par CP, limite retenue dans les spécifications préliminaires d'acceptation des colis CSD-C en CtS. **Aussi, compte tenu de la marge entre la masse critique et la masse réelle déclarée par les producteurs, PSE-ENV estime que le stockage en CtS de colis CSD-C n'est pas de nature à remettre en cause la maîtrise du risque de criticité après fermeture du stockage.**

Enfin, PSE-ENV relève des incohérences et imprécisions, ainsi que des manques dans les hypothèses retenues par l'Andra, vis-à-vis notamment des modèles « état initial » et « dégradation des colis », des dimensions géométriques (notamment les surfaces des logements ou des conteneurs considérés pour les déchets MA-VL et les diamètres des conteneurs considérés pour les déchets HA) et des formules utilisées pour calculer les masses critiques après migration. **Bien que l'Andra ait pu apporter au cours de l'expertise des corrections et compléments sur ces points, PSE-ENV estime qu'il lui appartiendra de les intégrer dans les différents documents constituant le référentiel de sûreté.**

Qualification des moyens de calcul utilisés

S'agissant de la qualification des moyens de calcul utilisés dans les études de criticité, l'Andra retient un biais de calcul (sous-estimation) de 500 pcm pour le stockage des déchets de type CSD-C et un biais nul pour les autres types de déchets, à l'instar de l'analyse de sûreté-criticité de la phase d'exploitation. Si PSE-ENV constate, comme pour les éléments examinés dans le cadre de la démonstration de sûreté en phase d'exploitation [4], que les analyses de qualification présentées recourent à différents codes de calcul et s'appuient parfois sur des choix différents d'expériences critiques représentatives, ce qui n'est pas cohérent lorsque les configurations étudiées sont similaires. En outre, aucune analyse de qualification consolidée n'est présentée dans le DDAC pour la sûreté à long terme. **Néanmoins, les biais précités ont été jugés acceptables par l'IRSN dans le cadre du GP2 (cf. expertise GP2 [4]) et cette conclusion peut être étendue aux déchets MA-VL et HA pour les modèles « état initial » et « dégradation des colis », ces derniers étant similaires aux configurations étudiées en exploitation.**

S'agissant du modèle « migration de la MF », l'Andra s'appuie sur un outil de simulation dont, pour vérifier l'absence de biais de calcul, certains résultats sont comparés avec ceux d'un autre outil de simulation considéré comme référence²¹. Compte tenu de ces éléments, l'Andra ne retient pas de biais de calcul pour les configurations

²¹ Calculs pour le modèle « migration de la MF » réalisés avec la séquence CSAS1X du formulaire SCALE 6.2.3. Les points non modérés et à l'optimum de modération sont comparés avec les k_{eff} calculés pour ces points avec le code Monte Carlo KENO-VI.

après migration. PSE-ENV souligne, sur le plan des principes, qu'une comparaison inter-codes n'est pas suffisante et que la qualification des codes de calculs doit être également vérifiée par comparaison avec les résultats d'expériences critiques. **Toutefois, l'absence de biais de calcul de l'outil de simulation servant de référence à l'Andra vis-à-vis du PuO₂ modéré est connue par ailleurs, si bien que les résultats de l'étude de l'Andra ne sont pas remis en cause selon PSE-ENV.**

En tout état de cause, il appartiendra à l'Andra de présenter, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté, l'analyse consolidée de la qualification des moyens de calculs utilisés dans les études de criticité pour l'après fermeture.

Résultats de l'étude des modèles

Les masses de MF critiques résultant de l'analyse de sûreté-criticité après fermeture de l'Andra pour les trois modèles étudiés, les masses de MF admissibles par CP issues de l'analyse de sûreté-criticité pour la phase d'exploitation et les masses maximales de MF réelles déclarées par les producteurs sont reportées dans le tableau en Annexe T3 du présent rapport.

PSE-ENV relève que, pour certains types de déchets tels que les colis « fines et résines » (F&R) cimentées, des calculs du modèle « dégradation des colis » ont été réalisés par l'Andra selon une démarche « inverse » à celle mise en œuvre pour les autres colis. Plutôt que de déterminer une masse critique en considérant un k_{eff} inférieur à 1, l'Andra a retenu comme donnée d'entrée une masse de MF inférieure ou égale à celle admissible en phase d'exploitation et s'est assurée qu'elle ne conduisait pas à un dépassement du critère d'admissibilité en après fermeture ($k_{eff} < 1$) dans ce modèle. La masse critique en après fermeture issue de ce modèle n'est ainsi pas déterminée. Compte tenu notamment de l'écart important entre les critères d'admissibilité en phases d'exploitation ($k_{eff} \leq 0,95$ en conditions normales ou 0,97 en conditions anormales) et en après fermeture ($k_{eff} < 1$), PSE-ENV convient que, pour ces colis, la masse critique issue du modèle « dégradation des colis » ne conduirait pas à mettre en cause la maîtrise du risque de criticité.

PSE-ENV constate que les masses critiques déterminées dans les différents états après fermeture (modèles « initial », « dégradation des colis » et « migration de la MF ») sont, à quelques exceptions près²², supérieures aux masses de MF maximales réelles évaluées par les producteurs de déchets, précisées dans la note [52] et en partie complétées ou corrigées par l'Andra dans le cadre de l'expertise du GP2 [4]. **Ces résultats tendent à montrer la maîtrise du risque de criticité après fermeture du stockage, mais PSE-ENV rappelle que ces masses critiques devront être confirmées sur la base de la consolidation attendue des modèles retenus dans le cadre des analyses de sûreté-criticité après fermeture du stockage** (engagements 2025-E1 et 2025-E2 pris par l'Andra dans sa lettre CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 [9]). Par ailleurs, PSE-ENV rappelle que les masses de MF maximales réelles de certains colis sont susceptibles d'évoluer à la hausse d'ici la mise en service de Cigéo, comme constaté par exemple pour certains colis 870 L FI et souligné lors du GP2 [4], et que certains colis ne sont pas encore produits. **En conséquence, une attention particulière devra être portée aux évolutions des masses de MF réelles déclarées par les producteurs et à la préservation des marges entre ces dernières et les masses de MF critiques déterminées par l'Andra.**

PSE-ENV relève également que les masses de MF critiques calculées par l'Andra dans les configurations long terme sont supérieures à celles calculées pendant la phase d'exploitation pour la plupart des colis, hormis pour les colis CSD-C et 500 L FI en stockage direct. Pour ces derniers, l'Andra retient donc, dans ses spécifications préliminaires d'acceptation, une masse admissible maximale déduite des analyses de sûreté-criticité après fermeture du stockage, **ce qui est satisfaisant.**

5.1.1.2. Analyse de sûreté-criticité pour l'inventaire de réserve

Pour rappel (cf. chapitre 2.5), l'inventaire de réserve intègre des colis primaires HA et MA-VL, des CU et des déchets FA-VL. Dans son avis de janvier 2018 relatif au DOS [38], l'ASN a demandé à l'Andra, au stade du DDAC,

²²Un colis 870 L FI et un type de colis PIVER, dont les MF dépassent les masses maximales admissibles pour ces types de colis, ont été identifiés au cours de l'expertise. Leur éventuelle acceptation par dérogation à Cigéo reste conditionnée à une démonstration complémentaire de la maîtrise du risque criticité.

de « justifier qu'il n'y a pas d'élément rédhibitoire au stockage des déchets de [l'] inventaire de réserve ». Les études et justifications doivent ainsi « permettre d'avoir la raisonnable assurance que la démonstration de sûreté pourra, le cas échéant, être confirmée pour les déchets de l'inventaire de réserve ».

En préambule, PSE-ENV relève dans le DDAC des incohérences et, pour certains types de CU, des manques dans les hypothèses retenues par l'Andra. En outre, certaines données concernant l'établissement des masses de MF n'ont pas été transmises au cours de l'expertise. Par ailleurs, en l'absence d'informations à leur égard, les CU issus de la propulsion nucléaire navale (**PN**) ne font pas partie de la présente analyse. Bien que son dossier ait été en partie complété et corrigé au cours de l'expertise, **il appartiendra à l'Andra, afin de s'affranchir du risque d'utiliser ces éléments, incohérents ou incomplets à ce stade, de les corriger et les compléter dans les études d'adaptabilité.**

L'Andra reconduit, pour l'inventaire de réserve, sa démarche d'évaluation du risque de criticité du stockage de l'inventaire de référence ainsi que le critère d'admissibilité retenu ($k_{\text{eff}} < 1$) (cf. *supra*). Dans le DDAC [68][57], l'analyse préliminaire du risque de criticité lié au stockage des CU indique ainsi que trois modèles (« état initial », « dégradation des colis » et « migration de la MF »), analogues à ceux considérés pour l'inventaire de référence, ont été considérés. Dans le modèle « état initial », la géométrie des colis est supposée maintenue et la configuration est identique à celle des alvéoles en exploitation. Le modèle « dégradation des colis » met en jeu la disparition progressive de l'épaisseur des matériaux constituant les colis et, le cas échéant, des matériaux non fissiles présents dans les combustibles. Enfin, dans le modèle « migration de la MF », une géométrie annulaire similaire à celle des déchets HA de l'inventaire de référence est considérée, à ceci près que l'intérieur de l'anneau cylindrique est supposé occupé par de l'eau (et non par du verre comme pour le cas des colis HA, cf. *supra*) et que le milieu fissile de référence (**MFR**) retenu, modéré par de l'eau à l'optimum de modération, dépend du type de CU : PuO₂, UO₂, oxyde mixte ou carbure. De manière générale, PSE-ENV constate que cette analyse préliminaire du risque de criticité lié au stockage des CU ne décrit pas les caractéristiques des modèles précités et ne fournit pas les résultats associés. Au cours de l'expertise, l'Andra a transmis des études de criticité spécifiques pour les CU. Ces études présentent diverses situations de dégradation (corrosion des parois des CP, CtS ou, le cas échéant, des étuis internes aux CP ou encore des gaines des combustibles, crayons ou aiguilles manquants ou ruinés, etc.). Le tableau en Annexe T4 décrit, pour chaque type de CU, les principales hypothèses des études de dégradation menées par l'Andra, notamment les MFR, ainsi que les k_{eff} résultant de ces études. Les masses critiques linéiques de MF résultant de l'étude du modèle « migration de la MF » y sont également reportées, ainsi que les masses critiques de MF par colis et la masse de MF maximale réelle par CP recalculées par PSE-ENV à partir des informations disponibles, notamment géométriques, sur les caractéristiques des CU. L'obtention des masses de MF maximales réelles des CU, issues de dossiers de connaissances dont PSE-ENV ne dispose pas, et leur comparaison avec les masses critiques correspondantes ont fait l'objet de plusieurs échanges au cours de l'expertise. L'examen par PSE-ENV de ces études appelle les remarques ci-après.

S'agissant des hypothèses de modélisations retenues, PSE-ENV note que le MFR est considéré homogène pour certains CU ruinés, ce qui n'est pas conservatif au regard de l'estimation du k_{eff} pour les milieux faiblement enrichis. Il convient donc de considérer pour ces CU un MFR hétérogène, représentant des morceaux de CU ruiné, dans les études correspondantes. **Il appartiendra ainsi à l'Andra de tenir compte d'hypothèses conservatives pour représenter le MFR de l'ensemble des CU.**

S'agissant des modèles d'évolution des colis et alvéoles retenus dans ces analyses de sûreté-criticité, la configuration retenue par l'Andra dans le modèle « migration de la MF », présentant une géométrie annulaire similaire à celle retenue pour les déchets HA de l'inventaire de référence, appelle des commentaires du même ordre de la part de PSE-ENV (cf. Engagement 2025-E1 de la lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 [9] rappelée en Annexe A2). S'agissant du modèle « dégradation des colis », PSE-ENV constate que l'Andra a étudié la dégradation des matériaux sous la forme d'études de sensibilité sur les variations de k_{eff} consécutives à des dégradations unitaires (déformation des assemblages combustibles ou des logements des MF, perte d'épaisseur partielle ou totale d'un composant tel que le CP, l'étui ou la gaine de combustible en conservant intègres les autres composants), en lieu et place d'un modèle « dégradation des colis » consolidé par type de CU. PSE-ENV relève que le cumul de plusieurs types de dégradations unitaires, qui apparaît *a priori* plausible à long terme, n'est pas considéré. En outre, l'Andra ne précise pas les hypothèses de dégradation des composants

considérées (e.g. valeur de diminution d'épaisseur). Par ailleurs, les pertes d'épaisseur des CP ou CtS et la déformation des assemblages combustibles ne sont pas étudiées pour les combustibles SUPERPHENIX, alors qu'elles le sont pour d'autres types de CU en partie analogues (assemblages UO₂ ou MOX). Ces éléments sont repris dans la conclusion *infra*. Enfin, PSE-ENV constate qu'à l'instar de son analyse du risque de criticité pour l'inventaire de référence (cf. *supra*), l'Andra ne tient pas compte de variations de la composition chimique/minéralogique des milieux représentés dans ses modèles. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de consolider ses modèles sur la base d'hypothèses intégrant l'évolution chimique des composants des alvéoles dans lesquels les CU pourraient être stockés.**

S'agissant des résultats des études de criticité, PSE-ENV constate que la comparaison entre les masses maximales réelles des MF des CU et les masses critiques de MF correspondantes amène à identifier un état surcritique dans certains cas. L'Andra a indiqué au cours de l'expertise qu'il serait dès lors nécessaire de « *réduire le nombre de combustibles ou d'étuis admissibles par colis* » pour justifier la sous-criticité des CU de type PHENIX dans le modèle « migration de la MF », des CU de type U-93,5% dans le modèle « état initial » et dans le modèle « dégradation des colis » et des CU de type RAPSODIE dans tous les modèles, ce dont PSE-ENV convient. L'Andra a également précisé au cours de l'expertise qu'une autre approche pourrait être de réaliser des études complémentaires pour ces types de CU, en retenant des hypothèses « *affinées* » pour justifier leur sous-criticité.

Hormis pour les CU de types PHENIX et RAPSODIE précités, PSE-ENV relève que les masses critiques déterminées dans le modèle « migration de la MF » pour les autres CU sont supérieures aux masses de MF maximales réelles évaluées par les producteurs de déchets. **Ces résultats tendent à montrer que la démonstration de la maîtrise du risque de criticité, pour ce qui concerne l'étude du modèle « migration de la MF », devrait pouvoir être apportée pour le stockage de la plupart des types de CU.** PSE-ENV rappelle toutefois que ces résultats devront être confirmés après la consolidation attendue du modèle « migration de la MF » (cf. *supra*).

Concernant le modèle « dégradation des colis », PSE-ENV rappelle que, dans les installations en amont de la gestion définitive des CU, telles que les installations d'entreposage, le maintien de leur géométrie est en général le mode de contrôle retenu pour la maîtrise du risque de criticité, dans la mesure où la masse de MF qu'ils contiennent est supérieure, voire très supérieure dans le cas des CU les plus courants tels que les crayons REP UO₂ ou MOX, à la masse de MF critique dans une géométrie quelconque. Par ailleurs, outre les CU de types U-93,5% et RAPSODIE précités, PSE-ENV souligne que les résultats des études des dégradations unitaires pour plusieurs types de CU (CU REP URE notamment) mettent en évidence un k_{eff} proche de 1 (cf. Annexe T4). Or, PSE-ENV estime que le cumul plausible des dégradations à long terme (cf. *supra*) est susceptible de remettre en cause le maintien de la géométrie des CU et ainsi de conduire à des configurations surcritiques. **Dès lors, PSE-ENV estime substantiels les efforts à fournir par l'Andra pour atteindre la démonstration de l'absence de risque de criticité dans la phase intermédiaire d'évolution (cf. remarques *supra* relatives au modèle « dégradation des colis ») pour le stockage des CU.** Aussi, en complément des efforts de démonstration à poursuivre par l'Andra, PSE-ENV l'encourage à identifier des dispositions complémentaires de maîtrise du risque de criticité, telles que la diminution de la masse de MF dans les alvéoles, à l'instar de celle envisagée par l'Andra pour les CU PHENIX, U-93,5% et RAPSODIE (cf. *supra*), ou, pour les CU de types REP URE²³, UNE ou MOX pour lesquels cette diminution n'est pas possible (un seul assemblage dans la section d'un alvéole), la valorisation de caractéristiques favorables vis-à-vis du risque de criticité résultant de l'irradiation des assemblages (burn-up) et de leur vieillissement.

Au vu de l'ensemble des éléments présentés ci-avant, **il appartiendra à l'Andra, en vue de démontrer l'absence de point rédhibitoire au stockage des CU vis-à-vis du risque de criticité en après fermeture, de consolider son analyse de sûreté-criticité notamment en y intégrant (i) la comparaison des masses de MF linéiques maximales réelles et critiques sur la base des éléments apportés au cours de l'expertise, (ii) l'éventuelle réduction du nombre d'étuis ou de colis primaires par rapport aux conditionnements actuellement envisagés pour les colis de CU de types PHENIX, U-93,5% et RAPSODIE et, plus généralement, (iii) les**

²³ Les CU URE couvrent les CU UNE (uranium naturel enrichi), étant donné qu'ils ont les mêmes dimensions et que l'enrichissement maximal des CU URE est supérieur à celui des CU UNE.

éventuelles dispositions complémentaires de maîtrise du risque de criticité issues de l'étude d'un modèle « dégradation des colis » consolidé représentant la dégradation des composants des colis de CU.

S'agissant de la qualification des moyens de calcul, l'Andra a effectué les calculs avec les voies APOLLO2 – MORET 5 (calculs Monte Carlo multigroupe) et APOLLO2 – Sn (calculs déterministes) du formulaire CRISTAL V2.0.2, pour tous les types de CU. La voie APOLLO2 – MORET 5 est utilisée pour les calculs des configurations des modèles « état initial » et « dégradation des colis ». La voie APOLLO2 – Sn est quant à elle utilisée pour les calculs de normes mettant en œuvre des anneaux cylindriques de longueur infinie afin de déterminer, dans le modèle « migration de la MF », les masses critiques linéiques pour les différents CU. Les analyses de la qualification présentées dans les études de criticité relatives aux CU, qui s'appuient sur des expériences critiques représentatives des configurations propres à chaque type de CU (notamment des différents MFR), ne mettent pas en évidence de biais de calcul. **Les éléments présentés par l'Andra n'appellent pas de remarque de la part de PSE-ENV.**

Enfin, s'agissant des colis de déchets FA-VL de l'inventaire de réserve, PSE-ENV rappelle [4] qu'ils contiennent des masses de MF au moins deux fois inférieures aux masses admissibles calculées par l'Andra pour les colis MA-VL et que les mêmes hypothèses de sûreté-criticité (géométrie, matrices, répartition des MF, etc.) sont considérées. L'Andra conclut, à l'instar de la démonstration de sûreté en exploitation, que le risque lié à la criticité du stockage de colis FA-VL à long terme est couvert par les études de sûreté réalisées pour les colis MA-VL de l'inventaire de référence, **ce dont PSE-ENV convient.**

5.1.2. Effet du gonflement sous eau des déchets bitumés

Les colis de déchets bitumés destinés à Cigéo contiennent des déchets radioactifs MA-VL issus du traitement des effluents liquides des établissements de Marcoule et de La Hague [53]. Ce traitement conduit à un mélange de radionucléides et de sels solubles enrobés dans une matrice bitumineuse. Les risques vis-à-vis de la sûreté en exploitation associés au stockage de ces colis sont examinés par l'IRSN dans le cadre du GP2 [4]. Vis-à-vis de la sûreté à long terme, ces colis présentent un risque de gonflement sous eau susceptible de conduire à de fortes pressions mécaniques exercées sur les parois de leurs alvéoles de stockage [86]. L'Andra précise que ce phénomène de reprise d'eau est un processus osmotique d'autant plus important que la solubilité des sels est élevée (e.g. nitrate de sodium) et dont la cinétique peut être accélérée en présence de sels insolubles (e.g. sulfate de baryum). Dans Cigéo, en après fermeture, il est attendu que cette interaction avec l'eau se produise pendant le transitoire hydraulique-gaz et s'étende sur plusieurs dizaines de milliers d'années, voire au-delà, en passant par un maximum qui diminuera ensuite avec le départ progressif des sels hors de l'enrobé. L'acceptabilité de ces déchets dans Cigéo nécessite donc pour l'Andra de montrer que ces pressions mécaniques importantes ne sont pas de nature à compromettre l'épaisseur de garde d'argilites saines de 50 m requise. D'un point de vue phénoménologique, PSE-ENV précise que cette pression commence par contribuer au colmatage de la zone de roche endommagée initialement présente autour de l'alvéole, puis la sur-endommage et finit par l'étendre au-delà de son extension initiale, cette nouvelle extension devant rester limitée pour ne pas compromettre l'épaisseur de garde saine requise au droit de l'alvéole.

Au stade du DOS, sur la base d'essais réalisés sur des enrobés bitumés belges, l'Andra considérait que la pression maximale de gonflement susceptible d'être appliquée par ces déchets sur la paroi de leurs alvéoles de stockage était de 20 MPa. L'IRSN observait alors [36] que cette valeur était issue d'un travail (Mariën et al., 2012 [87]) qui mentionnait également une valeur théorique maximale de l'ordre de 43 MPa, ce qui pouvait être conséquent au regard de la pression lithostatique de la roche hôte de Cigéo évaluée à environ 12 MPa. Dans l'attente de résultats d'essais des producteurs d'enrobés bitumés français, l'IRSN indiquait que ce sujet serait examiné plus avant lors de l'examen de la DAC.

Au stade du DDAC, l'Andra présente [88] un état d'avancement des travaux relatifs à l'évaluation quantitative de l'effet du gonflement des déchets bitumés sur l'endommagement du COx, menés dans le cadre du programme de recherche Babylone. PSE-ENV rappelle [4] que ce programme est en cours et réunit EDF, Orano, le CEA et l'Andra dans l'objectif principal d'améliorer les connaissances relatives aux caractéristiques des colis de déchets bitumés. Dans l'attente des résultats finaux de ce programme à la fin de l'année 2027, l'Andra [88] présente une synthèse d'un ensemble de simulations numériques visant à évaluer l'endommagement induit dans la roche par

l'application progressive d'une pression mécanique importante sur la paroi interne d'un alvéole MA-VL. PSE-ENV note que la pression maximale retenue dans les simulations numériques présentées par l'Andra [88] est désormais de 43 MPa (au lieu de 20 MPa au stade du DOS), en cohérence avec la valeur de pression osmotique théorique maximale précitée. L'Andra [88] souligne le conservatisme introduit à ce stade par cette hypothèse ; le relâchement de sels par les bitumes lors de leur gonflement sous eau, ainsi que la présence d'espaces vides dans l'alvéole et la déformabilité de certains composants tels que la roche en paroi, devraient conduire à une pression de gonflement inférieure à celle estimée théoriquement et à volume constant. Les résultats de l'étude paramétrique réalisée par l'Andra [88] montrent que même avec cette approche enveloppe, l'extension totale de l'endommagement est toujours inférieure ou égale au diamètre de l'ouvrage en vertical et ne conduit pas à une interconnexion horizontale des zones endommagées entre alvéoles adjacents.

PSE-ENV convient du caractère conservatif de l'évaluation présentée et relève que l'extension de l'endommagement d'un diamètre (10 m) évaluée par l'Andra ne conduit pas à entamer l'épaisseur de garde saine de 50 m requise (marge de l'ordre de 5 m par rapport à cet objectif). PSE-ENV estime que ces résultats sont encourageants mais rappelle que le processus de gonflement sous eau des bitumes se produit pendant le transitoire hydraulique-gaz et observe que la pression de gaz, dont la valeur de référence peut atteindre 7,5 MPa dans le quartier MA-VL (cf. GP1 [2]), n'est pas prise en compte dans les simulations présentées. PSE-ENV souligne que la manière dont cette pression de gaz modifiera la pression totale appliquée sur la paroi n'est pas triviale et nécessitera une justification. Au cours de l'expertise, l'Andra a confirmé que ce travail était en cours dans le cadre du programme Babylone. **En conclusion, au vu des résultats préliminaires des évaluations quantitatives de l'effet du gonflement des déchets bitumés sur l'endommagement du COx et des objectifs du programme de recherche Babylone en cours, PSE-ENV estime que la possibilité de maîtriser cet effet apparaît accessible.** PSE-ENV rappelle en outre (cf. GP1 [2]) que les concepts de scellement évoluent afin de diminuer cette pression de gaz en les laissant passer, et que l'Andra ne prévoit pas de stocker de colis de déchets bitumés au cours de la phase industrielle pilote.

5.1.3. Effet « piston » lié aux gaz

Comme indiqué dans le cadre du GP1 [2] et au stade du DOS [36], le gaz produit par le stockage (radiolyse, corrosion, etc.) est susceptible de mettre l'eau en mouvement par « effet piston » (déplacement d'eau induit par la pression des gaz) et avec elle, les solutés qu'elle pourrait contenir. Selon les simulations de l'Andra, la resaturation du stockage nécessite quelques centaines de milliers d'années pour être complète. Néanmoins, des flux d'eau en milieu diphasique apparaissent entre 1 000 et 10 000 ans à travers les scellements du quartier de stockage HA (cf. Figure 9) sous l'effet de la montée en pression des gaz. Au stade du GP1, l'Andra indiquait que les déplacements d'eau qui en résultent dans les ouvrages remblayés étaient de l'ordre de quelques décimètres au plus après 10 000 ans. L'IRSN en convenait sur la base de ses propres estimations [89] menées sur une durée de transitoire plus longue. L'Andra précisait alors que les flux d'eau mis en jeu étaient au plus de quelques centaines de litres par an, sans conséquence significative sur la migration des radionucléides. PSE-ENV observe que ces débits d'eau sont comparables à ceux évalués au stade du DDAC après saturation du stockage par l'Andra (chapitre 6.1) en sortie de LSF dans le cadre de la situation enveloppe du SEN, qui atteignent 300 L/an et sont cohérents avec les résultats des simulations de PSE-ENV (cf. Annexe T8). **Par conséquent, PSE-ENV estime qu'à ce stade, l'hypothèse de l'Andra selon laquelle l'impact de l'effet piston n'est pas majeur est justifiée.** Il conviendra néanmoins de vérifier que cette hypothèse reste valable à la lumière des résultats des futurs travaux de l'Andra portant sur l'évaluation du transfert des gaz dans le stockage, notamment dans le cadre de son engagement 2024-E14 pris à l'issue de l'examen du GP1.

5.1.4. Effet des surpressions hydrauliques induites par le fluage de la roche

Lors de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture » [28], l'Andra s'est engagée à identifier les situations hydrauliques pouvant conduire à de possibles surpressions après la fermeture du stockage, notamment liées à des ruptures d'ouvrages ou au fluage de la roche, et à en évaluer les conséquences potentielles sur les performances des scellements ainsi que sur celles du stockage à grande échelle. L'Andra a ainsi réalisé un ensemble de simulations numériques, dont les résultats [90] ont été transmis dans le cadre de la présente expertise.

Concernant la possibilité de surpressions hydrauliques induites dans les remblais suite à des ruptures de revêtements/soutènements de galeries, l'Andra indique que ces ruptures sont attendues moins d'une dizaine de milliers d'années après la fermeture du stockage, soit bien avant la resaturation complète des remblais qui nécessite quelques centaines de milliers d'années. L'Andra ajoute que même dans le cas d'une resaturation plus rapide, la capacité d'emmagasinement des remblais permettrait d'absorber l'effet hydraulique d'une rupture, ce dont PSE-ENV convient. S'agissant des scellements, PSE-ENV rappelle (cf. GP1 [2]) que les scellements de LSF sont ceux qui se resaturent le plus vite (sous l'effet des eaux provenant de l'Oxfordien sus-jacent), et observe que, dans ce cas très particulier, une rupture précoce (*i.e.* vers 2 000 ans) du revêtement laissé en place en partie basse d'une descenderie, sous le scellement, entrainerait selon l'Andra [90] une augmentation de pression d'eau de 2 MPa sur ce scellement, ce qui n'apparaît pas négligeable au regard de sa pression de gonflement finale attendue qui est de 2 à 4 MPa. Cette surpression serait susceptible d'occasionner un endommagement du scellement en forçant l'ouverture de l'interface entre le noyau et la roche. PSE-ENV rappelle que des « simulations numériques d'ensemble » des ouvrages de scellement, et notamment de ceux des LSF, ont été demandées par l'ASN à l'issue de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture » [28] et que l'Andra a indiqué au cours de la présente expertise que des études complémentaires étaient engagées conformément au « Programme des activités scientifiques et technologiques après le dépôt du dossier de DAC » [91]. **PSE-ENV estime par conséquent qu'il appartiendra à l'Andra d'inclure ces éventuelles surpressions dans l'ensemble des processus pris en compte pour les études prévues dans le programme après DAC.** Par ailleurs, le dysfonctionnement des scellements fait l'objet de scénarios SEA et *What-if* considérés dans l'évaluation de la sûreté de Cigéo et examinés au chapitre 6.2 du présent rapport.

Pour ce qui concerne l'effet du comportement différé de la roche (fluage) sur la charge hydraulique de galeries totalement saturées en eau (charge induite par la réduction de leur diamètre), l'Andra indique que les simulations numériques ne montrent pas d'effet de montée en pression significatif et que la charge hydraulique supplémentaire appliquée aux scellements, de l'ordre de quelques mètres de hauteur d'eau, est très faible, **ce dont PSE-ENV convient.**

5.2. RISQUES D'ORIGINE EXTERNE : SEISME

Les risques dits "externes" sont ceux liés à des perturbations d'origine extérieure au système de stockage. Il s'agit, vis-à-vis de la sûreté après fermeture du stockage, des trois grands types de perturbations suivants : les événements climatiques et géodynamiques, les séismes et les intrusions humaines involontaires dans la zone d'implantation du stockage. Les phénomènes climatiques et géodynamiques ne sont pas susceptibles d'altérer les capacités de confinement de la roche hôte du COx (cf. GP1 [2]). Toutefois, compte tenu de leur impact potentiel sur les exutoires et les biosphères notamment, l'Andra les considère, d'une part dans des modèles géoprospectifs associés aux scénarios d'évolution du stockage étudiés, d'autre part pour définir des biosphère-types, examinés respectivement aux chapitres 4.5 du présent rapport. Les intrusions humaines involontaires font l'objet du chapitre 6.3. L'examen des risques liés à l'aléa sismique est quant à lui présenté ci-après.

Le référentiel de connaissances scientifiques relatives aux séismes [92][93][94][95][96][97] et la démonstration de sûreté vis-à-vis de l'aléa sismique après fermeture présentés au stade du DDAC, ainsi que les choix de conception qui en découlent et leurs justifications [47][98][99][100][101], sont globalement similaires à ceux expertisés par l'IRSN dans le cadre de l'examen du DOS [36]. Aussi, la présente expertise porte sur les éléments nouveaux retenus au stade du DDAC.

PSE-ENV analyse dans ce chapitre la mise à jour par l'Andra du séisme maximum physiquement possible (SMPP), en particulier s'agissant de son caractère enveloppe et de sa période de retour. L'effet des variations climatiques sur la sismicité ainsi que les conséquences d'un séisme en après fermeture sont également abordés dans ce chapitre.

Comme décrit *supra* (cf. chapitre 4), pour la démonstration de sûreté après fermeture de l'installation de stockage, le guide n°1 de l'ASN [11] distingue les situations dites de « référence » des situations dites « altérées ». Les premières sont relatives aux événements naturels « probables », correspondant à l'évolution prévisible de l'installation de stockage et du milieu géologique. Les secondes sont relatives aux événements naturels « incertains mais plausibles », qui peuvent conduire à une accélération de la migration des substances

radioactives vers la biosphère. Pour les situations de référence, correspondant au scénario d'évolution normale (SEN), le guide n°1 de l'ASN préconise de prendre en compte des niveaux sismiques associés à différentes périodes de temps après fermeture. Pour les situations altérées, il préconise la prise en compte du séisme maximum physiquement possible (SMPP). Le SMPP est défini comme un séisme d'ampleur exceptionnelle, dont les caractéristiques doivent être recherchées sur la base du contexte tectonique du site. L'Andra retient au stade du DDAC le SMPP pour définir l'aléa sismique pour la phase d'après fermeture.

Définition du SMPP

À l'issue de l'expertise du DOS, l'ASN avait demandé à l'Andra de retenir comme spectre du SMPP l'enveloppe des spectres issus du modèle structural régional (failles de Poissons, Gondrecourt, et Vittel) et de ceux issus du modèle de « séisme flottant », présentés en 2016 et analysés dans le cadre du DOS [36]. Au stade du DDAC, l'Andra retient comme aléa sismique de référence le spectre du SMPP défini comme un séisme de magnitude 6,5 se produisant sur la faille de Poissons, à une distance de 13 km du site, soit la plus courte entre la faille et la ZIRA [101][94]. Le spectre d'aléa ainsi défini est l'enveloppe de tous les autres spectres envisagés. **PSE-ENV estime que ces éléments sont satisfaisants.**

Caractère enveloppe du SMPP vis-à-vis des structures à l'aplomb de la ZIRA

Dans le cadre de l'expertise de la sismique 3D réalisée par l'Andra en 2010, l'IRSN avait soulevé [25] des questionnements sur le potentiel sismogène des structures nord-sud identifiées dans le Trias. En réponse, l'Andra s'était engagée pour la DAC à « vérifier le caractère enveloppe du spectre sismique retenu pour la phase après fermeture vis-à-vis de séismes physiquement plausibles à l'aplomb de la ZIRA dont le foyer se situerait à moins de 10 km de profondeur ».

Afin de vérifier le caractère enveloppe du spectre associé au SMPP, l'Andra présente une étude portant sur le mouvement vibratoire généré par des séismes dont le foyer se situerait à l'aplomb de la ZIRA [101][92]. À cette fin, elle s'appuie sur les résultats issus des campagnes d'imagerie géophysique par sismique-réflexion des couches géologiques à l'aplomb de la ZIRA. L'Andra indique que le pouvoir de résolution de l'imagerie réalisée diminue avec la profondeur : des décalages verticaux de quelques mètres sont observables dans les couches localisées jusqu'à 2 km de profondeur, tandis qu'à plus de 5 km de profondeur, seuls des décalages verticaux supérieurs à 40 mètres sont détectables. Sur cette base, l'Andra exclut la présence de failles majeures au sein de la couverture mésozoïque (profondeurs inférieures à 2 km) et ne définit pas de séismes dont le foyer s'y trouverait. S'agissant des couches entre 2 et 5 km de profondeur, l'Andra ne retient pas de faille susceptible d'être à l'origine d'un séisme. En ce qui concerne le socle (à plus de 5 km de profondeur), ne pouvant pas exclure la présence de failles à faible décalage vertical (< 40 m), l'Andra définit un ensemble de séismes susceptibles de se produire sur de telles failles. Les magnitudes sont calculées à l'aide de lois d'échelle reliant la taille de la faille aux décalages verticaux et les foyers de ces séismes sont localisés dans le socle entre 5 km et 10 km de profondeur à l'aplomb de la ZIRA. À l'issue de son calcul, l'Andra conclut que l'ensemble de ces spectres sont couverts par le spectre du SMPP retenu notamment pour le dimensionnement des ouvrages de fermeture.

Pour ce qui concerne les séismes se produisant à des profondeurs supérieures à 5 km, l'approche développée par l'Andra pour déterminer leurs caractéristiques est fondée sur des hypothèses acceptables, compte tenu des connaissances disponibles et des incertitudes. Pour d'éventuels foyers situés entre 2 et 5 km de profondeur, l'Andra a justifié au cours de l'expertise l'exclusion de failles sismogènes par le fait que la résolution de l'imagerie sismique décroît de façon progressive entre ces deux profondeurs. PSE-ENV convient de cette diminution progressive de la résolution sismique et donc de l'augmentation linéaire avec la profondeur du décalage vertical de failles potentiellement sismogènes qui pourraient dès lors ne pas être détectées. Cependant, cette augmentation n'induit pas nécessairement une évolution linéaire des effets au niveau du site de séismes qui s'y produiraient. **Aussi, PSE-ENV estime que l'Andra devra apporter un complément de justification du caractère enveloppe du SMPP vis-à-vis de séismes pouvant se produire entre 2 et 5 km de profondeur.**

Pour ce qui concerne les séismes se produisant dans la couverture mésozoïque, l'exclusion de la présence de failles majeures compte tenu de la résolution de l'imagerie 3D apparaît raisonnable. Toutefois, les structures Lias-Trias détectées par l'Andra à moins de 2 km de profondeur, au droit du futur quartier de stockage des déchets

HA, ne sont pas retenues comme des failles. A cet égard, PSE-ENV rappelle que le GPD a estimé [6] qu' « une incertitude subsist[ait] sur l'extension possible dans le Callovo-Oxfordien des structures détectées dans le Trias au droit de la partie nord du futur quartier de stockage HA et par conséquent sur leur impact éventuel sur les propriétés de la roche hôte. Il considère qu'elle devra être levée dans le cadre d'un programme de reconnaissance à l'aplomb de ces structures ». Ce point a fait l'objet de la recommandation R1 dans l'avis du GPD [6]. Par ailleurs, au stade du dossier « Evolutions des études depuis 2009 » [26], le GPD concluait que l'origine tectonique des structures dans le Trias ne pouvait être exclue. A l'issue de cette expertise, l'Andra avait pris l'engagement de « définir des séismes possibles à l'aplomb de la ZIRA ». Au cours de la présente expertise, l'Andra a indiqué qu'elle considérait toujours ces structures comme des figures de dissolution du sel et non comme des failles sismogènes. PSE-ENV constate que l'Andra ne tient toujours pas compte d'une origine tectonique possible de ces structures dans la définition du SMPP, sans apporter de nouveaux éléments de justification, **ce qui n'est pas satisfaisant. Aussi, PSE-ENV estime que l'Andra devra compléter sa démonstration du caractère enveloppe du SMPP en prenant en compte les séismes susceptibles de se produire en lien avec l'hypothèse d'une origine tectonique des structures détectées dans le Trias.**

En conclusion, PSE-ENV estime que l'Andra devra compléter, avant le creusement des ouvrages souterrains, sa démonstration du caractère enveloppe du SMPP en postulant les séismes :

- **pouvant se produire dans le Paléozoïque (entre 2 et 5 km de profondeur), au droit de la ZIOS,**
- **associés à une éventuelle nature tectonique des structures détectées dans le Trias (à moins de 2 km de profondeur), au droit du futur quartier de stockage HA.**

Ce point a fait l'objet de l'**engagement 2025-E3** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. PSE-ENV estime que cet engagement est satisfaisant.

Période de retour du SMPP

En 2013, l'ASN a demandé à l'Andra de combiner les approches déterministes et probabilistes pour quantifier l'aléa sismique. Par ailleurs, à la suite de l'expertise du Dossier 2009 [20], l'Andra s'était engagée à justifier son évaluation de la période de retour du SMPP. En 2016, dans le cadre du DOS, l'Andra a réalisé un calcul d'aléa probabiliste, en cohérence avec son engagement et en réponse à la demande précitée. Sur la base de ce calcul [102], l'Andra estime que les niveaux d'accélération médians du spectre de dimensionnement des ouvrages après fermeture ont des périodes de retour comprises entre 60 000 et environ 400 000 ans, en fonction des fréquences [94]. Comme indiqué dans le cadre de l'expertise du DOS [36], PSE-ENV rappelle que les calculs d'aléa probabilistes à longues périodes de retour sont associés à de fortes incertitudes. Ainsi, les valeurs de période de retour calculées restent indicatives. PSE-ENV note que l'Andra n'a pas fourni d'estimation des périodes de retour du spectre SMPP associé à la faille de Poissons décrit *supra*. **Néanmoins, PSE-ENV estime qu'il est attendu que les périodes de retour du spectre SMPP soient supérieures à celles indiquées par l'Andra, en raison du caractère enveloppe du spectre de dimensionnement présenté en 2016, et que celles-ci sont donc acceptables.**



Effets des glaciations sur la sismicité

À la suite de l'expertise du DOS [36], l'Andra s'est engagée à prendre en compte l'évolution possible des contraintes tectoniques sur le prochain million d'années en lien avec les périodes de glaciations climatiques. Pour répondre à son engagement, elle a mis en œuvre deux études pour investiguer l'impact de futures glaciations sur le stockage, notamment sur la réactivation des failles autour du site [94][103][104]. Selon ces études, la modification des contraintes induite par les glaciations favoriserait la sismicité localisée dans la partie la plus superficielle des failles. Cette sismicité serait caractérisée par des séismes de faible magnitude, qui ne remettrait pas en cause les caractéristiques du SMPP (dimension et localisation). **PSE-ENV estime que les éléments présentés par l'Andra, qui reflètent l'état des connaissances sur le sujet, sont satisfaisants. PSE-ENV encourage l'Andra à assurer une veille sur l'évolution des connaissances liées à la géoprospective, comme indiqué à l'issue de l'expertise du GP1 [2], de manière, le cas échéant, à en tirer des enseignements sur la sismicité induite par les glaciations.**

Conséquence d'un séisme sur le milieu géologique

À la suite de l'expertise du DOS [36], l'Andra s'est par ailleurs engagée à évaluer les conséquences éventuelles d'un séisme SMPP sur le milieu géologique. Sur la base de l'absence de traces observables de séismes (fracturation, déformations) au sein du COx, l'Andra estime que l'occurrence d'un séisme se produisant sur le pourtour de la ZIRA, ne conduira à aucun effet notable sur le milieu géologique entourant le stockage (e.g. création de failles ou endommagement de la roche hôte) [101][95]. En outre, les ouvrages de fermeture étant essentiellement de nature argileuse (scellements, remblais), l'Andra fait l'hypothèse que leurs capacités favorables de confinement, notamment leurs propriétés imperméables, ne seront pas modifiées par l'occurrence d'un séisme de niveau SMPP [101].

Les éléments présentés par l'Andra concernant le comportement aux séismes du COx **n'appellent pas de commentaire de la part de PSE-ENV**, à l'exception de la possibilité à long terme de propagation de discontinuités sous-jacentes à la formation du COx, en lien avec une activité sismique. Cette incertitude, soulevée lors du DOS [36], est désormais prise en compte par l'Andra dans deux scénarios *What-if* et examinée au chapitre 6.2.3.

En ce qui concerne les scellements et les remblais, l'Andra a indiqué au cours de l'expertise qu'elle a prévu de poursuivre les investigations concernant l'impact d'un séisme (programme de recherche expérimental et numérique visant les liquéfactions). S'agissant des effets d'un séisme sur les circulations fluides dans les encaissants calcaires du COx, l'Andra a par ailleurs indiqué que, compte tenu de la rigidité des encaissants calcaires, il n'est pas attendu de modifications de leurs propriétés hydromécaniques sous l'effet d'un séisme. **PSE-ENV estime que les éléments présentés par l'Andra reflètent l'état des connaissances, ce qui est satisfaisant à ce stade.**



5.3. DEFINITION DES SCENARIOS D'EVOLUTION DU STOCKAGE

Sur la base de son ARI, l'Andra définit des scénarios d'évolution du système de stockage sur le long terme (cf. chapitre 4). Les scénarios retenus, examinés par PSE-ENV dans le présent chapitre, se composent du scénario d'évolution normale (SEN) et des familles de scénarios d'évolution altérée (SEA), *What-if* et d'intrusion humaine involontaire (SIHI).

5.3.1. Scénario d'évolution normale

Comme décrit précédemment au chapitre 4.1, et en cohérence avec les recommandations du guide n°1 de l'ASN [11], l'Andra définit le SEN comme la représentation du système de stockage et de son évolution prévisible sur le long terme, en considérant que toutes les fonctions de sûreté après fermeture sont satisfaites [47]. L'Andra s'appuie pour ce faire sur les connaissances scientifiques et techniques acquises, objets de l'examen de l'IRSN lors du GP1. Au stade du DDAC [39], l'Andra décline ce scénario en deux situations, dites de « référence » et « enveloppe », dans la continuité de la méthodologie adoptée au stade du DOS [14].

La « situation de référence » vise à évaluer la performance attendue (ou normale) du système de stockage, ainsi que les incidences sanitaires et environnementales après fermeture, en considérant un ensemble d'hypothèses et de données scientifiquement étayées (valeurs de référence ou médianes) dites « *best-estimate* ». En l'absence de données suffisamment étayées ou lorsque des incertitudes persistent, l'Andra adopte des valeurs conservatives, ainsi que des choix pénalisants, tels que la saturation en eau du stockage dès sa fermeture afin de s'affranchir des incertitudes liées à sa cinétique (cf. chapitre 6.1 du présent rapport).

La « situation enveloppe » correspond au fonctionnement de Cigéo tel que spécifié par l'Andra dans ses exigences [68] (cf. chapitre 4). Les hypothèses et les données retenues correspondent ainsi aux exigences applicables à l'installation, ou « valeurs spécifiées », c'est-à-dire aux performances minimales admissibles des composants assurant une fonction de sûreté. A titre d'exemple, l'Andra spécifie l'épaisseur minimale de garde d'argilite saine de part et d'autre du stockage à 50 m, qu'elle retient en situation enveloppe plutôt qu'une valeur supérieure à 60 m conforme au positionnement du stockage dans la couche géologique hôte (cf. chapitre 6.1 du présent rapport). Dans le cas où aucune exigence n'est spécifiée, l'Andra applique des choix conservatifs fondés sur l'état des connaissances. Enfin, comme pour la situation de référence, des paramètres ou hypothèses pénalisants sont également retenus par l'Andra.

L'évaluation de ces deux situations complémentaires a pour objectif, pour l'évolution normale, d'estimer l'impact radiologique attendu au regard des connaissances actuelles, en complément de l'impact radiologique maximal qui tient compte de l'ensemble des incertitudes identifiées ou des valeurs spécifiées. La combinaison de ces deux situations renseigne en outre sur les phénomènes et paramètres prépondérants vis-à-vis du transfert des radionucléides. **PSE-ENV estime satisfaisante sur le principe l'approche retenue par l'Andra.**

La pertinence des hypothèses et données retenues pour la conceptualisation des situations de référence et enveloppe du SEN est examinée au chapitre 6.1 du présent rapport, au regard notamment du caractère conservatif des valeurs retenues par l'Andra et d'études de sensibilité paramétrique (paramètres hydrauliques du COx ou mode de distribution de l'inventaire radiologique par exemple). Dès à présent, PSE-ENV souligne le caractère pénalisant d'un certain nombre d'hypothèses communes aux deux situations du SEN, telles que celle précitée de saturation en eau du stockage dès sa fermeture, le mode de distribution de l'inventaire radiologique dans les alvéoles de stockage MA-VL, ou encore les propriétés de transfert assignées aux parties utiles des alvéoles et à la zone fracturée par l'excavation du COx. En sus, PSE-ENV note que la situation enveloppe du SEN cumule le strict respect des exigences de l'installation et des hypothèses pénalisantes par ailleurs. Elle constitue donc un domaine d'évolution prévisible étendu du système de stockage et conduit ainsi à majorer de manière probablement excessive la quantité et la vitesse de transfert des radionucléides dans le COx et dans les formations encaissantes jusqu'aux exutoires. **Aussi, bien que la situation enveloppe du SEN constitue formellement la limite du domaine d'évolution normale du système de stockage et de son environnement, PSE-ENV estime que les résultats issus de cette situation doivent être nuancés au regard de son caractère pénalisant.** Ces résultats, replacés dans une démarche globale d'évaluation du comportement du système de stockage, permettent notamment d'identifier d'éventuels besoins de consolidation des connaissances en vue de réduire les incertitudes prises en compte et de disposer *in fine* de marges substantielles par rapport aux objectifs de protection.

5.3.2. Scénarios d'évolution altérée, *What-if* et SIHI

L'Andra retient le dysfonctionnement d'un ou de plusieurs composant(s) du système de stockage pouvant entraîner une dégradation significative de ses performances ou la perte d'une fonction de sûreté. Ces dégradations ou ces pertes de fonctions de sûreté sont représentées dans des scénarios d'évolution SEA ou *What-if*, selon les causes de dysfonctionnement identifiées et leur vraisemblance (cf. chapitre 4), sur la base d'une approche qualitative :

- si les évolutions du système de stockage résultent d'événements incertains mais plausibles, qualifiés de « *peu vraisemblables* » par l'Andra au regard des connaissances scientifiques et techniques disponibles, l'Andra les représente en SEA. Leur objectif est d'évaluer les conséquences d'éventuelles dérives du stockage dans le temps, et de vérifier la capacité des lignes de défense passives mises en œuvre à assurer la sûreté à long terme du stockage ;
- si les causes de dysfonctionnement de composants sont « *très peu vraisemblables* », l'Andra les prend en compte dans des scénarios *What-if*, dont l'objectif est de vérifier la robustesse du système de stockage.

Selon cette approche, l'Andra présente, comme au stade du DOS, le dysfonctionnement de deux composants participant à la réalisation de fonctions de sûreté après fermeture : les ouvrages de scellement et les colis de stockage HA.

Les scénarios de dysfonctionnement des scellements considèrent :

- une dégradation de la fonction de sûreté « s'opposer à la circulation de l'eau » en postulant des défauts des scellements par leur interface avec le COx, jugés « *peu vraisemblable* » par l'Andra, via trois SEA (dysfonctionnement partiel des scellements des LSF, des galeries ou de l'ensemble des scellements) ;
- une perte de cette fonction de sûreté en retenant un cumul de défaillances, jugé « *très peu vraisemblable* » par l'Andra, affectant à la fois le noyau argileux et son interface avec le COx, via trois scénarios *What-if* (dysfonctionnement total des scellements des LSF, des galeries ou de l'ensemble des scellements).

S'agissant du dysfonctionnement des colis HA²⁴, l'Andra présente dans le DDAC deux scénarios SEA postulant la perte partielle de la sous-fonction de sûreté « protéger les déchets de l'eau » liée, soit au dysfonctionnement de l'ensemble des conteneurs de stockage de la zone HA0, soit au dysfonctionnement d'un conteneur de stockage HA par alvéole HA du quartier de stockage HA. La perte d'étanchéité prématurée de ces conteneurs conduit, selon l'Andra, à exposer la matrice vitreuse à des conditions environnementales défavorables (notamment la température et le pH), entraînant une dégradation de ses performances et, par conséquent, de la fonction de sûreté « limiter le relâchement des substances radioactives et des toxiques chimiques, et les immobiliser dans les alvéoles ». En complément, l'Andra postule, dans un scénario *What-if*, la perte totale de la sous-fonction de sûreté « protéger les déchets de l'eau », consécutive à un dysfonctionnement généralisé de l'étanchéité de l'ensemble des conteneurs HA. Pour ces scénarios, l'Andra prend en compte un relâchement labile (sur un an) dès la fermeture du stockage de l'activité radiologique contenue dans les colis concernés.

Par ailleurs, en réponse à la demande de l'ASN (2013) et à la recommandation formulée par un groupe d'experts réunis par l'AIEA à l'automne 2016 [70] de prendre en compte, dans le cadre d'un scénario *What-if*, une structure conductrice dans la roche hôte, l'Andra étudie dans le DDAC la présence d'une discontinuité non détectée au sein du COx dans le cadre de deux scénarios *What-if*. Bien qu'aucune structure conductrice susceptible de favoriser la migration des solutés n'ait été identifiée sur le site, ces scénarios visent à couvrir les incertitudes résiduelles liées, d'une part à l'extension possible dans le COx des structures détectées par la sismique 3D dans le Trias au droit de la partie nord du futur quartier de stockage HA (cf. GP1), d'autre part à la possibilité à long terme de propagation de discontinuités sous-jacentes à la formation du COx, en lien avec une activité sismique [36]. De tels scénarios conduiraient à une perte locale des fonctions « s'opposer à la circulation de l'eau » et « retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques relâchés depuis les alvéoles de stockage ». Au stade du DOS, l'IRSN constatait que, pour ce qui concerne l'objectif de « préserver les propriétés favorables des argillites de la couche du COx et des composants ouvragés impliqués dans la réalisation des fonctions de sûreté après fermeture » pendant la phase d'exploitation de Cigéo dans le cadre de la fonction de sûreté « retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques relâchés depuis les alvéoles de stockage », l'Andra ne retenait pas de scénario qui rendrait compte d'une variabilité de l'épaisseur de garde saine au droit des quartiers de stockage. L'IRSN identifiait alors les possibilités d'un défaut de soutènement de la roche ou de remblayage, pendant respectivement la phase d'exploitation (et de fermeture) du stockage, conduisant à un endommagement non maîtrisé de la roche. Conformément à son engagement pris à l'issue de l'expertise du DOS [36], l'Andra considère dans le DDAC un scénario conventionnel d'effondrement au cours de la phase d'exploitation de Cigéo, qui conduit à une diminution de l'épaisseur de garde saine de la roche hôte à proximité de colis stockés dans un alvéole MA-VL.

En lien avec ce même objectif de « préserver les propriétés favorables des argillites de la couche du COx et des composants ouvragés impliqués dans la réalisation des fonctions de sûreté après fermeture » pendant la phase d'exploitation de Cigéo, l'IRSN estimait également que le cas d'abandon de tout ou partie du stockage était possible, suite par exemple à des bouleversements socio-économiques, impliquant une perte de financement ou de contrôle institutionnel. Bien que ce scénario apparaisse peu probable à date, il ne peut être totalement exclu sur la durée d'ordre séculaire d'exploitation de Cigéo. Cette réflexion a conduit PSE-ENV à considérer, dans ses propres modélisations de l'évolution du stockage à long terme, un scénario d'abandon du stockage, dont les conséquences potentielles sur le transport à long terme des radionucléides hors du stockage et les enseignements sont présentés au chapitre 6.2.4 du présent rapport.

Enfin, l'Andra évalue les conséquences d'une intrusion humaine involontaire après la fermeture du stockage, en considérant, en cohérence avec les préconisations internationales [105] et le guide ASN n°1 (cf. chapitres 4 et 6.3), quatre scénarios d'intrusion humaine involontaire, liés à des activités de forages profonds. Ces scénarios conduisent à la perte locale de la fonction « isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions de l'homme » pour le scénario d'exposition à des carottes de forage contenant des déchets, et des fonctions « s'opposer à la circulation de l'eau » et « retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques » pour les scénarios conduisant à la création d'un court-circuit hydraulique de la roche hôte sur la phase

²⁴ Pour rappel, les colis MA-VL ne portent pas de fonction de sûreté en lien avec le relâchement des solutés et ne font donc pas l'objet de scénario de dysfonctionnement.

long terme. L'Andra postule l'occurrence du forage à 500 ans, en cohérence avec le guide ASN n°1 qui définit cette durée comme la durée minimale de conservation de la mémoire du stockage après la fermeture de l'installation (cf. chapitre 4.5). PSE-ENV note qu'au stade du DDAC, l'Andra ne classe plus ces situations de forages intrusifs selon une probabilité d'occurrence comme au stade du DOS [14], conformément aux préconisations internationales (cf. chapitre 6.3, [105]) et à la recommandation formulée par le groupe d'experts réunis par l'AIEA en 2016 [70].

PSE-ENV souligne que la prise en compte, dans les scénarios précités, d'un dysfonctionnement partiel ou total de tout ou partie des scellements, qui sont encore au stade des principes de conception dans le DDAC (cf. expertise GP1), intègre bien les incertitudes liées à leur capacité à assurer leur fonction de sûreté. De la même manière, les scénarios postulant une perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA permettent de couvrir les incertitudes sur les vitesses de corrosion de ces conteneurs (cf. chapitre 3.1 du présent rapport). A cet égard, PSE-ENV estime, comme au stade du DOS, qu'il pourrait être opportun que l'Andra considère des colis de stockage HA défectueux dans le SEN, comme suggéré par le groupe d'experts réunis par l'AIEA lors de la revue effectuée en 2016 [70]. Par ailleurs, PSE-ENV estime satisfaisant, au stade du DDAC, la prise en compte plus large par l'Andra de scénarios *What-if* qui intègrent, d'une part, via le scénario d'effondrement, des incertitudes liées à la phase d'exploitation (défaut de soutènement), d'autre part, via le scénario de discontinuité non détectée au sein du COx, des incertitudes liées à la caractérisation géologique du site ou à son évolution géodynamique. Enfin, les SIHI viennent compléter cette sélection de scénarios en couvrant le risque d'intrusion humaine involontaire bien que la profondeur de l'implantation du stockage retenue par l'Andra permette d'isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines banales (cf. chapitre 4). **En conclusion, PSE-ENV estime que la sélection des scénarios d'évolution altérées, qui couvre bien les risques et les incertitudes identifiés, est globalement pertinente pour évaluer leurs conséquences sur la capacité de confinement du système de stockage et *in fine* éprouver sa robustesse.** L'étude de l'ensemble de ces scénarios et les évaluations de la performance de confinement à long terme du stockage associées font l'objet de l'examen de PSE-ENV dans les chapitres 6.1 à 6.3 du présent rapport.

5.3.3. Indicateurs de performance

Pour rappel (cf. chapitre 4), les évaluations quantitatives des scénarios d'évolution du stockage retenus par l'Andra, menées sur un million d'années, ont pour objectif [106][47] d'évaluer la performance du système de stockage en vue de retarder et limiter le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques vers la biosphère. Dans un second temps, l'Andra vérifie le respect des objectifs retenus pour la protection (cf. chapitre 4.3) sur la base des incidences sanitaires et environnementales déduites des scénarios d'évolution du stockage. L'Andra analyse ainsi le poids des différents composants du système de stockage, des paramètres et des processus physico-chimiques (tels que la rétention - précipitation/sorption, la diffusion, ou encore la convection) vis-à-vis du transfert des solutés (substances radioactives et toxiques chimiques) en son sein. Outre l'appréciation de la contribution des différents composants à la capacité de confinement du stockage, les enseignements tirés des résultats des évaluations quantitatives permettent à l'Andra de mettre en évidence les incertitudes les plus importantes au regard de la réalisation des fonctions de sûreté du stockage (cf. chapitre 4.2), afin notamment de définir d'éventuelles actions de recherche et développement visant à les réduire. A cette fin, l'Andra définit notamment les indicateurs de performance suivants, en lien avec les fonctions de sûreté du stockage [47] :

- les flux d'eau transitant dans les ouvrages et dans la formation géologique hôte ainsi que les ratios entre les flux convectifs et diffusifs de solutés. Selon l'Andra, ces indicateurs permettent d'apprécier la performance du système de stockage vis-à-vis de la fonction de sûreté « s'opposer à la circulation d'eau », en s'assurant que le transport est majoritairement diffusif via la formation géologique hôte ;
- les répartitions entre les quantités initiales de radionucléides et de substances toxiques chimiques dans les colis, et les quantités transitant via les ouvrages de stockage d'une part (voie « ouvrages » dans la suite du présent rapport) et via le milieu géologique d'autre part (voie « COx »). Ces indicateurs exprimés sous forme de pourcentages permettent d'apprécier l'éventuelle prédominance d'une de ces voies de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques, afin d'apprécier la performance du système de stockage vis-à-vis des fonctions « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser

dans les alvéoles » et « retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques relâchées depuis les alvéoles de stockage » ;

- les débits molaires ou d'activité de radionucléides et les débits massiques de substances toxiques chimiques à la sortie de chaque composant du système de stockage (colis, alvéole, scellements et formation hôte), ainsi que les débits maximums et leur période d'occurrence. Ces indicateurs permettent d'évaluer la fonction « retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques relâchés depuis les alvéoles de stockage ».

PSE-ENV convient que les indicateurs choisis par l'Andra, qui sont globalement identiques à ceux retenus au stade du DOS, permettent de quantifier la contribution des différents composants aux fonctions de sûreté retenues pour les différentes voies de transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques. Ainsi, PSE-ENV estime toujours que **ces indicateurs de performance sont pertinents pour l'évaluation quantitative des scénarios d'évolution du stockage.**

6. EVALUATION DE LA CAPACITE GLOBALE DE CONFINEMENT

Le présent chapitre porte sur l'évaluation quantitative réalisée par l'Andra au stade du DDAC de la capacité de confinement du stockage et de son impact sanitaire et à l'environnement après sa fermeture. L'évaluation réalisée sur la base des situations de référence et enveloppe du scénario d'évolution normale (SEN) est examinée par PSE-ENV au chapitre 6.1. Le chapitre 6.2 est dédié à l'examen des évaluations associées aux scénarios d'évolution altérée (SEA) et *What-if* relatifs à des dysfonctionnements de scellements ou de conteneurs de déchets HA, à une discontinuité non détectée dans le COx, ainsi qu'à un effondrement ou un abandon du stockage en phase d'exploitation. Enfin, dans le chapitre 6.3, PSE-ENV examine les scénarios d'intrusion humaine involontaire. Les tableaux en Annexe T5 du présent rapport récapitulent les impacts radiologiques calculés par l'Andra pour chacun de ces scénarios.

6.1. SCENARIO D'EVOLUTION NORMALE

PSE-ENV examine successivement ci-après les hypothèses retenues par l'Andra dans le cas du SEN pour définir la distribution de l'inventaire de référence dans les quartiers de stockage de l'architecture retenue au stade du DDAC décrite au chapitre 2, la conceptualisation de ce scénario, puis l'évaluation de la capacité globale de confinement du stockage (également nommée « performance » de confinement) et les impacts sanitaires et environnementaux pour les deux situations, de référence et enveloppe, du SEN.

6.1.1. Distribution de l'inventaire dans l'installation de stockage

S'agissant de l'inventaire radiologique à terminaison, l'Andra retient 144 radionucléides pour l'évaluation quantitative du SEN, en ne considérant que ceux dont la période est supérieure à 1000 ans (cf. liste des radionucléides, incluant les chaînes de filiations, en Annexe T6). Cet inventaire provient d'une agrégation des données des producteurs et intègre des marges en fonction du degré de connaissances attribué à chaque famille de colis [52][107]. Pour rappel, l'expertise réalisée par l'IRSN dans le cadre du GP1 conclut que cet inventaire radiologique est suffisant au stade du DDAC pour l'évaluation de l'impact radiologique de Cigéo. S'agissant de l'inventaire en substances toxiques chimiques à terminaison, l'Andra identifie 13 éléments et espèces chimiques²⁵ présentes dans les déchets MA-VL et HA [52]. Comme formulé à l'issue de l'expertise GP1, PSE-ENV estime que l'inventaire en substances toxiques chimiques de Cigéo établi par l'Andra constitue une première évaluation, utile pour les études d'impact de l'installation. PSE-ENV rappelle toutefois l'engagement 2024-E3 pris par l'Andra lors du GP1 [2] de présenter, avant l'enquête publique, un programme d'étude visant à consolider cet inventaire, afin de justifier son caractère raisonnablement enveloppe.

L'Andra retient un mode de distribution de l'inventaire radiologique à terminaison dans le quartier de stockage MA-VL qui vise à s'affranchir des incertitudes liées aux futures chroniques de livraison [101][47], en considérant un remplissage des alvéoles MA-VL par activité décroissante en iode 129 (isotope radioactif à vie longue de l'iode, noté ¹²⁹I dans la suite du présent rapport), d'une part depuis le fond du quartier, plus proche de la base des LSF en raison de la galerie de recoupe entre la galerie de retour d'air du demi-quartier nord et la ZSLT (cf. chapitre 2, Figure 4), vers son entrée, d'autre part depuis le fond de chacun des alvéoles. L'Andra a indiqué au cours de l'expertise que cette distribution des colis selon leur activité en ¹²⁹I conduirait à l'impact potentiel global le plus élevé dans les scénarios de dysfonctionnement des scellements (cf. chapitre 6.2) en favorisant le transfert par la « voie ouvrages » (galeries et LSF), en raison de sa demi-vie élevée, de sa forte mobilité et du fait qu'il figure parmi les trois contributeurs principaux à la dose aux exutoires. L'Andra a précisé qu'une distribution des colis dans le quartier de stockage MA-VL selon leur activité en sélénium 79 et chlore 36 (isotopes radioactifs à vie longue du sélénium et du chlore, notés respectivement ⁷⁹Se et ³⁶Cl dans la suite du présent rapport), autres espèces mobiles contributeurs principaux à la dose aux exutoires, ne modifierait pas significativement l'estimation de l'impact. En outre, l'Andra présente dans le DDAC une étude de sensibilité de la performance du stockage en termes de confinement à la distribution des colis dans le quartier de stockage MA-VL. Cette étude considère trois configurations supplémentaires de stockage des colis : (i) suivant la chronique prévisionnelle de livraison des colis, (ii) suivant une distribution homogène de l'inventaire radiologique en ¹²⁹I au sein du quartier ou encore (iii) par activité décroissante en ¹²⁹I depuis le fond du demi-quartier de stockage MA-VL le plus proche des LSF (via la

²⁵ Uranium, plomb, mercure, antimoine, cadmium, sélénium, arsenic, nickel, chrome, bore, béryllium, cyanure et amiante

galerie de recoupe, cf. *supra*), comme pour l'évaluation quantitative du SEN, mais suivant une répartition homogène de l'activité au sein de chaque alvéole. Les résultats de l'Andra montrent que la distribution de l'inventaire retenue conduit bien, dans les différents scénarios d'évolution évalués (notamment en situation enveloppe du SEN ou pour les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements), au transfert des solutés le plus important via la « voie ouvrages ». Au regard des conclusions de l'Andra et de ses propres modélisations présentées dans la suite du présent rapport, **PSE-ENV convient que le mode de distribution de l'inventaire piloté par l'¹²⁹I, utilisé pour la quartier de stockage MA-VL par l'Andra dans ses évaluations, favorise les transferts de ce radionucléide via les ouvrages et confère ainsi un caractère majorant à l'évaluation de l'impact radiologique du stockage, ce qui est satisfaisant au regard des incertitudes liées aux chroniques de mise en stockage des colis.**

Pour ce qui concerne les colis HA, l'Andra retient une distribution de l'inventaire radiologique dans le quartier de stockage HA cohérente avec les chroniques de livraison des familles de colis HA, établies en lien avec le dimensionnement thermique de ce quartier. PSE-ENV rappelle qu'au stade du DOS, l'Andra considérait de façon conservatrice pour les sous-quartiers comportant plusieurs familles de colis une redistribution de ces familles par activité décroissante en ¹²⁹I, depuis l'entrée du sous-quartier (i.e. proximité des galeries de liaison) vers le fond [14]. A cet égard, l'Andra souligne que la distribution de l'inventaire radiologique dans ce quartier a une influence négligeable sur les débits molaires par la « voie ouvrages », ce quartier étant situé en aval hydraulique par rapport aux LSF, **ce dont convient PSE-ENV. Aussi, PSE-ENV estime que le mode de distribution de l'inventaire radiologique dans le quartier de stockage HA, retenu par l'Andra au stade du DDAC, ne conduit pas à sous-estimer l'impact du stockage.**

Enfin, l'Andra retient une distribution de l'inventaire en substances toxiques chimiques cohérente avec la répartition des familles de colis retenue pour l'inventaire radiologique, à savoir une répartition des familles de colis MA-VL pilotée par l'¹²⁹I et des familles de colis HA correspondant à leurs chroniques prévisionnelles de livraison. L'Andra n'a ainsi pas cherché de distribution de l'inventaire en substances toxiques chimiques maximisant leur impact. Néanmoins, l'Andra a indiqué au cours de l'expertise que leur répartition n'a pas d'incidence en SEN et en SEA sur la voie de transfert par la couche du COx, voie qui détermine l'impact de ces substances aux exutoires, selon les résultats des évaluations de l'Andra présentés au chapitre 6.1.3 du présent rapport. **PSE-ENV convient que la distribution dans le stockage de l'inventaire en substances toxiques chimiques retenue par l'Andra ne devrait pas remettre en cause les conclusions des évaluations d'impact chimique présentées par l'Andra dans le DDAC.**

6.1.2. Conceptualisation du SEN

L'Andra présente dans le DDAC [47] la conceptualisation des situations de référence et enveloppe du SEN, qui comprend la couche du COx, les alvéoles de stockage MA-VL et HA remplies et fermées, les galeries et les LSF (descenderies, puits) avec leurs remblais et scellements, les formations encaissantes jusqu'à leurs exutoires. Comme mentionné au chapitre 4, l'ensemble des hypothèses et des données associées aux deux situations du SEN [47] a été défini par l'Andra sur la base d'une ARI [68], fondée sur les connaissances du site de MHM et sur l'évolution des différents composants du stockage. Ces éléments ont été expertisés par l'IRSN dans le cadre du GP1 [2]. Les valeurs des paramètres hydrauliques pour les composants du système de stockage en situations de référence et enveloppe du SEN, ainsi que celles des paramètres de transfert des solutés mobiles (¹²⁹I, ³⁶Cl et ⁷⁹Se), sont synthétisées dans les tableaux en Annexe T7 du présent rapport.

D'une manière générale, PSE-ENV constate que la conceptualisation des situations de référence et enveloppe du SEN demeure globalement cohérente avec celle présentée au stade du DOS [36]. Afin d'explicitier la distinction entre les situations de référence et enveloppe du SEN et d'apprécier la pertinence des hypothèses et des données retenues par l'Andra pour leur conceptualisation au regard des conclusions du GP1 sur l'évolution des différents composants de stockage, PSE-ENV détaille ci-après certains éléments d'intérêt qui fondent la conceptualisation de ces deux situations et sont susceptibles d'influer les résultats des évaluations de performance de confinement du stockage présentées dans la suite du présent rapport. A cet égard, PSE-ENV rappelle, comme indiqué au chapitre 5.3.1, que la situation enveloppe du SEN constitue un domaine d'évolution prévisible étendu du système de stockage, dont le caractère pénalisant conduit à majorer de manière probablement excessive la quantité et la vitesse de transfert des radionucléides.

L'Andra retient une profondeur d'implantation dite « réaliste » des ouvrages au sein de la couche du COx [46] en situation de référence, de telle sorte que les gardes inférieures et supérieures sont déduites à partir des cotes locales du toit et du mur de la couche de la roche hôte et intègrent le pendage et les variations d'épaisseurs de celle-ci. Ainsi, au droit du quartier de stockage HA, l'épaisseur de garde varie entre 60 et 100 mètres pour la garde supérieure, et entre 85 et 60 mètres pour la garde inférieure, du sud-ouest vers le nord-est de la ZIOS. Au droit du quartier de stockage MA-VL, l'épaisseur de garde d'argilites (supérieure et inférieure) est d'environ 60 mètres, en déduisant la dimension des alvéoles MA-VL ainsi que celle des zones endommagées mécaniquement autour de ces dernières. En situation enveloppe, l'Andra positionne le stockage de façon à préserver une épaisseur de garde de COx sain égale au minimum spécifié dans les exigences applicables au centre de stockage Cigéo, soit 50 mètres [47]. Ainsi, deux configurations possibles du stockage sont considérées par l'Andra en situation enveloppe : l'installation est localisée soit à 50 m du toit (position « haute »), soit à 50 m du mur (position « basse ») de la formation du COx. **PSE-ENV estime que cela est satisfaisant sur le plan du principe.**

S'agissant des propriétés hydrauliques du COx, PSE-ENV rappelle [2] d'une part, que les valeurs de conductivité hydraulique du COx sain retenues à l'échelle du site par l'Andra dans le DDAC ont été estimées à partir d'une approche probabiliste, basée sur 252 mesures de conductivité hydraulique acquises dans le plan de la stratification sur échantillons et par tests hydrauliques [108]. Ces valeurs sont évaluées à 1.10^{-13} m/s et 3.10^{-13} m/s, respectivement pour les conductivités hydrauliques horizontale et verticale (K_h et K_v). L'IRSN considère, à l'issue de l'expertise du GP1 [2], que l'approche probabiliste retenue par l'Andra pour évaluer ces valeurs n'était pas suffisamment prudente, en particulier pour définir la valeur enveloppe. En effet, l'IRSN relève que l'approche probabiliste, pour la situation enveloppe, conduit à des valeurs sensiblement différentes de celles obtenues par une approche statistique classique, dont les résultats sont plus conformes à ceux des essais hydrauliques *in situ* (10^{-14} m/s < K < 10^{-12} m/s), et par conséquent plus représentatifs de la formation en grand du COx [109][110][111]. D'autre part, l'Andra observe l'existence, au sein de la couche argileuse du COx, d'une surpression interstitielle par rapport au gradient hydrostatique établi par les formations aquifères encaissantes, atteignant une valeur maximale d'environ 50 m (en équivalent hauteur d'eau). Cette surpression atteint 0,5 MPa au niveau du LSMHM [112]. L'Andra privilégie, comme au stade du DOS, des causes chémio-hydro-mécaniques pour expliquer cette surpression. Sur cette base, l'Andra ne tient pas compte des profils de surpressions mesurées dans le COx dans la conceptualisation des scénarios d'évolution en support à son évaluation de sûreté. Dans le cadre de l'expertise GP1 [2], PSE-ENV estime qu'en l'absence d'explication convaincante sur l'origine de cette surpression, il est nécessaire d'évaluer le flux d'eau maximal qu'elle pourrait générer, ainsi que son influence potentielle sur le transfert des radionucléides, au sein de la roche hôte.

Ces deux points ont conduit l'Andra à formuler l'engagement 2024-E10 à l'issue du GP1 [2] de réaliser, pour le GP3, en marge des SEN et SEA, une étude de robustesse de la performance globale du système de stockage en intégrant simultanément, (i) la conductivité hydraulique enveloppe du COx en grand, déduite de l'analyse statistique des mesures, soit une valeur de 10^{-12} m/s, et (ii) un gradient hydraulique vertical tenant compte d'une surpression d'origine hydraulique, soit une valeur de 0,5 m/m. A cet égard, PSE-ENV retient ces mêmes paramètres dans ses propres simulations pour la situation enveloppe du SEN (et les autres scénarios qui se basent sur cette situation). La réponse apportée par l'Andra à cet engagement est examinée dans la suite du présent chapitre.

S'agissant des hypothèses associées aux alvéoles de stockage et à la ZFC, communes aux deux situations du SEN, PSE-ENV constate que les volumes situés à l'intérieur des alvéoles HA (colis de stockage, jeux inter-colis, chemisage et bouchon de fermeture) et MA-VL (à l'intrados du revêtement/soutènement) sont représentés par l'Andra comme des milieux poreux continus homogènes, entièrement saturés en eau dès la fermeture du stockage. À cet égard, PSE-ENV considère, compte tenu des résultats de simulation du transitoire hydraulique-gaz à l'échelle de l'installation analysés dans le cadre du GP1 [2] et des éléments présentés par l'Andra relatifs à la migration des radionucléides gazeux au cours de ce transitoire [113], que l'hypothèse de saturation complète du stockage à sa fermeture est effectivement pénalisante au regard des mécanismes de transfert de la majorité des radionucléides, depuis les colis vers les formations encaissantes. Les propriétés hydrauliques et de transport de ces milieux poreux homogènes sont définies, de manière pénalisante, équivalentes à celles d'un sable (coefficient de diffusion de pore égal à celui de l'eau et conductivité hydraulique (K) de 10^{-6} m/s) [47]. En outre, l'Andra ne considère pas de mécanisme de rétention chimique des solutés au sein de ces alvéoles (coefficient de

partage (Kd) nul et solubilité (s) infinie) [114]. PSE-ENV relève également qu'en situation enveloppe, la zone du COx perturbée mécaniquement par l'excavation (ZFC) et chimiquement par la perturbation alcaline résultant de l'hydrolyse des matériaux cimentaires (revêtement/soutènement), au droit des alvéoles et des galeries, est représentée par l'Andra avec les mêmes propriétés hydrauliques, de transport et de rétention que la partie utile des alvéoles. La conductivité hydraulique est ainsi supérieure de deux ordres de grandeurs à celle retenue au stade du DOS (10^{-8} m/s) [115]. En situation de référence du SEN, cette conductivité hydraulique est identique entre les deux dossiers (10^{-9} m/s). Enfin, PSE-ENV relève que cette approche est d'autant plus pénalisante que cette représentation est maintenue tout au long de l'évaluation (depuis la fermeture de l'installation jusqu'à un million d'années), sans considérer d'auto-colmatage de la roche hôte endommagée. **Aussi, PSE-ENV estime que les hypothèses retenues par l'Andra au sein des alvéoles de stockage et autour de tous les ouvrages (alvéoles et galeries) dans les deux situations du SEN sont particulièrement pénalisantes vis-à-vis du transfert des solutés, depuis les colis jusque dans la roche hôte.**

S'agissant des conteneurs de stockage HA, l'Andra considère, en situation de référence du SEN, la dégradation des matrices vitreuses et le début du relâchement des substances contenues suite à la perte d'étanchéité de ces conteneurs. Pour évaluer cette durée d'étanchéité, l'Andra retient une valeur de la vitesse de corrosion de $10 \mu\text{m}/\text{an}$ et une épaisseur critique de flambement de 15 mm [116]. Ainsi, cette durée d'étanchéité après mise en stockage est estimée à 3800 ans pour les colis HA1 et HA2, ainsi que pour certains colis²⁶ HA0 et MA-VL 6, tandis qu'elle est estimée à 550 ans pour les autres colis²⁷ HA0 et MA-VL 6. En situation enveloppe, l'Andra considère les durées minimales requises d'étanchéité des conteneurs, de 350 à 500 ans, permettant le respect de l'exigence de décroissance des radionucléides à vie courte entre la mise en stockage et le contact de la matrice vitrifiée avec l'eau [47]. Pour rappel, cette exigence vise à couvrir les incertitudes liées à l'altération de la matrice vitreuse et au comportement des radionucléides au contact de l'eau, lorsque la température du verre est supérieure à 70°C . De plus, PSE-ENV rappelle que le groupe d'experts réunis par l'AIEA lors de la revue effectuée à l'automne 2016 [70] s'interrogeait sur **l'opportunité de considérer une défaillance prématurée de colis HA dans le SEN, en raison des incertitudes résiduelles sur les conditions d'environnement et au vu du nombre important de colis HA** qui rend probable une perte d'étanchéité prématurée de certains d'entre eux. Ce point était également soulevé par l'IRSN lors de l'examen du DOS [36]. **PSE-ENV constate toutefois, comme au stade du DOS, que les conséquences d'une défaillance prématurée de tout ou partie des conteneurs de la zone HA sont évaluées par l'Andra au travers d'un ensemble de scénarios SEA et *What-if*, ce qui permet d'apprécier l'influence de la durée d'étanchéité du conteneur HA sur l'impact du stockage après sa fermeture (cf. chapitre 6.2).**

S'agissant des scellements, l'Andra retient, pour la situation enveloppe du SEN, une performance hydraulique pour les noyaux argileux correspondant à l'exigence spécifiée, à savoir une conductivité hydraulique inférieure ou égale à 10^{-11} m/s [117]. Pour la situation de référence du SEN, l'Andra considère une conductivité hydraulique de 10^{-12} m/s. PSE-ENV rappelle [2] que les concepts des scellements sont encore au stade des principes de conception, avec pour composant principal un noyau argileux dont la composition exacte reste à définir. La mise en place de démonstrateurs de scellement de descenderie et de scellement de galerie est prévue dès le début de la construction de Cigéo pour démontrer l'atteinte de leurs performances. L'Andra s'est ainsi engagée (2024-E-15), à l'issue du GP1, à transmettre, en vue du bilan de la phase industrielle pilote, une synthèse des résultats issus notamment de ces démonstrateurs *in situ* afin de consolider le concept de référence complet pour chaque type de scellements. Bien que la notion d'exigences spécifiées applicables soit pertinente concernant l'architecture globale du stockage (par exemple l'épaisseur d'argilites saines entre les ouvrages et les formations encaissantes, ou encore la distance entre les LSF et les quartiers de stockage), PSE-ENV considère, comme au stade du DOS [36], que cette notion ne devrait pas être appliquée pour caractériser un composant du stockage remplissant une fonction de sûreté sur le long terme dont la démonstration de la performance n'a pas été pleinement apportée. **Aussi, PSE-ENV estime que la combinaison des deux situations du SEN (référence et enveloppe) ne permet pas d'explorer l'influence des incertitudes existantes liées aux performances des scellements. PSE-ENV relève toutefois que les conséquences d'un dysfonctionnement partiel ou total des scellements**

²⁶ Certains conteneurs de stockage des colis de déchets MA-VL 6 vitrifiés et HA0 sont co-stockés en intercalaires dans le quartier de stockage HA1.

²⁷ Conteneurs AVM.

sur la performance globale de confinement de Cigéo sont évaluées par l'Andra au travers d'un ensemble de scénarios SEA et *What-if* (cf. chapitre 6.2.1).

Enfin, s'agissant de la conceptualisation des exutoires, l'Andra retient, pour la situation de référence, deux exutoires de type pompage, l'un dans les calcaires du Barrois après un transfert des solutés par diffusion verticale ascendante depuis la couche du COx, l'autre dans les calcaires du Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse (ZFD) après un transfert latéral sous la couche du COx. Pour la situation enveloppe, l'Andra retient des exutoires de type pompage dans les calcaires du Barrois, dans l'Oxfordien calcaire au niveau de la ZFD et dans le Dogger au niveau de la ZFD, ainsi qu'un exutoire rivière au niveau de l'Ornain après mise à affleurement de l'Oxfordien par érosion. Les deux exutoires au niveau de l'Oxfordien retenus dans le DDAC pour la situation enveloppe du SEN résultent d'une part d'une amélioration par l'Andra de la représentativité du modèle hydrogéologique, en réponse à la demande ASN [38], d'autre part de l'étude, conformément à son engagement pris à l'issue de l'expertise du DOS [36], d'une situation enveloppe de l'effet de l'évolution géoprospective vis-à-vis des écoulements dans les encaissants, avec notamment la prise en compte dans le SEN d'un exutoire au niveau de la rivière Ornain. PSE-ENV rappelle (cf. GP1, [2]) que la prise en compte de ces exutoires permet, contrairement aux évaluations menées au stade du DOS, de tenir compte des incertitudes associées aux vitesses d'écoulement dans l'Oxfordien et aux différents modèles de surrection tectonique, **ce qui est satisfaisant**.

6.1.3. Enseignements des évaluations de performance et d'impact

Dans ce chapitre, PSE-ENV analyse l'évaluation quantitative présentée par l'Andra dans le DDAC pour les situations de référence et enveloppe du SEN, en termes de capacité globale de confinement du stockage ainsi que d'impacts sanitaires et environnementaux.

6.1.3.1. Evaluation de la performance du stockage

PSE-ENV examine en premier lieu le transfert de l'ensemble des radionucléides, avant de centrer son analyse sur le transfert des trois espèces les plus mobiles, identifiées comme contribuant de manière prépondérante à l'impact radiologique. La forme chimique du sélénium et le transfert des solutés dans les encaissants font ensuite l'objet de points particuliers.

Transfert de l'ensemble des radionucléides

L'Andra présente les débits molaires, supérieurs à 10^{-10} mol/an, estimés en sortie de la couche du COx pour la situation de référence et la situation enveloppe (Figure 16). Pour la situation de référence, l'Andra observe que les débits molaires au niveau du toit sont quasi-similaires à ceux au niveau du mur, en cohérence avec la profondeur d'implantation réaliste du stockage dans la couche du COx.

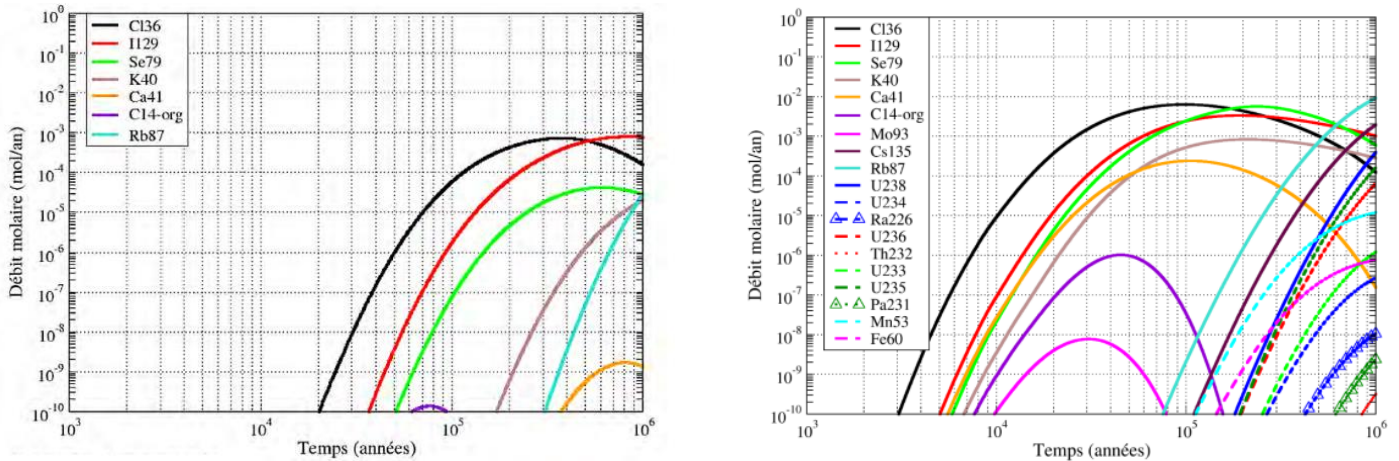


Figure 16 : SEN en situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) - débits molaires au cours du temps au toit du COx pour les radionucléides dont le débit est supérieur à 10^{-10} mol/an ([47], modifiée au cours de l'expertise [118]).

Pour la situation de référence, PSE-ENV convient que la plupart des radionucléides sont soit retardés par sorption et/ou précipitation dans les argilites du COx, soit atténués par décroissance compte tenu de leur faible période radioactive au regard des temps de transfert dans la roche hôte. PSE-ENV constate, comme au stade du DOS, que l' ^{129}I et le ^{36}Cl , radionucléides à vie longue, mobiles et solubles, sont les principaux contributeurs au débit molaire au niveau du toit du COx. Le ^{79}Se constitue également un des contributeurs principaux. Sa contribution aux débits molaires selon sa spéciation est examinée *infra* en lien avec l'engagement 2017-E-66 pris par l'Andra à l'issue de l'expertise du DOS. Les caractéristiques du calcium 41 (^{41}Ca), rubidium 87 (^{87}Rb) et potassium 40 (^{40}K), radionucléides à vie longue faiblement sorbés dans les ouvrages cimentaires et les argilites, favorisent également leur transfert hors du COx.

Pour la situation enveloppe, PSE-ENV relève que davantage de radionucléides atteignent le toit du COx sur la période d'un million d'années. La majorité de ces radionucléides possède une demi-vie longue et des propriétés de rétention conservatrices leur sont attribuées dans les différents composants. Les contributeurs principaux aux débits molaires demeurent le ^{79}Se , le ^{36}Cl et ^{129}I , mais le ^{87}Rb est désormais le radionucléide affichant le débit molaire maximum (atteint à un million d'années). A cet égard, PSE-ENV observe, sur la base de ses propres simulations présentées en Annexe T8 au présent rapport, que la prise en compte de valeurs plus pénalisantes pour la conductivité hydraulique et le gradient hydraulique vertical du COx sain conduit à des résultats du même ordre de grandeur en termes de maxima de débit molaire par rapport à ceux présentés par l'Andra, hormis pour les espèces à demi-vie « courte », comme le ^{14}C (5730 ans) et le ^{93}Mo (environ 4000 ans).

L'Andra considère l'hypothèse d'un état initial saturé du stockage après sa fermeture définitive pour la simulation des transferts de tous les solutés (radionucléides et substances toxiques chimiques) vers les exutoires. L'Andra a néanmoins fourni une évaluation de la migration en milieu diphasique du ^{14}C , depuis les colis de stockage MA-VL jusqu'en sortie du COx, en supposant que seul ce radionucléide se trouve sous forme gazeuse en quantité significative, **ce dont PSE-ENV convient**. L'Andra estime que le transitoire hydraulique-gaz favorise le transfert du ^{14}C via la « voie ouvrages », avec un pic de débit molaire en sortie des LSF de l'ordre de quelques dixièmes de moles par an, survenant environ 5 000 ans après la fermeture. PSE-ENV constate ainsi que ce pic est supérieur de plusieurs ordres de grandeur au pic en sortie du COx calculé par l'Andra en conditions saturées (de l'ordre de

10^{-7} mol/an, cf. Figure 16). Par conséquent, PSE-ENV relève que, pour le ^{14}C , l'hypothèse d'un état saturé n'est pas pénalisante vis-à-vis de son transfert au sein du système de stockage. Toutefois, PSE-ENV estime, au regard de la demi-vie du ^{14}C , que son temps de transfert dans les formations encaissantes devrait contribuer à limiter son impact aux exutoires. Il importe donc de confirmer l'absence d'impact significatif associé à ce radionucléide. Ainsi, **PSE-ENV estime que l'Andra devra évaluer, pour la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique**, la contribution à la dose aux exutoires du ^{14}C présent sous forme gazeuse dans le stockage pendant le transitoire hydraulique-gaz.

Ce point fait l'objet de l'**engagement 2025-E4** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. PSE-ENV estime que cet engagement est satisfaisant.

Transfert des radionucléides les plus mobiles

Pour les trois radionucléides les plus mobiles, à savoir ^{129}I , ^{36}Cl et ^{79}Se , l'Andra présente dans le dossier de DDAC les débits molaires en sortie du COx, par la voie « ouvrages » (cinq puits présentant une section cumulée d'environ 50 m^2) et par la voie « COx » (surface du toit ou du mur du COx par laquelle migrent les radionucléides vers les formations encaissantes, l'installation de stockage s'étendant sur près de 15 km^2), ainsi que les débits molaires cumulés à 1 million d'années.

Pour la situation de référence, l'Andra observe que les débits molaires maximaux estimés au toit et au mur du COx, de l'ordre de 10^{-3} mol/an pour l' ^{129}I et le ^{36}Cl et de 10^{-4} mol/an pour le ^{79}Se , sont supérieurs de plusieurs ordres de grandeur aux débits observés en sortie des LSF (e.g. débit maximum de 2.10^{-10} mol/an pour l' ^{129}I). En outre, les simulations de l'Andra sur un million d'années montrent que les quantités estimées en sortie du COx d' ^{129}I , de ^{36}Cl et de ^{79}Se représentent respectivement environ 23%, 13% et 0,4% de la quantité initiale stockée, avec des contributions similaires des deux zones de stockage (MA-VL et HA). En comparaison, les quantités d' ^{129}I , de ^{36}Cl et de ^{79}Se estimées à la sortie des LSF en représentent respectivement $<10^{-6}\%$, $<10^{-6}\%$ et $<10^{-8}\%$. PSE-ENV relève que, dans cette situation, les débits molaires des radionucléides mobiles en sortie des LSF sont pilotés par le quartier pilote HA, malgré sa position en aval hydraulique des LSF, du fait de la courte distance qui le sépare de ces ouvrages. L'Andra indique que la faible circulation de l'eau dans les ouvrages (débit d'eau en sortie des LSF estimé à environ 1 L/an) traduit la faible perturbation hydraulique induite par l'aquifère de l'Oxfordien à travers les ouvrages des LSF du fait de l'efficacité de leurs scellements.

En situation enveloppe, deux configurations du stockage sont étudiées par l'Andra : le stockage est implanté avec une garde saine supérieure de 50 mètres ou avec une garde saine inférieure de 50 mètres (cf. chapitre 6.2). De manière générale, l'Andra indique que lorsque le stockage est en position basse dans le COx, les débits molaires maximaux ainsi que les quantités des espèces mobiles atteignant le mur du COx sont comparables à ceux estimés au niveau du toit quand le stockage est en position haute. La légère différence observée en sortie du COx est attribuée au gradient de charge vertical plus faible lorsque le stockage est en position basse. L'Andra observe que les débits molaires maximaux en sortie du COx, de l'ordre de 3.10^{-3} mol/an pour l' ^{129}I et de 6.10^{-3} mol/an pour le ^{36}Cl et le ^{79}Se , sont supérieurs de plusieurs ordres de grandeur aux débits observés en sortie des LSF : deux ordres de grandeur pour l' ^{129}I et quatre pour le ^{36}Cl et le ^{79}Se . Au cours de l'expertise, l'Andra a précisé à cet égard que le ^{36}Cl et le ^{79}Se possèdent une période radioactive comparable au temps de transfert dans les ouvrages, ce qui leur permet de bénéficier d'une décroissance radioactive supplémentaire par rapport à l' ^{129}I . Par ailleurs, les simulations de l'Andra sur un million d'années montrent que les quantités estimées en sortie du COx d' ^{129}I , de ^{36}Cl et de ^{79}Se représentent respectivement environ 61%, 36% et 22% de la quantité initiale stockée. En comparaison avec la situation de référence, les quantités cumulées sur un million d'années de ces trois espèces mobiles atteignant les formations encaissantes supérieures sont environ trois à quatre fois plus importantes pour l' ^{129}I et le ^{36}Cl , et cinquante fois plus importantes pour le ^{79}Se . Les quantités d' ^{129}I , de ^{36}Cl et de ^{79}Se estimées à la sortie des LSF représentent quant à elles respectivement 0,25%, 0,006% et 0,002% de la quantité initiale stockée. Par ailleurs, l'Andra estime le débit d'eau en sortie des LSF à 300 L/an. PSE-ENV relève que ce débit d'eau et les débits molaires précités sont pilotés par le quartier de stockage MA-VL, compte tenu :

- de sa position en amont hydraulique des puits vis-à-vis des écoulements, combinée au gradient de charge horizontal enveloppe ;

- des perméabilités du COx sain et endommagé, ainsi que du remblai, plus élevés qu'en situation de référence.

Sur la base de ses résultats en situation de référence et enveloppe du SEN, l'Andra conclut que la formation hôte constitue la principale voie de transfert pour tous les solutés, dont le régime est principalement diffusif. PSE-ENV obtient, par ses propres simulations, des résultats en situation de référence très proches de ceux de l'Andra pour les trois espèces mobiles, tant en ce qui concerne la valeur et la période d'occurrence du pic de débit molaire, que la fraction relâchée en sortie du COx. Concernant la situation enveloppe, PSE-ENV observe dans ses simulations (cf. Annexe T8) que les débits molaires maximaux et les quantités cumulées sur un million d'années des espèces mobiles en sortie du COx sont légèrement plus élevés (respectivement de l'ordre d'un facteur 2 et de 10%), compte tenu des hypothèses plus pénalisantes adoptées pour la conductivité hydraulique du COx sain et le gradient hydraulique vertical (cf. *supra*). L'évaluation présentée par l'Andra [119] en réponse à son engagement 2024-E10 pris à l'issue du GP1, dont les hypothèses sont identiques à celles de la situation enveloppe du SEN retenues par PSE-ENV, conduit à des fractions des inventaires en sortie du COx à un million d'années plus élevées que dans les simulations de PSE-ENV, ainsi qu'à un transfert par la voie « ouvrages » favorisé. La prédominance de la voie « COx » sur les transferts par rapport à la voie « ouvrages » reste toutefois vérifiée en considérant ces hypothèses plus pénalisantes, avec un écart minimal de l'ordre de deux ordres de grandeur entre ces deux voies, selon les résultats de l'Andra. Ainsi, comme souligné *supra*, les propriétés hydrauliques du site (tenant compte des incertitudes résiduelles) et l'efficacité des scellements permettent de limiter significativement les écoulements d'eau au sein du système de stockage et donc les transferts convectifs des solutés.

Ainsi, au regard des éléments présentés par l'Andra dans le DDAC et de ses propres estimations, **PSE-ENV convient de la prépondérance de la voie de transfert « COx » par rapport à la voie « ouvrages » pour le SEN. Ces éléments montrent en outre la robustesse du système de stockage en termes de performance de confinement lors de son évolution normale en regard des incertitudes prises en compte par l'Andra dans la situation enveloppe du SEN.**

Influence de la forme chimique du sélénium

A l'issue de l'expertise du DOS [36], l'IRSN soulignait que l'incertitude portant sur la forme chimique sous laquelle peut se trouver le sélénium exerce une influence significative sur son transfert au sein du système de stockage. Aussi, l'Andra s'était engagé (2017-E-66) à évaluer, dans le DDAC, l'impact radiologique du stockage à long terme en considérant la possibilité pour tout ou partie du ⁷⁹Se, suivant le type de déchets, d'être sous sa forme Se(+VI), soluble et mobile.

L'Andra présente ainsi dans le DDAC le relâchement du ⁷⁹Se au toit du COx en situations de référence et enveloppe du SEN, en fonction de sa spéciation et du quartier de stockage concerné (cf. Figure 17 ci-dessous). L'Andra retient pour le quartier de stockage MA-VL une valeur pénalisante de 100% de Se (+VI) pour les deux situations du SEN, et pour le quartier de stockage HA, une valeur de référence de 3% de Se (+VI) et une valeur enveloppe de 20% de Se (+VI). A cet égard, PSE-ENV rappelle qu'à l'issue du GP1 [2], l'IRSN estimait que la valeur de 3% de Se(+VI) retenue comme valeur de référence pourrait être sous-estimée. Néanmoins, la valeur de 20% retenue en situation enveloppe, qui n'appelait pas de commentaire particulier lors du GP1, permet d'encadrer l'estimation d'impact du sélénium de manière suffisante.

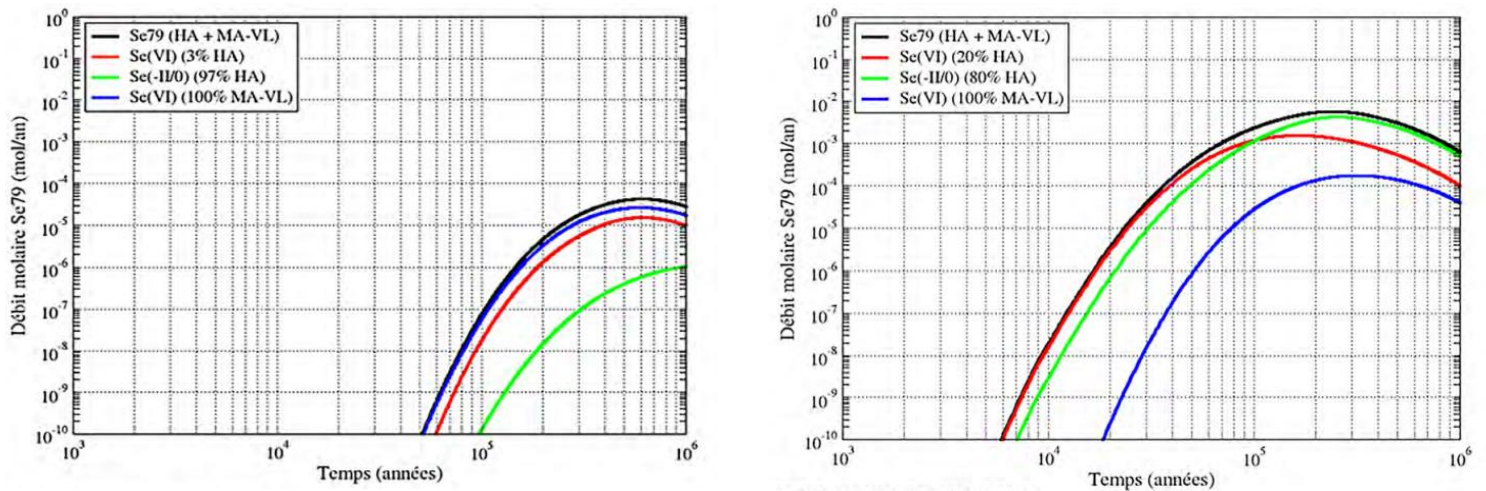


Figure 17 : SEN en situation de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) - Débits molaires au cours du temps au toit du COx pour le sélénium en fonction de sa spéciation [47].

En situation de référence, PSE-ENV note que le relâchement du sélénium est principalement piloté par le quartier de stockage MA-VL, où 100% du sélénium est présent sous la forme (+VI) [120]. Pour rappel, la faible valeur de solubilité retenue en référence (2.10^{-9} mol/L) a fait l'objet d'une remarque de la part de l'IRSN à l'issue de l'expertise GP1 [2], qui encourage l'Andra dans le sens des études engagées pour préciser les connaissances relatives au sélénium dans les conditions prévalant *in situ*. En situation enveloppe, le sélénium présent dans les colis du quartier de stockage HA contribue majoritairement au débit total au toit du COx, puis le sélénium sous sa forme (-II/0) devient le contributeur principal au-delà d'environ 100 000 ans, compte tenu d'une limite de solubilité beaucoup plus élevée qu'en situation de référence (10^{-6} mol/L). PSE-ENV observe que les débits molaires du sélénium présentés par l'Andra en fonction de sa spéciation et de la localisation du terme source sont cohérents avec ceux qu'il obtient dans ses propres simulations pour les deux situations du SEN (cf. Annexe T8). Par rapport au DOS, PSE-ENV souligne que la prise en compte par l'Andra d'une fraction du Se sous sa forme hexavalente entraîne une augmentation des pics de débit molaire du sélénium (total) de deux et un ordre de grandeur, respectivement pour les situations de référence et enveloppe. Selon PSE-ENV, cet impact significatif de la prise en compte de la forme du sélénium sur les résultats de l'évaluation de la performance de confinement du stockage, tant en situation de référence, qu'en situation enveloppe, justifie d'y prêter une attention particulière. A cet égard, PSE-ENV relève que les hypothèses retenues en situation de référence sur la forme et la solubilité du sélénium, dont la pertinence fait l'objet de l'expertise de l'IRSN lors du GP1, pourraient conduire à sous-évaluer son impact dans cette situation. Toutefois, PSE-ENV estime que l'intégration de ces incertitudes, de manière pénalisante (en particulier vis-à-vis de sa limite de solubilité) dans la situation enveloppe du SEN, permet de disposer d'une estimation majorée de son impact sur la performance de confinement du stockage pour un domaine d'évolution prévisible étendu, ce qui est satisfaisant en l'état actuel des connaissances. Comme indiqué au chapitre 5.3.1, les enseignements tirés de cette estimation majorée de l'impact du sélénium en situation enveloppe SEN devront notamment permettre à l'Andra d'identifier ou de conforter les besoins de consolidation des connaissances associées, dans l'objectif de réduire ces incertitudes et de disposer *in fine* de marges substantielles par rapport aux objectifs de protection. Ce point est discuté au chapitre 6.1.3.2 du présent rapport.

Transfert dans les formations encaissantes

En liminaire, PSE-ENV souligne que les vitesses de transfert dans les encaissants présentées par l'Andra sont plus élevées dans l'Oxfordien et plus faibles dans le Dogger par rapport à celles estimées au stade du DOS, en cohérence avec la mise à jour des modèles hydrologiques de site, examinés par l'IRSN au GP1 [2].

En situation de référence, les modélisations de l'Andra montrent que l'atténuation des débits molaires des radionucléides cumulés sur un million d'années est plus significative entre le toit du COx et l'exutoire du Barrois qu'entre le mur du COx et l'exutoire du Dogger (respectivement d'environ deux ordres de grandeur et un ordre de grandeur). Selon PSE-ENV, cette différence s'explique par le temps de transfert par diffusion plus long entre le

toit du COx et l'exutoire du Barrois, via le Kimmeridgien, que le temps de transfert par convection entre le mur du COx et l'exutoire du Dogger. En situation enveloppe, PSE-ENV rappelle que lorsque le stockage est en position haute, l'Andra considère trois exutoires ainsi qu'indiqué *supra*. Pour l'exutoire pompage dans le Barrois, l'Andra observe une atténuation des débits molaires des radionucléides cumulés sur un million d'années moins significative que dans la situation de référence du SEN, en raison des propriétés de transfert plus pénalisantes dans les encaissants supérieurs. L'Andra met en évidence une atténuation des débits molaires cumulés entre le toit du COx et l'exutoire rivière au niveau de l'Ornain plus limitée d'un facteur 2-3 par rapport à l'exutoire pompage dans le Barrois. Lorsque le stockage est en position basse, une réduction d'un facteur d'environ 5 est observée sur les quantités des radionucléides entre le mur du COx et l'exutoire du Dogger au niveau de la ZFD.

Ainsi, bien que l'Andra n'attribue pas de fonction de sûreté aux encaissants (cf. Chapitre 4.2), PSE-ENV souligne que leur rôle est significatif pour diminuer les débits molaires des espèces mobiles entre la roche hôte et les deux exutoires associés à la situation de référence du SEN. En outre, PSE-ENV rappelle qu'au stade du DOS, l'IRSN avait souligné que l'atténuation de la concentration des radionucléides entre la sortie du COx (roche hôte et LSF) et les exutoires était un indicateur pertinent pour évaluer les capacités de dispersion des aquifères, et regrette qu'il ne soit pas explicitement utilisé par l'Andra dans le DDAC, alors qu'il contribuerait à l'analyse de la capacité de dilution des encaissants jusqu'aux exutoires.

6.1.3.2. Evaluation de l'impact sanitaire et environnemental

Impact sanitaire radiologique

Comme décrit au chapitre 4.4, l'impact sur la population est évalué par l'Andra pour les personnes représentatives de chaque biosphère, exposées par ingestion d'eau de boisson, par consommation de denrées contaminées par l'irrigation et par l'abreuvement des animaux avec l'eau des exutoires, ainsi que par irradiation externe lors de leur présence sur des sols contaminés. Les voies d'exposition secondaires par inhalation de particules de sol mises en suspension et par ingestion de sol par inadvertance sont aussi prises en compte suivant les indications du guide méthodologique de « gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives » [121]. **PSE-ENV considère que cela est satisfaisant.** Les coefficients de dose utilisés sont ceux de l'arrêté du 1er septembre 2003 [122] (exposition interne) et du rapport Federal guidance 12 [123] (exposition externe). Ces publications ont été remplacées récemment par l'arrêté du 16 novembre 2023 [124] et par le rapport Federal guidance 15 [125] respectivement, sans que cela invalide à ce jour selon PSE-ENV les valeurs utilisées par l'Andra.

La relation entre l'activité volumique des différents radionucléides aux exutoires et l'impact radiologique à la population est calculée par l'Andra sous la forme de facteurs de conversion biosphère en Sv/an par Bq/L. Pour déterminer ces facteurs associés aux principaux radionucléides contributeurs que sont le ^{36}Cl , ^{129}I et le ^{79}Se , l'Andra utilise des modèles et des paramètres spécifiques basés sur la littérature scientifique récente. Les phénomènes d'accumulation dans le sol de certains éléments sont pris en compte par l'Andra en considérant l'activité dans le sol suite à une période de 10 000 ans de rejets constants, correspondant à l'atteinte d'un équilibre et une concentration d'activité maximale dans le sol pour les radionucléides susceptibles de se sorber dans le sol, ce qui est satisfaisant.

Concernant le SEN en situation de référence, la dose maximale déterminée par l'Andra est obtenue à l'exutoire du Dogger pour une biosphère chaude et le groupe de référence hypothétique « multi-activité », avec une valeur de $1,5 \cdot 10^{-3}$ mSv/an pour les enfants de 10 ans ou 1 an, pilotée par le ^{79}Se . Pour l'adulte, cette dose est de $5,2 \cdot 10^{-4}$ mSv/an, pilotée par ^{129}I et le ^{79}Se . En situation enveloppe, la dose maximale est de 0,25 mSv/an à l'exutoire de l'Oxfordien (ZFD) en biosphère chaude pour un enfant de 1 an et de $5,7 \cdot 10^{-2}$ mSv/an pour l'adulte. PSE-ENV relève que cette estimation enveloppe de la dose en SEN est pilotée principalement par le ^{79}Se . Conformément au guide n°1 de l'ASN (cf. chapitre 4.3) et à l'objectif de protection retenu, les impacts évalués pour le SEN sont comparés par l'Andra à la valeur de référence de 0,25 mSv/an. En outre, comme indiqué précédemment, en réponse à son engagement 2024-E10 pris à l'issue du GP1, l'Andra a conduit une évaluation prenant en compte des valeurs de gradient de charge hydraulique vertical et de conductivité hydraulique du COx visant à couvrir les incertitudes relevées par l'IRSN dans le cadre du GP1 (cf. chapitre 6.1.2). PSE-ENV relève que la prise en compte de telles valeurs, qui fait partie selon elle du SEN enveloppe en l'état des connaissances, conduit à une

augmentation significative des transferts des espèces mobiles vers les encaissements (d'un facteur de l'ordre de 4 sur le pic de débit molaire en sortie du COx). PSE-ENV note en particulier que les transferts de ^{36}Cl et du ^{79}Se , dont les demi-vies sont inférieures à celle de l' ^{129}I , sont davantage favorisés au sein de la roche hôte. A l'exutoire de l'Oxfordien, l'Andra détermine ainsi une dose maximale de 1 mSv/an (pour la biosphère chaude et un enfant de 1 an), pilotée par le ^{79}Se . PSE-ENV constate ainsi que les évaluations relatives à la situation enveloppe du SEN conduisent à des estimations d'incidences sanitaires maximales du même ordre de grandeur que l'objectif de protection associé au SEN (0,25 mSv/an). A cet égard, PSE-ENV rappelle (cf. chapitre 5.3.1) que la situation enveloppe du SEN, qui représente formellement la limite du domaine d'évolution normale du stockage, intègre néanmoins l'ensemble des incertitudes de manière conservatrice ainsi que des hypothèses pénalisantes. Outre ce cumul pénalisant, PSE-ENV rappelle également (cf. chapitre 4.4 relatif aux biosphères) que la dose annuelle reçue par un adulte, moyennée sur la durée de vie d'un individu, correspond davantage aux relâchements du stockage qui se produisent de manière stable sur des périodes beaucoup plus longues que la vie humaine. Enfin, l'état actuel des connaissances ne laisse pas supposer qu'un gain pourrait être tiré, en SEN dans lequel les fonctions de sûreté des composants du stockage sont satisfaites, de modifications de l'architecture. **Aussi, PSE-ENV estime que les incidences sanitaires maximales en situation enveloppe du SEN n'appellent pas de manière univoque un retour sur conception. Ces estimations traduisent en revanche le besoin de réduire les incertitudes liées aux connaissances relatives aux paramètres clés, telle que la solubilité du sélénium ou encore les propriétés hydrauliques de la roche hôte.** A cet égard, comme indiqué *supra*, PSE-ENV a pris acte lors de l'expertise GP1 des actions prévues par l'Andra afin d'approfondir la connaissance des paramètres de rétention du sélénium ou encore de consolider celles relatives à la conductivité hydraulique et à la suppression du COx sain au travers du programme ZBS (ZIOS borehole survey) [126] et lors des opérations de creusement.

Par ailleurs, PSE-ENV constate, dans le scénario enveloppe, que le ^{87}Rb et le ^{135}Cs sont les deux principaux radionucléides contribuant au débit molaire total en sortie du toit du COx, à un million d'années (cf. Figure 16). PSE-ENV relève cependant que ces deux radionucléides ne contribuent pas à la dose estimée aux exutoires par l'Andra. A cet égard, l'Andra précise que l'absence à l'exutoire d'une contribution à la dose du ^{87}Rb résulte de sa demi-vie importante ($4,9 \cdot 10^{10}$ ans)²⁸, ce dont convient PSE-ENV. S'agissant du ^{135}Cs , l'Andra a indiqué au cours de l'expertise ne pas intégrer ce radionucléide dans l'évaluation de la dose aux exutoires, dans la mesure où le pic de débit molaire du ^{135}Cs au toit du COx n'était pas atteint au bout d'un million d'années. L'Andra a toutefois présenté au cours de l'expertise l'estimation des doses au cours du temps jusqu'à un million d'années, avec intégration du ^{135}Cs aux exutoires du Barrois et de l'Oxfordien (ZFD), en biosphère chaude et pour la classe d'âge « enfant de 1 an ». L'Andra présente également les doses associées à l'ensemble des radionucléides dont la contribution excède 10^{-10} Sv/an. Ce résultat, illustré par la Figure 18 ci-dessous, montre que la dose reste pilotée par le ^{79}Se et que la contribution du ^{135}Cs à un million d'années est inférieure d'au moins trois ordres de grandeur à celle du ^{79}Se . **D'un point de vue formel, PSE-ENV considère toutefois que l'Andra devrait intégrer, dans ses futures évaluations d'impact à long terme, les doses au cours du temps de l'ensemble des radionucléides dont la contribution dépasse 10^{-10} Sv/an, seuil retenu par l'Andra pour représenter l'impact sanitaire sur une période d'un million d'années.**

²⁸ La période très longue du ^{87}Rb conduit à 'éteindre' le radionucléide entre le passage du débit molaire (mol/an) au toit du COx à la concentration d'activité à l'exutoire (Bq/L).

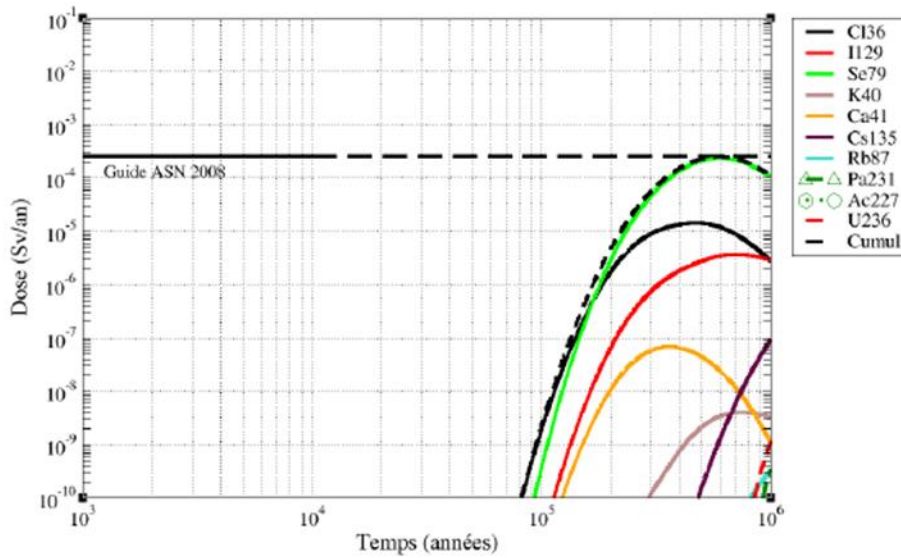


Figure 18 : Impact sanitaire radiologique maximum du SEN en situation enveloppe.

Enfin, au cours de l'expertise, l'Andra a apporté des éléments complémentaires relatifs à l'évaluation de l'impact du stockage au-delà d'un million d'années. L'Andra a ainsi estimé, pour une dizaine de radionucléides, les ordres de grandeur des temps d'atteinte des maxima de débits molaires après un million d'années au niveau du toit de la couche du COx. PSE-ENV constate que ces temps d'atteinte maximaux pour les radionucléides ^{238}U (et ses descendants), ^{236}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{135}Cs , ^{87}Rb , ^{60}Fe , ^{53}Mn et ^{10}Be , se situent entre environ 1 et 10 millions d'années. Pour d'autres radionucléides, comme ^{237}Np , ^{99}Tc , ^{126}Sn , ^{93}Zr et ^{107}Pd , ces temps se situent entre environ 10 et 80 millions d'années. L'Andra a également transmis une estimation des valeurs maximales des débits molaires au toit de la couche du COx, au-delà d'un million d'années, pour le ^{135}Cs ainsi que pour les isotopes de la chaîne de filiation 4N+2 (correspondant à la chaîne de l'uranium 238, avec les radionucléides de fin de chaîne ^{226}Ra et ^{210}Pb). Sans considérer le transfert dans les formations encaissantes supérieures et par conséquent l'atténuation associée, l'Andra estime que la dose maximale théorique associée au ^{135}Cs , en biosphère chaude et pour la classe d'âge « enfant de 1 an », serait atteinte vers trois millions d'années et serait au maximum de l'ordre de $3 \cdot 10^{-6}$ Sv/an, soit environ deux ordres de grandeur en dessous de la dose cumulée liée à l'ensemble des radionucléides avant un million d'années, pilotée par le ^{79}Se . De la même manière, l'Andra estime que la dose maximale théorique cumulée des radionucléides de la chaîne 4N+2 (^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra et ^{210}Pb) serait atteinte vers sept millions d'années et serait d'environ $2 \cdot 10^{-5}$ Sv/an, avec le ^{226}Ra comme contributeur principal (95% de la dose cumulée), soit environ un ordre de grandeur en dessous de la dose cumulée liée à l'ensemble des radionucléides avant un million d'années. En conclusion, l'Andra affirme que les doses maximales théoriques associées aux radionucléides dont le pic de débit molaire au toit du COx apparaît après un million d'années seraient significativement inférieures à l'impact maximal induit principalement par le ^{79}Se avant un million d'années. **PSE-ENV souligne les efforts de l'Andra pour vérifier que la dose au-delà d'un million d'années ne conduirait pas à un impact inacceptable pour la population, et convient du moindre impact des radionucléides dont l'occurrence aux exutoires interviendrait après un million d'années.**

Impact sanitaire chimique

L'Andra détermine des concentrations maximales calculées pour chacune des substances toxiques chimiques, vérifie que leur niveau est inférieur aux normes de potabilité, et conclut à l'absence de risque chimique du stockage pour les horizons temporels considérés. Si elle admet que la comparaison de la concentration d'une substance dans l'eau à la NQ correspondante est un élément pertinent de l'analyse (utile notamment dans le contexte de l'interprétation de l'état des milieux), PSE-ENV constate qu'en se limitant à cette comparaison, l'Andra ne va pas jusqu'à l'évaluation de l'impact identifié dans la démarche d'évaluation prospective du risque préconisée par l'INERIS [76] et notamment l'évaluation de la dispersion de la substance dans les milieux, l'évaluation de la concentration dans les matrices environnementales, l'évaluation des scénarios d'exposition des populations et le

calcul des quotients de danger ou des excès de risque individuels nécessaires pour objectiver cette évaluation. **Bien qu'un impact sanitaire faible soit attendu pour les substances toxiques chimiques en SEN, PSE-ENV estime que l'Andra devra réviser son évaluation de l'impact sanitaire des substances toxiques chimiques en vue de la mise à jour du DDAC avant l'enquête publique en tenant compte des recommandations de l'INERIS en la matière.** Ce point est repris dans le chapitre 6.2 du présent rapport.

En outre, il est attendu que l'Andra réviser son évaluation de l'impact chimique sanitaire en fonction des conclusions qu'elle tirera de la consolidation de l'inventaire des substances chimiques pour la mise à jour de la version préliminaire du rapport de sûreté, en lien avec son engagement 2024-E3 pris à l'issue de l'expertise du GP1 [2].

Impact environnemental

L'impact environnemental est évalué par l'Andra sur l'écosystème aquatique à l'exutoire de la rivière Ornain, seul exutoire naturel défini pour le SEN (pompages retenus pour les autres exutoires considérés).

S'agissant de l'impact radiologique sur la faune et la flore des rejets du stockage après la fin de la surveillance, l'Andra évalue les expositions par l'intermédiaire du calcul d'un indice de risque (cf. chapitre 4). Les valeurs des indices de risque pour les trois radionucléides mobiles et tous les organismes aquatiques considérés sont très inférieurs à 1 (de $1,53 \cdot 10^{-5}$ à $6,88 \cdot 10^{-8}$). S'agissant de l'impact des substances chimiques, l'Andra calcule, en comparant les PEC avec les PNEC, un indice de risque (cf. chapitre 4.3) très inférieur à 1 pour chacune des substances étudiées (de $9,43 \cdot 10^{-6}$ pour le sélénium à $8,85 \cdot 10^{-23}$ pour l'antimoine). **L'Andra conclut à l'absence d'impact écologique à long terme du projet Cigéo des substances radiologiques et toxiques chimiques considérées, ce dont PSE-ENV convient.**

6.2. SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION ALTÉRÉE ET *WHAT-IF*

Pour rappel, dans sa démarche d'évaluation de la sûreté de Cigéo après fermeture (cf. chapitre 4), l'Andra identifie les causes de dysfonctionnement d'un ou plusieurs composant(s) du stockage susceptible d'entraîner une dégradation significative de sa performance ou la perte d'une fonction de sûreté. Ces dégradations ou pertes de fonctions de sûreté sont traduites dans des scénarios d'évolution altérée (SEA) ou des scénarios *What-if*, selon leur vraisemblance. L'évaluation de la capacité globale de confinement du stockage (dites également « évaluation de performance ») et de l'impact sanitaire pour ces scénarios, présentée par l'Andra au stade du DDAC, est examinée par PSE-ENV dans le présent chapitre.

Pour ces différents SEA et scénarios *What-if*, seule la représentation du ou des composant(s) du stockage qui dysfonctionne(nt) diffère par rapport à la situation du SEN considérée (référence ou enveloppe - cf. chapitre 5.3) ; l'examen de la conceptualisation de ces scénarios portent donc principalement sur ce(s) composant(s). Il est en outre signalé que l'évaluation des doses aux exutoires n'est présentée par l'Andra que si les indicateurs de performance diffèrent significativement de ceux obtenus pour le SEN.

6.2.1. Dysfonctionnement des scellements

Comme décrit au chapitre 4 du présent rapport, l'Andra décline un ensemble de scénarios de dysfonctionnement de scellements, pour lesquels la fonction de sûreté associée « s'opposer à la circulation de l'eau » est dégradée. L'Andra estime que le dysfonctionnement impliquant l'interface entre le noyau argileux et la ZFC (argilites) relève de scénarios de type SEA, car les causes de ce dysfonctionnement sont selon elle peu vraisemblables. Le risque que le noyau argileux n'atteigne pas la performance hydraulique voulue, estimé très peu vraisemblable par l'Andra, est traité en scénarios *What-if*, dans lesquels est postulé le cumul des défaillances du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et la ZFC. L'Andra postule le dysfonctionnement des scellements dès la fermeture du stockage, en cohérence avec l'hypothèse de saturation du stockage dès la fermeture du stockage.

Sur cette base, l'Andra définit trois SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface entre le noyau argileux et les argilites, afin de couvrir les incertitudes relatives à l'évolution des argilites au droit du noyau des scellements, selon leur unité géologique d'appartenance (cf. GP1 ou chapitre 2) :

- SEA-1 de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond ;
- SEA-2 de dysfonctionnement des scellements des galeries ;
- SEA-3 de dysfonctionnement de tous les scellements de l'installation souterraine.

L'Andra définit également trois scénarios *What-if* de défaillance des scellements, par le noyau argileux et par l'interface entre le noyau argileux et les argilites :

- *What-if-1* de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond ;
- *What-if-2* de dysfonctionnement des scellements des galeries ;
- *What-if-3* de dysfonctionnement de tous les scellements de l'installation souterraine.

Conceptualisation des scénarios

L'Andra définit ces scénarios sur la base des hypothèses et des données de la situation de référence et de la situation enveloppe du SEN. Dans le cas des scénarios basés sur la situation enveloppe du SEN, l'Andra considère, afin de favoriser le transfert des radionucléides en sortie du toit du COx (voies « ouvrages » et « COx ») : (i) un stockage en position basse pour l'évaluation du débit molaire en sortie des LSF et (ii) un stockage en position haute pour celle du débit molaire en sortie de la voie « COx ». PSE-ENV convient, sur la base des résultats de ses propres modélisations, que le stockage en position basse avec un gradient hydraulique vertical de 0,21 m/m favorise le transfert via les LSF par rapport à un stockage en position haute.

PSE-ENV rappelle en premier lieu que, au stade du GP1, l'IRSN avait souligné les progrès réalisés par l'Andra pour comprendre et caractériser l'endommagement du COx, notamment en ce qui concerne les propriétés de la zone endommagée, telles que la conductivité hydraulique [2]. A cet égard, l'Andra avait confirmé les propriétés d'auto-colmatage des argilites de l'unité géologique UA, notamment à l'issue de l'expérimentation CDZ réalisée au LSMHM [127], en particulier sous l'effet de contraintes mécaniques conduisant à une diminution de la perméabilité dans la ZFC. A partir de ces éléments, les scénarios de dysfonctionnement des scellements postulés par l'Andra supposent que les conductivités hydrauliques de la ZFC induite par l'excavation, de l'interface argilites/noyau argileux (comprenant du béton ainsi qu'un matériau compressible dans le cas des scellements horizontaux des galeries) et du noyau argileux dans le cas des scénarios *What-if*, peuvent être de plusieurs ordres de grandeur plus élevées que celles retenues dans les situations du SEN (cf. Tableau 1 ci-dessous). L'Andra suppose également l'absence d'auto-colmatage au droit de l'ensemble des ouvrages implantés dans les unités géologiques UA (sections courantes de galerie, alvéoles de stockage, etc...) ou USC/UT (LSF), en fonction de la localisation des scellements qui dysfonctionnent. Pour représenter le dysfonctionnement du noyau argileux, l'Andra lui attribue les caractéristiques hydrauliques d'un remblai telles que définies dans le SEN, à savoir des perméabilités de 10^{-9} m/s en situation de référence et 10^{-8} m/s en situation enveloppe.

Tableau 1 : Valeurs des conductivités hydrauliques des argilites endommagées mécaniquement (ZFC) pour (a) les SEA « dysfonctionnement des scellements par l'interface » et (b) les scénarios What-if « dysfonctionnement des scellements par l'interface et le noyau argileux ». Les valeurs dégradées sont ombrées. [47], modifié au cours de l'expertise.

Unité	Zone d'argilites endommagées	Situation enveloppe				Situation de référence			
		SEN	SEA « Dysf. des scellements des LSF »	SEA « Dysf. des scellements des galeries »	SEA « Dysf. de tous les scellements »	SEN	SEA « Dysf. des scellements des LSF »	SEA « Dysf. des scellements des galeries »	SEA « Dysf. de tous les scellements »
UA	ZFC au droit des zones de dépose des scellements des galeries					10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹		
	ZFC au droit du revêtement laissé en place des scellements des galeries	5 × 10 ⁻²	5 × 10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²
	ZFC au droit du revêtement (hors scellements)	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²
	ZFD	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	N/A	N/A	N/A	N/A
USC/UT	ZFC au droit du noyau argileux des scellements des LSF	N/A	10 ⁻²	N/A	10 ⁻²	N/A	10 ⁻²	N/A	10 ⁻²
	ZFC au droit du revêtement (hors scellement)	N/A	10 ⁻²	N/A	10 ⁻²	N/A	10 ⁻²	N/A	10 ⁻²
	ZFD	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	N/A	N/A	N/A	N/A

(a)

Unité	Zone d'argilites endommagées	Situation enveloppe				Situation de référence			
		SEN	What-if « Dysf. des scellements des LSF »	What-if « Dysf. des scellements des galeries »	What-if « Dysf. de tous les scellements »	SEN	What-if « Dysf. des scellements des LSF »	What-if « Dysf. des scellements des galeries »	What-if « Dysf. de tous les scellements »
UA	ZFC au droit des zones de dépose des scellements des galeries					10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
	ZFC au droit du revêtement laissé en place des scellements des galeries	5 × 10 ⁻²	5 × 10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
	ZFC au droit du revêtement (hors scellements)	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
	ZFD	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	N/A	N/A	N/A	N/A
USC/UT	ZFC au droit du noyau argileux des scellements des LSF	N/A	10 ⁻²	N/A	10 ⁻²	N/A	10 ⁻⁷	N/A	10 ⁻⁷
	ZFC au droit du revêtement (hors scellements)	N/A	10 ⁻²	N/A	10 ⁻²	N/A	10 ⁻⁷	N/A	10 ⁻⁷
	ZFD	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	N/A	N/A	N/A	N/A

(b)

Les modalités de représentation des dysfonctionnements de scellements sont globalement similaires à celles définies dans le DOS. L'IRSN avait souligné à l'issue de l'expertise du GP1 [2] que les incertitudes sur les caractéristiques de la roche hôte, liées notamment à la variabilité latérale et verticale de leurs propriétés mécaniques et des contraintes tectoniques, devraient se traduire par la considération d'une gamme de valeurs de paramètres. PSE-ENV considère à cet égard que les conductivités hydrauliques des différentes ZFC retenues par l'Andra sont de nature à couvrir ces incertitudes, en particulier pour les scénarios basés sur la situation enveloppe du SEN (dégradation de plusieurs ordres de grandeur et absence d'auto-colmatage). Enfin, PSE-ENV convient du caractère pénalisant des caractéristiques du noyau argileux défaillant considérées dans les scénarios *What-if*, dont les perméabilités sont supposées égales à celles du remblai. **Ainsi, PSE-ENV estime que les valeurs de perméabilités dégradées assignées, d'une part aux argilites endommagées mécaniquement au droit des scellements pour les SEA et les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements, d'autre part au noyau argileux des scellements sont bien pénalisantes au regard de l'état des connaissances examinées dans le cadre du GP1.**

Evaluation du comportement hydraulique du stockage

L'Andra présente dans le DDAC les débits d'eau sortant par les LSF pour le SEN, les SEA et les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements, dans les situations de référence et enveloppe (cf. Tableau 2 *infra*). En termes de performance hydraulique du stockage, PSE-ENV relève que lorsque seuls les scellements des galeries dysfonctionnent (SEA-2, *What-if-2*), les débits d'eau en sortie des LSF restent identiques ou proches de ceux calculés en SEN. En revanche, PSE-ENV constate que la prise en compte d'une ZFC autour des scellements dysfonctionnant des LSF, telle que postulée par l'Andra dans les scénarios SEA-1 et SEA-3, peut conduire à une augmentation des débits d'eau en sortie des LSF jusqu'à deux ordres de grandeurs (jusqu'à quelques m³/an) par rapport au SEN. Le dysfonctionnement additionnel du noyau argileux des scellements des LSF (scénarios *What-if-1* et *What-if-3*) conduit à une augmentation supplémentaire d'environ un ordre de grandeur (quelques dizaines de m³/an). Sur la base de ses propres calculs, PSE-ENV observe un comportement hydraulique similaire pour ces scénarios.

Tableau 2 : Valeurs des débits d'eau sortant des LSF calculées par l'Andra pour le SEN, les SEA (a) et les scénarios *What-if* (b) de dysfonctionnement des scellements, dans les situations de référence et enveloppe [47].

	Scénario	SEN	SEA-1	SEA-2	SEA-3
Débit d'eau sortant des LSF (L.an-1)	Situation de référence	1	400	1	300
	Situation enveloppe	330	7300	450	8000

(a)

	Scénario	SEN	What-if-1	What-if-2	What-if-3
Débit d'eau sortant des LSF (L.an-1)	Situation de référence	1	3600	1	3200
	Situation enveloppe	330	43000	420	45000

(b)

De plus, l'Andra observe que la contribution hydraulique des quartiers de stockage HA aux débits en sortie des LSF est très faible, en raison de leur position en aval hydraulique des LSF. PSE-ENV convient, sur la base de ses propres modélisations, du comportement hydraulique observé par l'Andra. Son impact sur la performance de confinement est examiné dans la suite du présent chapitre.

Evaluation de la performance de confinement

L'Andra présente dans le DDAC les simulations du transfert dans le système de stockage des trois radionucléides mobiles (¹²⁹I, ⁷⁹Se et ³⁶Cl) et détaille en particulier le transfert de l'¹²⁹I, espèce la plus mobile. L'Andra présente ainsi les débits molaires au cours du temps de l'¹²⁹I sortant au toit du COx via les deux voies de transfert (« ouvrages » et « COx »), pour les SEA et les scénarios *What-if* basés sur les situations de référence et enveloppe du SEN (cf. Figure 19).

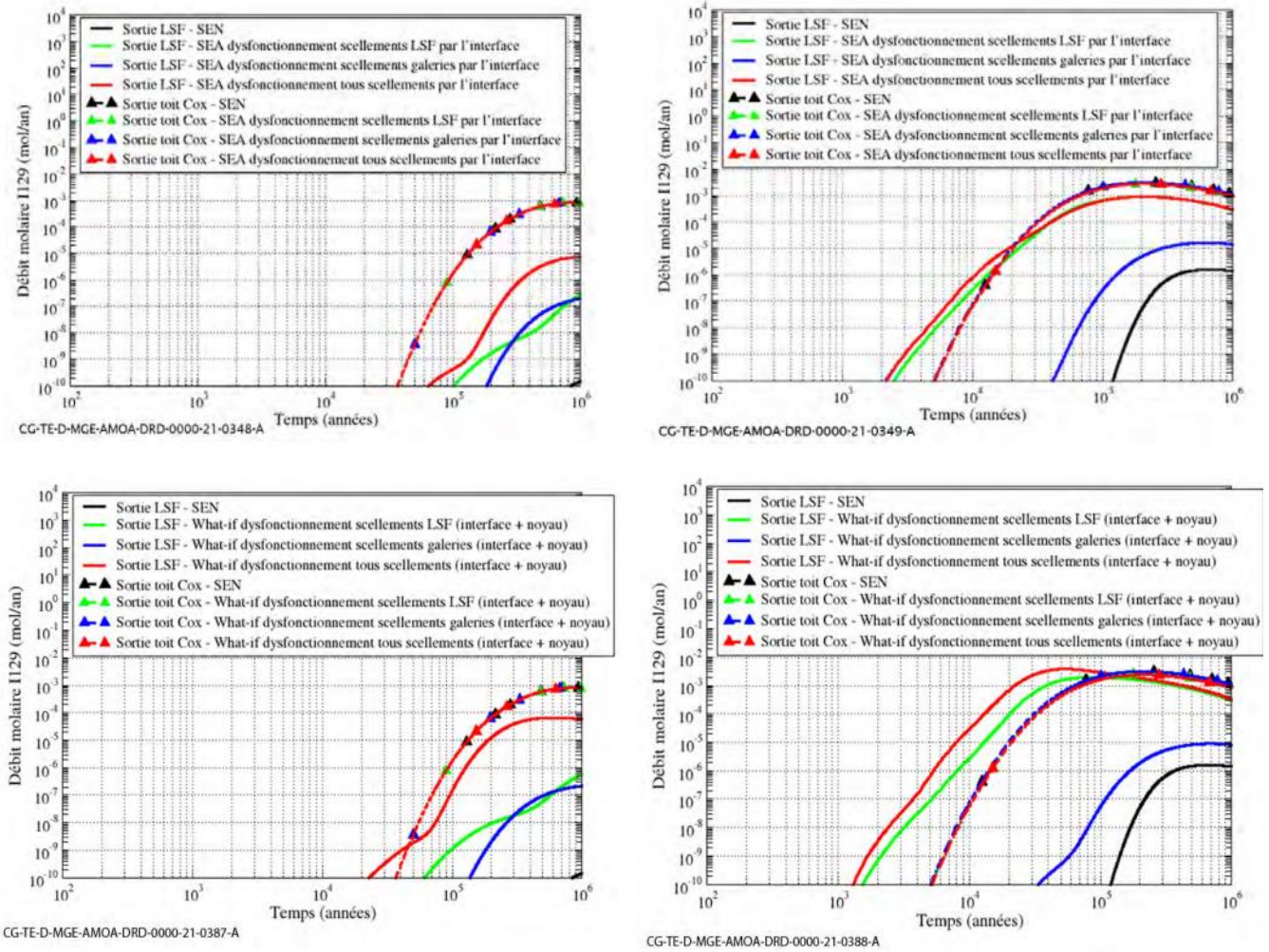


Figure 19 : SEN, SEA (en haut) et What-if (en bas) de dysfonctionnement des scellements – situations de référence (à gauche) et enveloppe (à droite) : débits molaires au cours du temps d'iode 129 sortant des LSF et au toit de la couche du COx calculés par l'Andra [47].

Pour ce qui concerne le transfert des radionucléides, l'Andra compare les résultats des SEA et les scénarios *What-if* et ceux du SEN et montre, d'une part que les débits molaires évalués au toit du COx sont tous équivalents, d'autre part que les débits molaires évalués en sortie des LSF sont supérieurs de 3 à 5 ordres de grandeur à ceux évalués pour la situation de référence du SEN. Les débits molaires évalués au cours du temps en sortie des LSF sont examinés ci-après pour les différents scénarios considérés.

L'Andra évalue l'influence des groupes de scellements des galeries et des groupes de scellements des LSF, pris isolément, au travers des SEA-1 et SEA-2 et des scénarios *What-if-1* et *What-if-2*, postulant le dysfonctionnement de l'un des deux groupes de scellements. En situation de référence, l'Andra observe des débits molaires sensiblement équivalents en sortie des LSF quels que soient les scénarios considérés et conclut que les scellements des LSF et des galeries sont d'efficacités identiques. En situation enveloppe, le dysfonctionnement des scellements des LSF (SEA-1 et *What-if-1*) conduit à des débits molaires de plusieurs ordres de grandeur supérieurs à ceux calculés en cas de dysfonctionnement des scellements des galeries (SEA-2 et *What-if-2*), ce qui conduit l'Andra à conclure au rôle prépondérant des scellements des LSF. Sur la base des évaluations de l'Andra, **PSE-ENV relève qu'en situation de référence, évolution prévisible du stockage reposant sur l'état actuel des connaissances, les scellements des galeries assurent une redondance avec les scellements des LSF, alors qu'en situation enveloppe, le rôle des scellements des LSF devient nettement supérieur.** Sur ce dernier point, PSE-ENV rappelle (cf. Chapitre 5.3) le caractère pénalisant de la situation enveloppe. En

effet, cette situation, qui représente un domaine d'évolution prévisible étendu du système de stockage et de son environnement, est construite sur la base d'un cumul de valeurs conservatives et d'hypothèses pénalisantes indépendantes [47]. Par conséquent, PSE-ENV considère que l'évaluation du rôle des deux groupes de scellements (horizontaux et verticaux) sur la performance globale du stockage et la prépondérance des voies de transfert ne peut être évaluée de manière pertinente qu'à l'aune d'une modélisation de type probabiliste qui intègre les variabilités des paramètres et leurs distributions statistiques, offrant ainsi une vision plus réaliste et nuancée du comportement du système. **Aussi, PSE-ENV estime qu'une démarche probabiliste d'évaluation du rôle des deux groupes de scellements et des paramètres associés en cas de dysfonctionnement aurait pu être mise en œuvre par l'Andra, sans toutefois remettre en cause les conclusions présentées par l'Andra.**

S'agissant des scénarios postulant le dysfonctionnement des scellements des LSF, les résultats des simulations de l'Andra montrent qu'en situation de référence, les pics de débits molaires de l'¹²⁹I via les ouvrages sont inférieurs de 1 à 4 ordres de grandeur aux débits via le COx. L'Andra note que la période radioactive plus courte des autres radionucléides mobiles, ³⁶Cl et ⁷⁹Se, ainsi que la sorption du ⁷⁹Se (et du ³⁶Cl dans une moindre mesure) dans les bétons des revêtements des alvéoles MA-VL, contribuent à accroître l'écart entre les débits molaires évalués via la voie « ouvrages » et ceux évalués par la voie « COx », par rapport à l'¹²⁹I, ce dont convient PSE-ENV. En condition de dysfonctionnement de tous les scellements, l'Andra observe que, dans la situation de référence, la contribution de la voie « ouvrages » aux transferts de l'¹²⁹I est d'environ un à deux ordres de grandeur inférieure à celle de la voie « COx ». **Sur la base des résultats de ses travaux de modélisation présentés en Annexe T8 au présent rapport, PSE-ENV convient, dans la situation de référence correspondant à l'évolution prévisible du stockage reposant sur l'état actuel des connaissances, de la prédominance du transfert diffusif via le COx en cas de dysfonctionnement de tous les scellements de l'installation.**

En revanche, l'Andra observe qu'en situation enveloppe, la voie de transfert par les ouvrages prédomine sur celle par la couche du COx pendant quelques dizaines de milliers d'années pour les SEA les plus pénalisants considérés (scellements des LSF dysfonctionnant - SEA-1 et SEA-3), et pendant environ 100 000 ans pour les *What-if* considérés (*What-if-1* et *What-if-3*). Après ces périodes, l'Andra note que les débits molaires de l'¹²⁹I évalués via les ouvrages pour ces scénarios sont du même ordre de grandeur que ceux évalués via le COx. Pour les conditions hydrauliques les plus pénalisantes (*What-if-3* en situation enveloppe), les débits molaires maximaux évalués par l'Andra sont précoces, *i.e.* entre 20 000 et 30 000 ans après la fermeture de l'installation. L'Andra a également évalué, en situation enveloppe, les proportions d'¹²⁹I relâchées par les LSF et par le toit du COx sur un million d'années par rapport à l'inventaire initialement présent dans les colis. Pour les scénarios postulant le dysfonctionnement de tous les scellements, ces proportions atteignent respectivement 12,1 % et 37,4 % pour le scénario SEA-3, et 24,3 % et 32,3 % pour le scénario *What-if-3*. Pour ce scénario, le rapport entre les débits molaires maximaux via la voie « COx » et via la voie « ouvrages » est évalué à 0,6 par l'Andra. Sur la base de cet indicateur et du résultat de ses évaluations, l'Andra conclut à la codominance des deux voies de transferts (COx et ouvrages) du scénario *What-if-3* en situation enveloppe. Selon PSE-ENV, ces résultats en situation enveloppe montrent, dans le cas où les scellements ne remplissent pas ou peu leur rôle, une contribution plus importante des phénomènes convectifs dans les ouvrages, qui conduit à un relâchement significatif des solutés par les LSF et à des débits molaires maximaux plus précoces. **Aussi, PSE-ENV estime qu'en situation enveloppe, la voie du COx ne constitue plus la voie prédominante de transfert jusqu'à un million d'années en cas de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements. PSE-ENV considère que ces résultats, confirmés par ses propres modélisations, mettent en exergue le rôle essentiel des scellements des LSF dans la situation enveloppe, qui représente, de manière pénalisante, le domaine d'évolution prévisible étendu du système de stockage et de son environnement.**

Evaluation de l'impact sanitaire

S'agissant de l'impact radiologique, l'Andra a précisé, au cours de l'expertise, que pour les SEA-1 et SEA-3, le débit molaire en situation enveloppe en sortie du COx (voie « COx » et « ouvrages ») associé à l'¹²⁹I est évalué qualitativement supérieur d'environ 15 % à celui évalué pour le SEN. Cependant, la contribution de l'¹²⁹I au cumul de dose reste inférieure d'au moins un ordre de grandeur à celle du ⁷⁹Se, qui pilote la dose comme dans le SEN. En effet, la voie de transfert du ⁷⁹Se par la couche du COx reste significativement supérieure à celle par les ouvrages, même si le transfert par cette dernière est supérieur dans le cas des SEA par rapport à celle évaluée

en SEN. Aussi, PSE-ENV convient que l'impact radiologique total (cumul de dose de tous les radionucléides) aux exutoires pour chaque classe d'âge est similaire entre le SEN et les SEA postulant le dysfonctionnement des scellements. Concernant le scénario *What-if* le plus pénalisant (« dysfonctionnement de tous les scellements » en situation enveloppe), l'Andra précise que les incidences radiologiques au niveau de l'exutoire du Barrois et de l'Oxfordien augmentent de quelques dizaines de pourcents par rapport au SEN, et conclut à un impact radiologique total aux exutoires du même ordre de grandeur pour ce scénario et le SEN, ce dont convient également PSE-ENV. La valeur maximale de dose, évaluée par l'Andra au niveau de l'exutoire « pompage dans l'Oxfordien » pour la biosphère chaude est ainsi de 0,3 mSv/an pour l'enfant de 1 an.

S'agissant de l'impact des substances toxiques chimiques, l'Andra évalue l'impact des rejets chimiques dans les SEA de la même manière que dans les SEN, c'est-à-dire en comparant les concentrations de substances à l'exutoire calculées aux normes de qualité en vigueur pour ces substances. Les concentrations maximales des substances rejetées aux exutoires restant inférieures aux NQ correspondantes, l'Andra conclut à l'absence de risque chimique du stockage sur les populations sur la période d'un million d'années. L'analyse par PSE-ENV de ce point sur le plan méthodologique est donc la même que celle présentée au chapitre 6.1.3 du présent rapport relatif au SEN. **PSE-ENV estime ainsi que l'Andra devra fournir, pour la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique, une évaluation prospective des risques sanitaires des rejets liquides en substances toxiques chimiques après la fermeture de l'installation de stockage, pour les SEN et SEA, conformément aux recommandations de l'INERIS en la matière.**

Ce point fait l'objet de l'**engagement 2025-E5** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. PSE-ENV estime que cet engagement est satisfaisant.

Il convient néanmoins de noter que l'évolution des concentrations aux exutoires en éléments toxiques chimiques les plus mobiles en situation de référence (Se et CN) et enveloppe (Se, CN et B) des SEA postulant le dysfonctionnement des scellements est identique à celle observée pour le SEN. Les impacts sanitaires dus aux substances toxiques chimiques ne devraient donc pas, dans le cas des SEA « dysfonctionnement des scellements » comme pour le SEN, atteindre des niveaux significatifs.

Evaluation de l'impact environnemental

Au stade du DDAC, l'Andra n'a pas fourni d'évaluation de l'impact chimique ou radiologique pour la faune et la flore associé aux rejets du stockage pour les SEA de dysfonctionnement de scellements. Pour PSE-ENV, l'analyse de l'impact à l'environnement des rejets du stockage dans les SEA est une exigence [128] qui contribue à asseoir la démonstration de sûreté au travers de la vérification de l'acceptabilité des impacts, y compris pour des scénarios d'évolution altérée. Toutefois, PSE-ENV souligne que, en cohérence avec les résultats de l'impact sanitaire radiologique et chimique, il est attendu que l'impact environnemental pour le SEA soit similaire à l'impact pour le SEN. **PSE-ENV estime néanmoins que l'Andra pourrait compléter son étude d'impact des SEA avec l'évaluation des impacts environnementaux radiologiques et liés aux substances toxiques chimiques.**

6.2.2. Dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA

L'Andra présente dans le DDAC deux SEA postulant la perte partielle de la sous-fonction de sûreté « protéger les déchets de l'eau », soit par dysfonctionnement (perte d'étanchéité) de l'ensemble des conteneurs de stockage du quartier pilote HA, soit par dysfonctionnement d'un conteneur de stockage HA1 ou HA2 par alvéole HA1 ou HA2 du quartier de stockage HA (un alvéole HA contient environ une centaine de conteneurs HA). Selon l'Andra, ces situations exposent la matrice vitreuse à des conditions environnementales défavorables (température élevée et pH basique du matériau cimentaire environnant (MREA)), entraînant une dégradation de ses performances et, par conséquent, une dégradation de la fonction « limiter le relâchement des substances radioactives et les immobiliser dans le stockage ». La perte totale de la sous-fonction de sûreté « protéger les déchets de l'eau » due à une perte d'étanchéité de l'ensemble des conteneurs de stockage HA, qui conduit également à la perte de la fonction « limiter le relâchement des substances radioactives et les immobiliser dans le stockage », est traitée dans un scénario *What-if*, car jugée très peu vraisemblable par l'Andra. Enfin, PSE-ENV rappelle que l'Andra n'attribue pas de fonction de sûreté « limiter le relâchement des substances radioactives et les immobiliser dans le stockage » à long terme pour les colis de stockage MA-VL. Par conséquent, l'Andra ne définit pas de SEA de dysfonctionnement des conteneurs de stockage MA-VL.

S'agissant de la perte prématurée d'étanchéité des conteneurs de stockage HA, PSE-ENV rappelle en préambule que la première formulation du MREA prévu dans l'espace annulaire entre la roche et le chemisage d'un alvéole HA, présentée par l'Andra dans le DDAC, conduit à des phénomènes de corrosion localisée, qui ne permettent pas de garantir l'étanchéité du chemisage sur le long terme et donc la réalisation de la fonction de sûreté qui lui est attribuée. Le programme de développement en cours portant sur de nouvelles formulations pour ce matériau et les premiers résultats, éléments transmis par l'Andra en réponse à l'engagement 2024-E12 pris à l'issue du GP1 et en réponse à la recommandation du GPD [6], sont examinés au chapitre 3.1 du présent rapport.

Pour chacun des scénarios considérés, l'Andra postule une perte d'étanchéité de conteneurs de stockage HA dès la fermeture de l'installation et un relâchement labile (sur une année) des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans la matrice vitrifiée. Cette hypothèse, particulièrement conservatrice en regard des vitesses de corrosion attendues, même assorties d'incertitudes significatives, est à comparer à celles retenues par l'Andra pour le SEN, à savoir que les relâchements depuis les colis débutent à 3800 ans après la fermeture du stockage pour la situation de référence, ou à environ 500 ans après la fermeture du stockage pour la situation enveloppe. Ainsi, le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques a lieu au cours de la phase dite « thermique », pendant laquelle la charge thermique des colis n'a pas encore été évacuée par la roche. PSE-ENV rappelle que [92] les températures atteintes dans le COx au sein du quartier de stockage HA sont limitées par les critères de dimensionnement thermique, permettant de préserver les propriétés favorables de la roche hôte. Ainsi, les températures maximales sont de l'ordre de 80 °C en paroi d'alvéole, et de l'ordre de 40 °C à 50 °C dans le COx à l'entraxe de deux alvéoles HA. La diffusion des radionucléides dans les composants du stockage dépendant de la température, l'Andra retient des valeurs pour les coefficients de diffusion en cohérence avec les conditions thermiques. Ce point est analysé par l'IRSN dans le cadre du GP1 [2]. L'Andra montre que, d'un point de vue hydraulique, le comportement du système de stockage reste identique à celui en SEN, l'augmentation temporaire de la perméabilité du COx sous l'effet de la température n'étant pas significative. PSE-ENV convient en effet que la durée de la phase thermique (quelques milliers d'années) et l'extension spatiale de la perturbation des propriétés de la roche hôte induite sont limitées en comparaison de l'épaisseur de garde de roche saine et du temps de transfert des radionucléides dans la roche (plusieurs centaines de milliers d'années). Les autres paramètres considérés par l'Andra sont ceux de la situation enveloppe du SEN pour les deux SEA et ceux des situations de référence et enveloppe du SEN pour le scénario *What-if*, ce qui n'appelle pas de remarque de PSE-ENV. Selon PSE-ENV, l'hypothèse retenue par l'Andra d'un relâchement labile sur une année, ainsi que les valeurs des paramètres associés à la phase du transitoire thermique (cf. GP1, [2]), **permettent de prendre en compte de manière conservatrice la perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA**. S'agissant du nombre et de la localisation des dysfonctionnements postulés par l'Andra, PSE-ENV souligne l'intérêt de la prise en compte d'un défaut généralisé des conteneurs de stockage du quartier HA0 compte tenu de sa proximité avec les LSF. Bien que le choix du nombre de conteneurs défaillants dans chaque alvéole des quartiers HA1 et HA2 n'ait pas été étayé sur la base d'une probabilité de défaillance dans le SEA HA1/HA2, **PSE-ENV considère que ce scénario, couplé au scénario *What-if* qui permet de tester la robustesse du stockage dans l'hypothèse d'un défaut généralisé des conteneurs de stockage HA, apporte des enseignements suffisants quant aux conséquences de dysfonctionnements prématurés de ces conteneurs (cf. *infra*)**.

S'agissant de la capacité de confinement globale du système de stockage, les simulations de l'Andra montrent que, bien que les débits de solutés soient plus précoces dans les galeries d'accès en raison de la rupture prématurée des colis, cet effet s'atténue ensuite compte tenu de leurs temps de transfert importants dans les autres composants du stockage. PSE-ENV note ainsi que les débits molaires maximaux pour les trois espèces mobiles estimés par l'Andra au toit du COx, pour les deux voies de transfert « COx » et « ouvrages », sont similaires à ceux évalués pour les situations enveloppe et de référence du SEN. En effet, la voie de transfert par la couche du COx reste prédominante par rapport à la voie « ouvrages », du fait de la performance des scellements, qui limitent l'écoulement de l'eau dans les galeries, et des choix de conception du quartier de stockage HA positionné en aval hydraulique par rapport au LSF. Aussi, l'Andra conclut que les impacts sanitaire et environnemental de ce SEA sont similaires à ceux calculés pour le SEN, ce dont PSE-ENV convient. **Sur la base des résultats de ses propres modélisations, PSE-ENV convient que, dans la configuration de référence présentée au stade du DDAC, le dysfonctionnement précoce des conteneurs de stockage HA n'a pas d'incidences notables en termes d'impact sanitaire du stockage après fermeture, dès lors que les**

autres composants du stockage, en particulier la roche hôte et les scellements, remplissent leurs fonctions de sûreté.

6.2.3. Discontinuité non détectée dans le Callovo-Oxfordien

Les connaissances réunies par l'Andra relatives à la géologie du site de Meuse/Haute-Marne, dans lequel se situe la formation du COx retenue pour l'implantation de Cigéo, sont basées sur un ensemble de campagnes d'investigations géologiques (cartographies, forages, mesures géophysiques par sismique réflexion 2D et 3D...) combiné à d'autres travaux scientifiques (mesures en laboratoire, modélisation...). Ces études approfondies font l'objet de l'expertise présentée par l'IRSN lors du GP1 [2], qui conclut en un socle de connaissances sur la tectonique du site, son contexte structural et son évolution géoprospective de nature à permettre l'évaluation de la sûreté de Cigéo au stade d'une demande d'autorisation de création.

S'agissant de la sûreté après fermeture, les fonctions « *s'opposer à la circulation de l'eau* » et « *retarder et atténuer la migration des substances radioactives* » reposent notamment sur les propriétés favorables de confinement de la roche hôte du COx. A ce stade, aucune structure drainante traversant le COx, qui pourrait favoriser la migration par convection de radionucléides depuis l'installation de stockage vers les formations calcaires aquifères supérieures ou inférieures, n'a été identifiée sur le site entre les grands systèmes de discontinuités qui le bordent (failles de la Marne à l'ouest, de Gondrecourt à l'est, zone de fracturation diffuse au sud-ouest). Une incertitude subsiste toutefois, selon le GPD à l'issue du GP1 [6], sur l'extension possible dans le COx des structures détectées par la sismique 3D dans le Trias au droit de la partie nord du futur quartier de stockage HA. De manière plus générale, PSE-ENV rappelle [15] que la détection des discontinuités dans les roches argileuses à partir des mesures géophysiques s'avère difficile, en particulier pour identifier des discontinuités à faible décalage vertical. En outre, la possibilité à long terme de propagation de discontinuités sous-jacentes à la formation du COx, en lien avec une activité sismique (risque sismique après fermeture) constitue une autre source d'incertitude mentionnée par l'IRSN lors d'une précédente expertise [36]. Ces incertitudes résiduelles ne sont pas, selon PSE-ENV, rédhibitoires en termes de sûreté mais il importe de les prendre en compte, comme demandé par l'ASN en 2013, « *en retenant à titre de précaution dans [l'] 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* ». Au stade du DOS, l'Andra avait traité l'hypothèse d'une discontinuité non détectée dans le cadre d'un scénario *What-if*, sans toutefois avoir étudié ce scénario. En outre, la revue du DOS par le groupe d'experts réunis par l'AIEA effectuée à l'automne 2016 [70] a également recommandé que l'hypothèse d'une structure conductrice soit retenue dans le cadre d'un scénario *What-if*, afin d'améliorer la démonstration de robustesse de l'installation de stockage.

Dans le DDAC, l'Andra présente l'évaluation de deux scénarios *What-if* postulant l'existence d'une discontinuité non détectée, en termes d'influence de cette discontinuité sur les flux d'eau dans le COx et le transfert des radionucléides depuis le stockage vers les formations encaissantes, sur une période d'un million d'années. L'expertise présentée ci-après porte sur la conceptualisation de ces scénarios puis sur l'évaluation quantitative associée.

Conceptualisation des scénarios

L'Andra retient [47] d'une part un scénario avec une discontinuité non traversante dans la roche hôte, créant ainsi un court-circuit entre la roche hôte et la formation sous-jacente, d'autre part un scénario avec une discontinuité traversante formant un court-circuit entre les deux aquifères sus- et sous-jacents.

Pour ces deux scénarios, l'Andra postule la présence d'une discontinuité non détectée dans le quartier de stockage MA-VL, au sud du quartier où le gradient hydraulique descendant est le plus élevé (-0,02 m/m), afin de favoriser le transfert convectif vers l'exutoire situé dans le Dogger, au niveau de la ZFD. Aucune discontinuité interceptant le quartier de stockage HA n'est retenue, l'Andra justifiant ce choix par le fait que malgré un gradient hydraulique ascendant plus élevé par rapport à la zone MA-VL (+0,08 m/m), la forte atténuation des transferts dans les formations sus-jacentes vers les calcaires du Barrois [47] est de nature à minimiser l'impact. Ainsi, une discontinuité non détectée localisée dans le quartier de stockage HA aurait, en global, une influence nettement moindre qu'une discontinuité non détectée localisée dans le quartier de stockage MA-VL. Ceci est examiné dans la section *infra*.

S'agissant des propriétés géométriques de la discontinuité, l'Andra considère une discontinuité non détectée sous la forme d'une gouge²⁹ de 4 cm d'épaisseur, assimilable à un milieu poreux continu équivalent. Elle précise ne pas retenir de discontinuité dont les caractéristiques résulteraient de l'activité tectonique future dans la mesure où la roche hôte ne sera pas en régime extensif lors du prochain million d'années. L'Andra postule une extension verticale (en profondeur) de la discontinuité de l'ordre de 100 mètres pour une discontinuité non traversante, et « *au moins égale* » à l'épaisseur de la couche du COx pour une discontinuité traversante, assurant ainsi le court-circuit hydraulique entre les aquifères de l'Oxfordien et du Dogger. L'extension horizontale (dans le plan de l'installation) est de « *l'ordre de 200 mètres* » ; la discontinuité intercepte ainsi quatre alvéoles du quartier de stockage MA-VL (cf. Figure 20). L'orientation de la discontinuité retenue par l'Andra est basée sur celles des discontinuités les plus proches de la zone de transposition : la discontinuité est donc parallèle à la discontinuité de Gondrecourt, plus proche du quartier de stockage MA-VL que la ZFD. En outre, l'Andra évalue ces scénarios en considérant une redistribution spécifique de l'inventaire radiologique des trois radionucléides mobiles dans le quartier de stockage MA-VL, visant à une mobilisation maximale du transfert via la discontinuité. La discontinuité modélisée intercepte ainsi les alvéoles MA-VL qui contiennent l'inventaire le plus important pour chacun des radionucléides mobiles considérés. Dans cette redistribution de l'inventaire, chaque radionucléide est pilote de sa propre distribution, ce qui conduit à trois distributions distinctes de cet inventaire. L'Andra précise que les incidences radiologiques liées à chacun des radionucléides étudiés ne sont, par conséquent, pas sommées [47]. PSE-ENV convient du caractère pénalisant de cette redistribution de l'inventaire radiologique dans le quartier de stockage MA-VL. Enfin, s'agissant des propriétés de transfert de la discontinuité, l'Andra lui assigne des propriétés de rétention et de diffusion pénalisantes, à savoir un coefficient de sorption nul ($K_d = 0$) couplé à une solubilité infinie pour l'ensemble des radionucléides, ainsi qu'un coefficient de diffusion de pore équivalent à celui de l'eau dans l'eau (soit $D_e = 6,9 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, avec une porosité accessible postulée à 0,3). Pour ce qui est de la conductivité hydraulique de la discontinuité, l'Andra présente une étude de sensibilité en retenant quatre valeurs de perméabilité, comprises entre 10^{-8} et 10^{-5} m/s .

PSE-ENV estime que les propriétés géométriques de la discontinuité postulée par l'Andra ne sont pas représentatives des failles observées dans des milieux argileux similaires aux argilites du COx (cf. Annexe T8), en particulier s'agissant de sa faible épaisseur (4 cm) qui n'est, de ce fait, pas pénalisante. PSE-ENV retient dans ses propres scénarios, sur la base d'hypothèses raisonnablement pénalisantes à l'égard des observations précitées, une discontinuité caractérisée par une extension horizontale de 300 m et une épaisseur de 30 m interceptant le COx sur toute sa hauteur. Toutefois, PSE-ENV souligne que les propriétés de transfert retenues par l'Andra dans la discontinuité sont quant à elle très pénalisantes. A cet égard, PSE-ENV note en particulier que les perméabilités retenues par l'Andra (jusqu'à 10^{-5} m/s) sont supérieures de plusieurs ordres de grandeur à celles mesurées dans les failles existantes en milieux argileux (cf. Annexe T8), mesures qui ont conduit PSE-ENV à retenir une valeur de perméabilité raisonnablement pénalisante de 10^{-9} m/s dans ses propres simulations. Ainsi, les transmissivités³⁰ retenues par l'Andra dans ses évaluations (de $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à $4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pour des conductivités hydrauliques de 10^{-5} m/s et 10^{-8} m/s) sont proches, voire supérieures d'un ordre de grandeur dans le cas le plus pénalisant, à celle retenue par PSE-ENV ($3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) dans ses propres simulations. **Aussi, PSE-ENV estime suffisamment conservatrice la combinaison des propriétés géométriques et de transfert de la discontinuité retenues par l'Andra, bien que l'épaisseur de la discontinuité ne soit pas représentative de celles mesurées sur les failles en milieux argileux.** En outre, PSE-ENV considère que l'étude de sensibilité liée à la conductivité hydraulique présentée par l'Andra permet d'appréhender l'impact des incertitudes de la transmissivité de la discontinuité, et que la redistribution de l'inventaire dans le quartier de stockage MA-VL permet bien de maximiser les transferts de solutés via la discontinuité.

La pertinence de la localisation et de l'orientation de la discontinuité retenues par l'Andra pour chacun des deux scénarios étudiés est examinée ci-après par PSE-ENV sur la base notamment des résultats de ses propres simulations, tenant compte de trois orientations distinctes de la discontinuité pour chacun des quartiers de stockage HA et MA-VL (cf. Figure 21). En effet, PSE-ENV s'appuie, pour définir ses propres scénarios, sur des

²⁹ Une gouge est un matériau non consolidé et finement broyé qui se forme dans une zone de faille.

³⁰ Produit de la perméabilité par l'épaisseur d'une faille saturée en eau, exprimant sa capacité à transmettre de l'eau, et donc potentiellement des solutés, sous l'effet d'un gradient de charge.

choix méthodologiques différents de ceux de l'Andra. En particulier, la localisation et l'orientation de la discontinuité postulée dans l'installation de stockage sont décorréliées des temps de transfert au sein des encaissements, ainsi que des orientations des discontinuités qui l'encadrent, dans une perspective d'analyse paramétrique. Sont ainsi retenues dans les simulations réalisées par PSE-ENV en support à son expertise :

- une orientation orthogonale à plusieurs alvéoles dite « multiples alvéoles ». Cette discontinuité intercepte 5 et 9 alvéoles, respectivement dans les quartiers de stockage MA-VL et HA.
- une orientation dite « alvéoles longitudinales » pour laquelle la discontinuité intercepte de façon longitudinale un alvéole dans le cas du quartier de stockage MA-VL ou deux dans le cas du quartier de stockage HA ;
- et une orientation dite « galerie » pour laquelle la discontinuité traverse une galerie de façon longitudinale, soit dans le quartier MA-VL, soit dans le quartier HA.

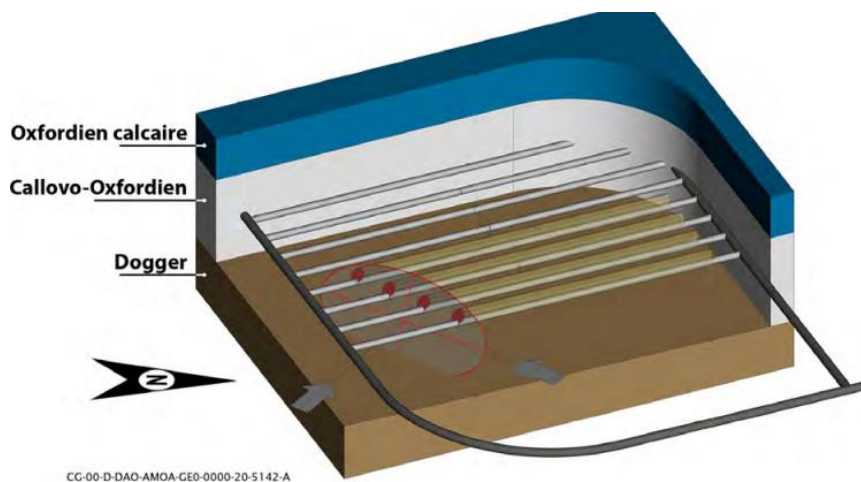


Figure 20 : Représentation schématique de la discontinuité non détectée postulée dans le quartier de stockage MA-VL dans les scénarios retenus par l'Andra [47].

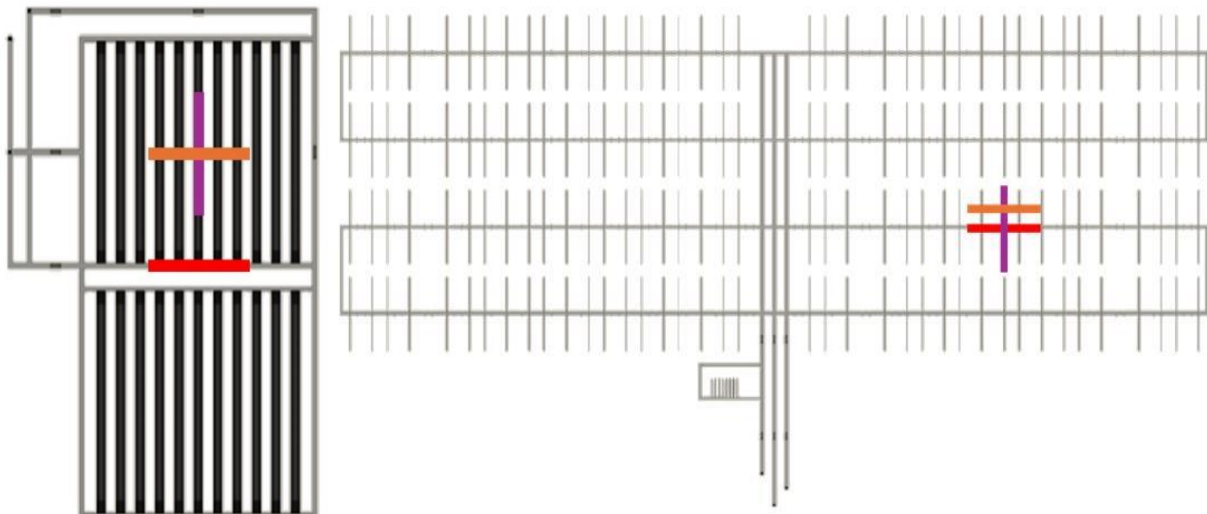


Figure 21 : Représentation schématique de la localisation et de l'orientation des discontinuités postulées par PSE-ENV dans les quartiers de stockage MA-VL (gauche) et HA (droite).

Enfin, les évaluations quantitatives réalisées par l'Andra pour les deux scénarios qu'elle retient reposent sur les hypothèses et les données issues de la situation de référence du SEN. Au cours de l'expertise, l'Andra a précisé privilégier, pour juger de la performance du système de stockage, la situation de référence pour les scénarios *What-if*, cette dernière représentant le meilleur des connaissances. Cela permet d'éviter, selon l'Andra, un cumul d'hypothèses conservatrices qui pourrait altérer les enseignements tirés de l'évaluation quantitative d'un tel événement. PSE-ENV relève néanmoins que l'Andra s'appuie sur les hypothèses et données de la situation

enveloppe du SEN pour les évaluations quantitatives des scénarios SIHI, ainsi que pour les scénarios *What-if* de « défaillance des scellements », ces derniers étant également étudiés avec les paramètres de la situation de référence. En outre, PSE-ENV souligne que le fait de considérer les deux situations (de référence et enveloppe) pour étudier les scénarios permet d'intégrer l'effet des incertitudes aux enseignements à tirer des scénarios *What-if* sur la robustesse du système de stockage. **Aussi, PSE-ENV considère qu'un scénario *What-if* doit être quantifié en s'appuyant sur la situation enveloppe du SEN, en complément de celle de référence.** A cet égard, l'Andra a fourni au cours de l'expertise son évaluation du scénario de discontinuité non détectée en se basant sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN, dans sa réponse à l'engagement 2024-E10 pris à l'issue du GP1 (cf. chapitre 6.1.2). Par ailleurs, PSE-ENV a défini ses propres scénarios de « discontinuité traversante non détectée », décrits ci-dessus, basés sur la situation enveloppe du SEN qu'elle considère.

Evaluation de la capacité de confinement

L'Andra présente dans le DDAC des évaluations quantitatives pour les deux scénarios retenus et pour les trois radionucléides mobiles à vie longue (^{129}I , ^{36}Cl et ^{79}Se) identifiés comme les principaux contributeurs à la dose sur la base des résultats d'impacts obtenus en SEN (cf. chapitre 6.1.3). S'agissant du scénario *What-if* « discontinuité non détectée postulée traversante », les débits molaires maximaux de ^{129}I , du ^{36}Cl et du ^{79}Se , calculés par l'Andra au mur de la couche du COx, augmentent avec la conductivité hydraulique de la discontinuité, en cohérence avec les débits d'eau drainée en son sein. En effet, ces débits d'eau sont évalués à environ 150 et 100 000 L/an, pour des conductivités hydrauliques respectives de 10^{-8} et 10^{-5} m/s. Les résultats indiquent également que, sur un million d'années, pour les conductivités hydrauliques les plus élevées considérées (10^{-6} m/s et 10^{-5} m/s), environ 80 % de l'inventaire initial en ^{129}I , ^{36}Cl et ^{79}Se des quatre alvéoles interceptés atteignent le mur de la couche du COx par la discontinuité. Les débits molaires maximums sont respectivement d'environ 4, 4,5 et 1,6 mol/an pour la conductivité hydraulique maximale, soit 4 à 5 ordres de grandeurs supérieurs à ceux du SEN. En revanche, pour la conductivité hydraulique minimale de 10^{-8} m/s, les pourcentages d'inventaire atteignant le mur sont de 31% pour ^{129}I , 17% pour le ^{36}Cl et 16% pour le ^{79}Se , et les débits molaires maximums diminuent d'environ un ordre de grandeur pour une diminution équivalente de la conductivité hydraulique. L'Andra évalue enfin l'impact radiologique uniquement pour la classe d'âge « adulte » du groupe de référence hypothétique « multi-activités », avec une biosphère tempérée, dans l'objectif de vérification de la robustesse du système de stockage de ces scénarios. La dose maximale est déterminée, pour la conductivité hydraulique la plus élevée ($K = 10^{-5}$ m/s) et pour le ^{79}Se , qui est le principal radionucléide contributeur ; elle est atteinte vers 70 000 ans et est évaluée par l'Andra à 3.10^{-2} mSv/an. Le scénario *What-if* « discontinuité non détectée postulée non traversante », dont l'évaluation par l'Andra montre des débits molaires maximaux de solutés moindre au mur de la couche du COx en cohérence avec un comportement hydraulique moins dégradé, conduit à une dose maximale totale de l'ordre de 7.10^{-3} mSv/an induite par le ^{79}Se , à 100 000 ans. Pour rappel, la dose maximale calculée par l'Andra pour la situation de référence du SEN à l'exutoire du Dogger est de $4,5.10^{-4}$ mSv/an, et pilotée par ^{129}I (49%) et le ^{79}Se (42%), pour la classe d'âge « adulte » du groupe de référence hypothétique « multi-activités » et la biosphère tempérée (cf. chapitre 6.1.3).

Ces résultats de l'Andra sont corroborés par les simulations de PSE-ENV (cf. Annexe T8 du présent rapport) représentant le scénario « discontinuité traversante postulée non détectée » de l'Andra avec les conductivités hydrauliques minimale et maximale (i.e. 10^{-8} m/s et 10^{-5} m/s), sans toutefois considérer la distribution de l'inventaire radiologique pénalisante dans le quartier de stockage MA-VL retenue par l'Andra. PSE-ENV convient donc du faible impact radiologique, au regard de la valeur de référence de 20 mSv/an (cf. chapitre 4.3 relatif aux objectifs de protection), des deux scénarios de « discontinuité traversante postulée non détectée » présentés par l'Andra dans le DDAC pour les trois radionucléides les plus mobiles considérés. L'Andra a précisé, au cours de l'expertise, que les radionucléides mobiles de période plus courte que les trois radionucléides précités, dont notamment le ^{14}C et le ^{93}Mo , ne sont pas complètement atténués par leur transfert depuis la discontinuité au niveau du mur du COx jusqu'à l'exutoire. Toutefois, selon l'Andra, leur contribution radiologique maximale demeure, pour le scénario *What-if* « discontinuité traversante postulée non détectée », environ un ordre de grandeur inférieure à celle du ^{79}Se , qui est le radionucléide pilotant la dose pour ces scénarios. PSE-ENV convient que les temps de transfert dans l'encaissant du Dogger contribuent, en regard de la demi-vie relativement courte de ces espèces mobiles, à atténuer leur contribution à la dose à l'exutoire.

En revanche, les radionucléides peu mobiles à vie longue, tels que les actinides, pourraient avoir un impact non négligeable sur la dose aux exutoires, en raison des conditions de transfert pénalisantes au sein de la discontinuité dans ces deux scénarios. Sur ce point, PSE-ENV note que l'Andra a considéré, dans sa réponse à l'engagement 2024-E10 pris à l'issue du GP1 [2], un ensemble de radionucléides peu mobiles pour son évaluation du scénario de discontinuité traversante. Cette évaluation est basée sur les paramètres de la situation enveloppe du SEN de l'Andra avec le stockage en position haute, mais en tenant compte de valeurs jugées conservatives par PSE-ENV (et considérées pour sa situation enveloppe du SEN) pour le gradient de charge hydraulique vertical et la conductivité hydraulique du COx sain. L'Andra retient les mêmes hypothèses et paramètres spécifiques au scénario *What-if* « discontinuité traversante postulée non détectée » du présent chapitre et une conductivité hydraulique pénalisante de 10^{-5} m/s. Sur cette base, l'Andra a calculé les évolutions des débits molaires de ^{129}I , du ^{36}Cl , du ^{79}Se et de ^{238}U au toit du COx, transitant par la discontinuité et par la formation argileuse saine. L'Andra présente également les fractions des inventaires initiaux de Cigéo et du quartier de stockage MA-VL transférées, en sortie du COx et de la discontinuité non détectée, pour une vingtaine de radioéléments sur une période d'un million d'années. PSE-ENV constate que les radioéléments présents dans le quartier de stockage MA-VL et moyennement à fortement sorbés dans la situation enveloppe du SEN (niobium 94, technétium 99, étain 126, uranium 235-238 et neptunium 237) sont relâchés de manière significative via la discontinuité. S'agissant de l'évaluation de l'impact sanitaire, ces relâchements significatifs se traduisent par des doses élevées générées par les descendants de ^{238}U et du ^{237}Np , notamment le ^{229}Th , qui présente la dose maximale estimée à environ 22 mSv/an. L'impact de ces radionucléides peu mobiles en cas de discontinuité postulée dans le COx est corroboré par les résultats des simulations de PSE-ENV établies sur la base de ses propres scénarios (cf. Annexe T8). En outre, PSE-ENV note que les pics de dose liés au ^{79}Se et au ^{36}Cl , tels qu'évalués par l'Andra, sont supérieurs de deux ordres de grandeurs à ceux calculés pour le scénario *What-if* du DDAC décrit précédemment et basé sur la situation de référence du SEN.

Ainsi, les résultats de l'évaluation d'un scénario *What-if* « discontinuité traversante postulée non détectée » basé sur la situation enveloppe du SEN, combinant les valeurs d'un gradient de charge hydraulique vertical et d'une conductivité hydraulique du COx sain jugées conservatives par PSE-ENV, mettent en évidence un impact significatif des radionucléides issus des chaînes 4N+1 et 4N+2 (^{237}Np et ^{238}U). PSE-ENV souligne que cet impact est supérieur à ceux des radionucléides mobiles à vie longues (^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se). Le niveau de dose maximal calculé par l'Andra est de l'ordre de 22 mSv/an pour l'adulte et la biosphère tempérée. Des hypothèses plus enveloppes, telle qu'une biosphère chaude et une autre classe d'âge que celle de l'adulte (cet indicateur « adulte » est néanmoins jugé pertinent par PSE-ENV, comme indiqué au chapitre 4.4), conduirait à une valeur de dose plus élevée, bien qu'*a priori* du même ordre de grandeur. A cet égard, PSE-ENV rappelle (cf. chapitre 4.3 relatif aux objectifs de protection) que les quantifications associées à ces types de scénarios doivent être utilisées de manière prudente et interprétées en termes de sûreté et de robustesse des options de conception de manière nuancée au regard de la vraisemblance des scénarios retenus et de la sévérité des hypothèses qui les fondent. Dans le cas présent, compte tenu du caractère très peu vraisemblable du scénario de discontinuité non détectée localisée au sein du quartier de stockage MA-VL et du cumul de données conservatives et d'hypothèses pénalisantes considérées, PSE-ENV estime que l'atteinte de la valeur de référence de 20 mSv/an ne remet pas en cause la robustesse du système de stockage. **PSE-ENV estime néanmoins qu'il appartiendra à l'Andra d'intégrer, dans la prochaine version du VPRS, les résultats de l'évaluation des scénarios *What-if* de « discontinuité traversante postulée non détectée » dans le quartier MA-VL basée sur la situation enveloppe du SEN et tenant compte de l'impact des radionucléides peu mobiles à vie longue.**

Enfin, bien que les résultats des simulations de PSE-ENV postulant une discontinuité traversante dans le quartier de stockage HA mettent en évidence un transfert des radionucléides plus limité que dans le cas d'une discontinuité localisée dans le quartier MA-VL (cf. Annexe T8 du présent rapport), PSE-ENV souligne que ses analyses reposent sur un ensemble restreint de radionucléides (^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se et ^{238}U), au regard de la diversité de l'inventaire radiologique du quartier HA. Ainsi, à l'instar des résultats obtenus par l'Andra pour une discontinuité localisée dans le quartier de stockage MA-VL, PSE-ENV considère que certains radionucléides peu mobiles, tels que les actinides et en particulier les transuraniens, qui présentent des inventaires notables dans le quartier de stockage HA (isotopes ^{245}Cm , ^{246}Cm et ^{243}Am , parents des chaînes de filiation 4N+1, 4N+2 et 4N+3), sont susceptibles de contribuer à la dose aux exutoires compte tenu des conditions de transfert spécifiques dans la

discontinuité postulée. Par conséquent, PSE-ENV considère que l'Andra devra consolider, dans la prochaine révision du rapport de sûreté, l'évaluation du scénario *What-if* « discontinuité traversante », sur la base de la situation enveloppe du SEN, en tenant compte d'une discontinuité au sein du quartier de stockage HA et de l'ensemble des radionucléides mobiles et peu mobiles d'intérêt, dont les éléments transuraniens et leur filiation.

Ce point fait l'objet de l'**engagement 2025-E6** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. PSE-ENV estime que cet engagement est satisfaisant.

6.2.4. Effondrement en phase d'exploitation

Lors de l'examen du DOS, l'Andra [36] s'est engagée à évaluer au stade de la DAC « les conséquences sur la sûreté à long terme d'un scénario conventionnel d'effondrement qui pourrait conduire à une diminution de l'épaisseur de garde saine de roche hôte, au cours de la phase d'exploitation de Cigéo, dans l'installation souterraine à proximité de colis stockés [...] afin de tester la robustesse du stockage » ainsi qu'à identifier « le cas échéant, les dispositions complémentaires qui pourraient être mises en œuvre pour limiter les conséquences d'un tel scénario ».

En réponse à cet engagement, l'Andra présente dans le DDAC [129] un scénario conventionnel d'effondrement dans un alvéole de stockage MA-VL pendant la phase d'exploitation, ainsi que l'évaluation de la sûreté du stockage à long terme qui lui est associée. Ces éléments sont examinés ci-après par PSE-ENV.

Conceptualisation du scénario

S'agissant de l'évaluation de la zone de roche endommagée suite à un effondrement, l'Andra retient une démarche simplifiée visant à évaluer l'extension maximale en voûte, parement et radier de la zone de roche endommagée induite par la perte de soutènement de la roche en paroi [130][131], pour les ouvrages parallèles à la direction de la contrainte horizontale majeure ainsi que, comme précisé au cours de l'expertise, pour les ouvrages qui lui sont perpendiculaires tels que les galeries de liaison. Cette extension est fonction du taux de vide présent dans l'ouvrage et du taux de foisonnement³¹ de la roche environnante. Cette démarche, examinée dans le cadre du GP1 [2], consiste à :

- évaluer le volume nécessaire au comblement de l'ensemble des vides de l'alvéole en supposant que ce volume sera fourni par le foisonnement de la roche en paroi de l'ouvrage ;
- déterminer les extensions verticale et latérale du volume de roche foisonnée selon différentes hypothèses géométriques ;
- appliquer une ZFC autour de ce volume de roche foisonnée, nommée ZFC-f, dont l'extension et la géométrie sont similaires à une ZFC générée par une excavation qui engloberait l'ouvrage et son volume de roche foisonnée.

PSE-ENV rappelle qu'à l'issue de l'examen des données de base de la DAC de Cigéo (GP1), l'IRSN a estimé [2] que cette démarche permettait une évaluation simple et rapide de l'extension de la zone de roche surendommagée attendue au droit d'un ouvrage après foisonnement de la roche environnante. En outre, comme au stade du DOS, l'Andra attribue à la zone de roche fracturée connectée créée par le foisonnement (ZFC-f) une conductivité hydraulique très élevée et équivalente à celle de la ZFC, soit supérieure de plus de quatre ordres de grandeur à celle du COx sain (10^{-9} à 10^{-8} m/s pour la ZFC-f respectivement en situations « de référence » et « enveloppe » du SEN, à comparer à 10^{-13} m/s environ pour le COx sain). **PSE-ENV considère que la démarche retenue par l'Andra pour évaluer l'extension de la zone de roche foisonnée et celle de la ZFC-f consécutives à un effondrement, ainsi que les caractéristiques qu'elle leur attribue, sont satisfaisantes.**

S'agissant de la localisation de l'effondrement, l'Andra retient un alvéole MA-VL en raison des dimensions importantes de cet ouvrage (environ 10 m de diamètre et 500 m de long) [50] et des incidences radiologiques potentiellement plus importantes que pour un alvéole HA. Par ailleurs, compte tenu de la distance de l'entraxe des alvéoles MA-VL (de l'ordre de cinq diamètres), l'Andra considère que l'effondrement se limite à un seul alvéole MA-VL. PSE-ENV convient :

³¹ Rapport entre l'augmentation apparente du volume d'une roche remaniée et son volume initial.

- d'une extension moindre de la zone de roche endommagée après l'effondrement d'un micro-tunnel HA compte tenu de son diamètre excavé plus petit (de l'ordre du mètre) [48] ;
- d'un terme source mobilisable globalement plus faible dans un alvéole HA³² ;
- d'un entraxe suffisant des alvéoles MA-VL pour considérer que l'effondrement ne se propage pas de proche en proche aux alvéoles adjacents.

Le scénario d'effondrement retenu par l'Andra repose sur les hypothèses et les données de la situation de référence du SEN, à l'exception de la redistribution de l'inventaire radiologique dans les alvéoles du quartier de stockage MA-VL. L'Andra adopte une distribution de l'inventaire radiologique de manière à ce que l'alvéole effondré contienne les colis les plus chargés pour chaque radionucléide étudié, à savoir l'¹²⁹I, le ⁷⁹Se et le ³⁶Cl. Ce mode de distribution est identique à celui défini par l'Andra pour le scénario « discontinuité traversante postulée non détectée », que PSE-ENV estime pénalisant (cf. chapitre 6.2.3). En revanche, comme indiqué dans le précédent chapitre, PSE-ENV souligne que le fait de considérer les deux situations, de référence et enveloppe, pour étudier des scénarios permet d'intégrer l'effet des incertitudes aux enseignements à tirer en termes de robustesse du système de stockage. **Aussi, PSE-ENV considère qu'il appartiendra à l'Andra de quantifier le scénario conventionnel d'effondrement en s'appuyant sur la situation enveloppe du SEN, en complément de celle de référence.**

Afin d'évaluer la diminution de garde saine au droit de l'alvéole effondré, l'Andra considère l'effondrement de la roche dans la partie utile de l'alvéole (en retenant un taux de vide moyen d'un alvéole entièrement chargé de 20%) [50] qui présente un vide « additionnel » lié à son remplissage incomplet durant la phase d'exploitation, correspondant à une nappe de colis en moins. PSE-ENV constate que l'application à ce scénario de la méthode d'évaluation de la zone de roche endommagée décrite *supra* ne conduit pas à remettre en question le maintien d'une épaisseur de garde saine sus-jacente supérieure au minimum requis de 50 m. Cependant, de manière pénalisante pour l'évaluation de ce scénario, l'Andra postule une épaisseur de garde saine au droit de l'alvéole effondré égale au minimum requis de 50 m fixé par l'Andra pour l'¹²⁹I et le ⁷⁹Se, et de 55 m pour le ³⁶Cl.

En premier lieu, PSE-ENV constate que le scénario conventionnel retenu par l'Andra ne permet pas d'apprécier l'influence d'une diminution de l'épaisseur de garde d'argilite saine inférieure à l'exigence de 50 m minimum. A cet égard, PSE-ENV relève que la quantification de scénarios avec plusieurs nappes de colis manquantes n'est pas présentée par l'Andra. En outre, PSE-ENV relève que l'Andra exclut le scénario d'effondrement dans les galeries de liaison ou d'accès des deux quartiers de stockage, en raison [129] des dispositions de surveillance du génie civil prévues par l'Andra au cours de la phase d'exploitation [4]. PSE-ENV convient qu'une détection précoce de défauts de soutènement de la roche dans ces galeries est possible et que leur accessibilité permet leur maintenance afin de prévenir leur effondrement. **Malgré le caractère très peu probable d'un effondrement dans une galerie de liaison ou d'accès au cours de la phase d'exploitation du stockage, PSE-ENV estime que des localisations plus variées de l'effondrement auraient pu être étudiées par l'Andra, par exemple dans les galeries des quartiers de stockage MA-VL et HA, dans l'objectif d'évaluer la performance de la roche hôte sous différentes sollicitations et de tester la robustesse du système de stockage vis-à-vis d'une épaisseur de garde saine inférieure à l'exigence de 50 m.**

En second lieu, l'Andra évalue la performance du stockage pour le scénario d'effondrement en alvéole MA-VL en considérant les radionucléides mobiles et à vie longue contributeurs en SEN. Cependant, **PSE-ENV considère que la prise en compte de radionucléides peu mobiles dans l'évaluation de performance de confinement du stockage pourrait permettre de mieux évaluer le rôle joué par la formation hôte lorsqu'elle est endommagée.** Leur prise en compte n'est toutefois pas de nature à remettre en cause les conclusions de l'Andra, compte tenu des propriétés de rétention et de transport de la roche foisonnée qui ne s'écartent pas significativement de celles de la roche saine [2].

³² En considérant un contributeur majeur à l'impact radiologique du stockage tel que l'iode et une répartition homogène de cette activité radiologique dans les alvéoles des quartiers de stockage HA et MA-VL, l'activité en iode dans un alvéole MA-VL est environ dix fois plus élevée que celle contenue dans un alvéole HA.

Evaluation de la capacité de confinement

Pour quantifier la performance globale de confinement du stockage dans le scénario d'effondrement postulé, l'Andra retient comme indicateurs de performance les débits molaires des éléments mobiles ^{129}I , ^{79}Se et ^{36}Cl au toit du COx. L'Andra [129] observe que, pour les trois radionucléides mobiles, les débits molaires au toit du COx sont toujours inférieurs à ceux déterminés en situation de référence du SEN, avec des pics de débit molaire inférieurs de quelques pourcents, du fait d'un inventaire radiologique réduit en l'absence de la dernière nappe de stockage dans l'alvéole effondré. Sur la base de ces résultats et de ses propres modélisations (cf. Annexe T8) du scénario d'effondrement défini par l'Andra, qui montrent des débits molaires similaires au SEN en situation de référence, **PSE-ENV estime qu'un scénario d'effondrement tel qu'étudié par l'Andra n'altère pas significativement la performance du stockage.**

En outre, l'Andra a évalué les indicateurs associés à un scénario postulant une distribution d'inventaire radiologique identique à celle de l'effondrement (sans la dernière nappe de colis dans l'alvéole considéré) mais une épaisseur de garde saine équivalente à la situation de référence du SEN, soit 60 m au droit de chaque alvéole MA-VL. Les débits molaires évalués au toit du COx diminuent de plus d'une dizaine de pourcents, par rapport à la situation de référence du SEN, lorsque les colis de la dernière nappe de l'alvéole ne sont pas stockés. Ces débits augmentent de quelques pourcents lorsque l'épaisseur de garde saine au droit de l'alvéole effondré évolue de 60 m à 50 m. L'Andra conclut de cette comparaison que l'inventaire radiologique contenu dans l'alvéole effondré influe davantage sur les débits molaires au toit du COx que la diminution d'épaisseur de garde saine liée au taux de vide, **ce dont PSE-ENV convient** sur la base notamment de ses propres modélisations du transfert des radionucléides mobiles en l'absence de chargement des deux dernières nappes dans l'alvéole MA-VL (cf. Annexe T8).

Ces conclusions sont confortées par l'analyse par PSE-ENV de l'impact sur la performance du quartier de stockage MA-VL de l'effondrement de deux alvéoles adjacents, qui montre des évolutions des débits molaires des radionucléides mobiles et des débits d'eau en sortie du COx similaires au SEN. L'analyse de l'impact de l'effondrement de galeries du quartier de stockage MA-VL ou HA sur le transfert des radionucléides mobiles, présentée en Annexe T8, conduit aux mêmes conclusions. Dans le cas de l'effondrement des quatre galeries de liaison et de retour d'air du quartier de stockage MA-VL, les débits molaires au toit du COx sont globalement similaires au scénario d'effondrement d'un alvéole MA-VL, malgré une garde d'argilite saine fortement réduite par l'effondrement (5 m d'épaisseur), du fait de l'absence d'inventaire radiologique directement mobilisable dans les galeries. **PSE-ENV estime que ces résultats illustrent le rôle des propriétés favorables de transport dans les zones de roche endommagée par l'effondrement (gradient hydraulique vertical faible et conductivité hydraulique faible - bien que plus élevée que dans le COx sain). Ces propriétés permettent, en situation d'effondrement localisé au sein des quartiers de stockage, de maintenir un transfert lent des solutés selon un régime principalement diffusif, assurant ainsi la performance de confinement du stockage.**

En conclusion, PSE-ENV estime, sur la base des éléments présentés par l'Andra et de ses modélisations, que la fonction de sûreté « *s'opposer à la circulation d'eau* » est peu altérée par un effondrement localisé durant la phase d'exploitation. Elle relève par ailleurs que les caractéristiques de la zone de roche endommagée demeurent favorables vis-à-vis du transfert des solutés, en regard de débits déterminés au toit du COx, contribuant au maintien de la fonction de sûreté « *retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques* ». Toutefois, PSE-ENV souligne que les scellements sont supposés efficaces dans tous les scénarios évalués ci-dessus et participent ainsi à limiter les flux d'eau au sein du stockage. Aussi, si PSE-ENV convient que la performance de confinement du stockage après sa fermeture, en cas d'effondrement localisé survenu au cours de sa phase d'exploitation, n'est pas mise en cause, PSE-ENV souligne que le rôle important joué par les ouvrages de fermeture dans le maintien de la performance de confinement du système de stockage en cas d'effondrement n'a pas été mis en évidence par l'Andra par un scénario de défaillance dédié. A cet égard, l'impact d'un scénario d'abandon du stockage au cours de sa phase d'exploitation, mettant en jeu un effondrement généralisé au sein de l'installation souterraine est analysé ci-dessous.



Abandon du stockage en phase d'exploitation

Dans le cadre du dialogue technique organisé par l'Ancli, le Clis de Bure et l'ASNR durant l'expertise du DDAC de Cigéo (cf. Annexe T1), des questionnements ont été exprimés quant aux conséquences d'un abandon survenant au cours de la phase d'exploitation, suite par exemple à des bouleversements socio-économiques impliquant une perte de financement ou de contrôle institutionnel. Bien qu'un tel scénario apparaisse peu probable à date, PSE-ENV estime, comme déjà évoqué au stade du DOS [36], qu'une telle situation ne peut pas être exclue au regard de la durée séculaire de l'exploitation de Cigéo. Ainsi, elle considère que ce type de scénario relève de l'analyse de sûreté à long terme, afin d'évaluer la robustesse du stockage en l'absence de mise en œuvre des dispositions de fermeture. A ce titre et à des fins exploratoires, PSE-ENV a évalué les conséquences à long terme d'un tel scénario sur la performance de confinement du stockage. Les hypothèses structurantes qui lui sont associées, résumées ci-après, ont été co-construites avec des membres de la société civile lors d'échanges dans le cadre du dialogue technique précité.

En termes de conceptualisation du scénario, l'hypothèse d'une installation abandonnée avant toute opération de remblayage ou de scellement est retenue. En l'absence de remblais, le scénario suppose un effondrement généralisé des alvéoles MA-VL et de l'ensemble des galeries de liaison et d'accès du stockage. A l'instar de l'effondrement considéré au chapitre 6.2.4 précédent, il se traduit par la présence d'une roche endommagée par le foisonnement dans et autour de ces ouvrages et, en conséquence, par une diminution de l'épaisseur de garde d'argillites saines au droit du stockage. Le scénario d'abandon considéré repose, pour cette première approche, sur les hypothèses et les données du SEN en situation de référence (cf. chapitre 6.1 du présent rapport), à l'exception de la distribution de l'inventaire radiologique (remplissage partiel et non complet du stockage), de l'épaisseur de garde d'argillite saine au droit du stockage (cf. *infra*), ainsi que des propriétés hydrauliques et de transport de la roche endommagée par le foisonnement. L'ensemble de ces hypothèses sont précisées dans l'Annexe T8 du présent rapport relatif à la modélisation de ce scénario. Afin d'évaluer son impact sur la capacité de confinement du stockage, PSE-ENV considère, de manière arbitraire, différentes épaisseurs résiduelles de garde d'argillites saines comprises entre 46,5 m et 0,5 m (limite numérique du modèle). Par ailleurs, afin d'évaluer la sensibilité des performances de confinement du stockage aux propriétés hydrauliques de la roche endommagée par le foisonnement, dont les caractéristiques sont susceptibles d'évoluer au cours du temps sous l'effet par exemple de l'auto-colmatage et de la convergence de la roche, PSE-ENV retient deux configurations contrastées :

- un premier cas (cas 1), avec notamment une conductivité hydraulique de la roche foisonnée dans les ouvrages de 10^{-6} m/s (équivalente à celle d'un sable) et une valeur pénalisante de la zone fracturée connectée située autour des ouvrages effondrés (zone de roche foisonnée et ZFC-f) (10^{-8} m/s).
- un second cas (cas 2) pour lequel PSE-ENV considère les paramètres hydrauliques de la situation de référence du SEN et une conductivité hydraulique de la roche foisonnée et de la ZFC-f de 10^{-9} m/s, traduisant ainsi une évolution progressive des caractéristiques de cette roche sur le long terme.

Enfin, à des fins de comparaison de résultats, PSE-ENV quantifie un scénario dénommé « SEN abandon fermé », dans lequel le stockage, au même stade de remplissage que le stockage abandonné, est supposé remblayé et scellé.

Les évaluations réalisées sur la base des paramètres hydrauliques pénalisants du cas 1 mettent en évidence que, s'agissant du comportement hydraulique du stockage, des débits d'eau de l'ordre de quelques dizaines de m^3 /an sont drainés par le système de stockage pour des épaisseurs de garde saine supérieure à environ 12 m. Un effet de « seuil hydraulique » est observé lorsque l'épaisseur de garde saine devient inférieure à environ 12 m, se traduisant par une augmentation des débits d'eau d'un ordre de grandeur. Pour qui concerne le transfert des radionucléides, les fractions des inventaires initiaux relâchées au toit du COx à un million d'années atteignent, pour une épaisseur de garde d'environ 12 m, 55 % pour l' ^{129}I , 35 % pour le ^{36}Cl et 3,5 % pour le ^{79}Se , contre respectivement 23%, 13% et 0,4% pour le scénario « SEN abandon fermé ». Lorsque l'épaisseur de garde saine est réduite à 0,5 m, les fractions relâchées de ^{129}I et de ^{36}Cl sont de 95% et 86%, en cohérence avec l'effet de « seuil hydraulique » observé. En liminaire, PSE-ENV rappelle que la variabilité des résultats entre les radionucléides considérés s'explique par la différence de leurs propriétés de rétention dans le COx ou la roche foisonnée et de leur demi-vie. Par ailleurs, PSE-ENV observe que les propriétés hydrauliques fortement dégradées assignées à la roche endommagée par le foisonnement conduisent à une augmentation notable du relâchement

des radionucléides sur un million d'années (facteur 2-3) lorsqu'une épaisseur de garde saine d'environ 12 m est conservée et à une augmentation considérable de ce relâchement lorsque cette épaisseur est réduite à moins d'un mètre.

L'évaluation du comportement hydraulique pour les configurations basées sur les paramètres hydrauliques du cas 2, montre que, pour des épaisseurs de garde saine de 46,5 m et de 12,5 m, les débits d'eau en sortie des LSF restent de l'ordre de quelques m³/an, à l'instar de ceux observés dans le scénario SEN « abandon fermé ». En revanche, pour l'épaisseur minimale de 0,5 m, PSE-ENV observe que ce débit atteint plusieurs dizaines de m³/an, traduisant, comme pour le cas 1, un effet de « seuil hydraulique ». S'agissant du transfert des radionucléides mobiles, lorsque l'épaisseur de garde est d'environ 12 m les fractions des inventaires initiaux relâchées au toit du COx à un million d'années atteignent 43 % pour le ¹²⁹I, 21 % pour le ³⁶Cl et 1,5 % pour le ⁷⁹Se, soit une augmentation moindre que dans le cas 1, plus pénalisant en termes de propriétés hydrauliques de la roche foisonnée. Lorsque l'épaisseur de garde saine est réduite à 0,5 m, ces fractions augmentent à 95 %, 60 % et 7 % respectivement, en cohérence avec le comportement hydraulique du stockage observé dans ce cas. Selon PSE-ENV, ces résultats illustrent, dans une certaine mesure, la robustesse du système de stockage en situation d'abandon, dès lors que la perméabilité de la roche endommagée par le foisonnement demeure relativement faible, et qu'une épaisseur résiduelle de garde saine de quelques mètres est conservée.

Les résultats de l'évaluation par PSE-ENV des conséquences à long terme d'un abandon du stockage survenant au cours de la phase d'exploitation mettent en exergue la sensibilité de la performance de confinement de l'installation, d'une part aux propriétés hydrauliques des matériaux obstruant les ouvrages, et d'autre part à l'épaisseur résiduelle de garde d'argilites saines (effet falaise observé en deçà de quelques mètres). PSE-ENV estime donc qu'en situation d'abandon du stockage, la mise en place d'un remblayage simple, de perméabilité relativement faible et qui permettrait de préserver une épaisseur résiduelle de garde d'argilite saine de l'ordre de quelques mètres, pourrait préserver, dans une certaine mesure, la capacité de confinement globale du stockage.

Aussi, PSE-ENV considère que l'Andra devra envisager, dans la prochaine révision du rapport de sûreté de Cigéo, des situations d'abandon du stockage pendant son fonctionnement afin d'en tirer, le cas échéant, des enseignements notamment en matière de fermeture préventive anticipée du stockage et ainsi limiter les conséquences de telles situations sur la sûreté à long terme.

Ce point fait l'objet de l'[engagement 2025-E7](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. PSE-ENV estime que cet engagement est satisfaisant.



6.3. SCENARIOS D'INTRUSION HUMAINE INVOLONTAIRE

La prise en compte de situations d'intrusion humaine involontaire dans l'évaluation de la sûreté d'un stockage de déchets radioactifs suit une approche qui fait l'objet de principes et de recommandations spécifiques, formulés à l'échelle internationale par l'AIEA et la CIPR ainsi qu'au niveau national par l'ASN [11].

A l'échelle internationale, l'AIEA [132] définit l'intrusion humaine comme une activité humaine qui pourrait affecter l'intégrité du système de stockage (déchets, barrières ouvragées ou milieu géologique) et qui pourrait avoir des incidences radiologiques. Elle indique que les situations d'intrusion humaine involontaire « banale » (de type chantier routier, résidence, jeux d'enfants, forage...), d'importance particulière pour un stockage en surface ou à faible profondeur puisque très probables après sa fermeture, sont de nature différente (e.g. forage³³) et très peu probables dans le cas d'un stockage géologique du fait notamment de sa profondeur [66]. L'AIEA [66] précise que compte tenu des fortes incertitudes afférentes (période d'occurrence, état de l'installation et de son environnement au moment de l'intrusion...), les situations d'intrusion sont représentées par des scénarios stylisés (« *spéculatifs* » et « *arbitraires* »), basés sur l'hypothèse de l'usage de technologies de même niveau qu'aujourd'hui.

L'AIEA [66] et la CIPR [67] recommandent que, dans le cas d'une installation de stockage géologique, les scénarios d'intrusion involontaire soient appréciés de manière qualitative, dans l'objectif principal de vérifier la robustesse du système de stockage vis-à-vis de tels scénarios et d'identifier le cas échéant les possibles mesures d'optimisation, plutôt que comme moyen d'évaluer le détriment sanitaire. La CIPR [67] précise néanmoins que

³³ Les scénarios d'intrusions de type chantier routier, résidence et jeux d'enfants ne sont considérés que pour les stockages situés proches de la surface du sol.

dans ce cas (stockage géologique), comme indiqué au chapitre 4 du présent rapport, une estimation de l'impact dosimétrique, le cas échéant, peut être mise en regard des niveaux de référence recommandés pour les situations d'exposition existante (1-20 mSv/an), et/ou pour les situations d'exposition d'urgence (20-100 mSv pour la première année) une fois l'exposition reconnue. A cet égard, les travaux menés dans le cadre du projet HIDRA³⁴ de l'AIEA [105], présentés lors du « Topical Day » de SITEX.Network consacré aux intrusions humaines [133], soulignent que les préconisations relatives à l'interprétation de la comparaison des doses calculées avec ces niveaux de référence, telles que formulées dans la norme SSR-5³⁵ [65], ne s'appliquent pas toutes au cas d'un stockage géologique, en particulier celles associées à un dépassement de la valeur de 20 mSv/an, le stockage géologique étant considéré comme le concept le plus efficace vis-à-vis des situations d'intrusion humaine involontaire. Ces travaux suggèrent en outre de retenir des forages profonds comme situations d'intrusion humaine involontaire dans le cas d'un stockage géologique et d'étudier des mesures de réduction de la probabilité d'occurrence et/ou des conséquences raisonnablement applicables. A titre d'exemple, des mesures telles que la surveillance institutionnelle du site et le maintien de la mémoire peuvent être envisagées pour prévenir d'éventuelles intrusions ; une optimisation de la conception du stockage (e.g. compartimentage) peut quant à elle minimiser l'activité mobilisable par un forage intrusif.

A l'échelle nationale, le guide n°1 de l'ASN [11] indique que la perte de mémoire de l'existence d'une installation de stockage géologique peut raisonnablement être située au-delà de 500 ans et que cette valeur est à retenir comme date minimale d'occurrence d'une intrusion humaine involontaire. Il confirme le caractère stylisé (ou conventionnel) des scénarios d'intrusion et précise notamment les situations à étudier, à savoir :

- un forage exploratoire traversant un ouvrage de stockage, avec extraction de carottes de déchets HA ;
- un forage exploratoire abandonné et mal scellé traversant un ouvrage de stockage, visant à évaluer les conséquences liées à la mise en communication d'aquifères ou entre un aquifère et les ouvrages de stockage ;
- un forage d'exploitation d'eau à usage alimentaire ou agricole dans un aquifère profond.

Le présent chapitre présente l'expertise par PSE-ENV, fondée sur ces éléments de doctrine, de la conceptualisation des scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI) retenue par l'Andra dans le DDAC (chapitre 6.3.1) ainsi que des résultats de l'évaluation quantitative associée à ces scénarios (chapitre 6.3.2).

6.3.1. Conceptualisation des scénarios d'intrusion humaine

S'agissant des dispositions de conception et de maintien de la mémoire vis-à-vis du risque d'intrusion humaine involontaire, l'Andra retient une implantation de Cigéo à une profondeur de 500 m sur un site exempt de ressources naturelles exceptionnelles (cf. GP1) et le maintien de la mémoire sur une durée minimale de 500 ans (cf. chapitre 4.5), en accord avec les préconisations du guide n°1 de l'ASN.

S'agissant des SIHI retenus par l'Andra, ceux-ci sont élaborés de manière stylisée, à partir d'hypothèses simplifiées en considérant que le niveau de technologie est le même qu'aujourd'hui, comme le préconise le Guide n°1 de l'ASN. En outre, contrairement au stade du DOS où l'Andra classait les SIHI parmi les familles « SEA » et « *What-if* » selon leur vraisemblance, les SIHI sont traités dans le DDAC via une famille spécifique de scénarios [47], conformément aux recommandations émises par le groupe de revue internationale réuni sous l'égide de l'AIEA lors de l'expertise du DOS [70]. Enfin, en cohérence avec la typologie des scénarios retenus à l'international [105], l'Andra ne retient que des scénarios considérant des cas de forage unique. Ainsi, l'Andra [47] considère dans le DDAC les quatre scénarios suivants pour l'évaluation des situations d'intrusion humaine involontaire, illustrés sur la Figure 22 :

- forage s'arrêtant au niveau de l'installation de stockage, avec remontée de carottes ;

³⁴ Le projet "Human Intrusion in the context of Disposal of RAdioactive Waste" de l'AIEA s'est déroulé en deux phases menées de 2013 à 2015 puis de 2016 à 2018.

³⁵ La norme SSR-5 de l'AIEA [65], qui concerne tous les types de stockage de déchets radioactifs, préconise pour les scénarios d'intrusion humaine involontaire après fermeture d'un stockage, si les doses annuelles calculées pour les populations sont i) dans la gamme 1-20 mSv/an, de réduire la probabilité d'occurrence d'une intrusion ou de limiter les conséquences en optimisant la conception de l'installation et ii) au-delà de 20 mSv/an, « de considérer des options de stockage alternatives, par exemple le stockage des déchets en dessous de la surface, ou la séparation des radionucléides conduisant aux doses les plus hautes ».

- forage d'exploration géothermique visant le Trias mais arrêté au niveau de l'installation de stockage ; ce scénario vise à évaluer les conséquences d'une communication entre un aquifère (le Barrois) et les ouvrages de stockage ;
- forage d'exploration du Dogger en vue d'une alimentation en eau alimentaire ou agricole ; ce scénario engendre une communication des aquifères encaissants du COx ;
- forage s'arrêtant au niveau de l'installation de stockage pendant le transitoire hydraulique-gaz.

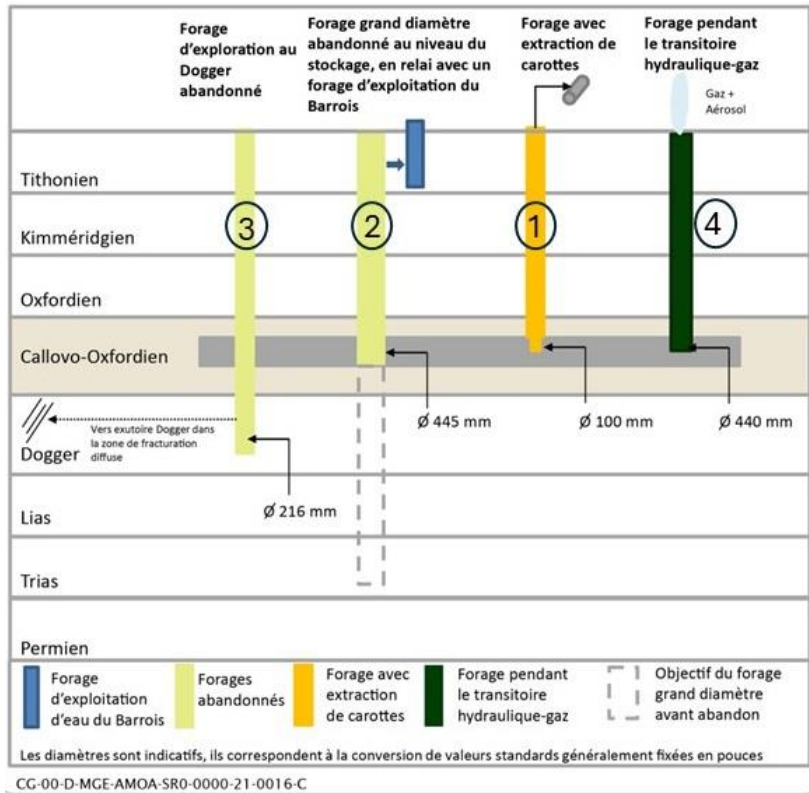


Figure 22 : Représentation des situations de forage retenues par l'Andra pour l'évaluation de sûreté après fermeture ([68], modifiée).

L'étude des scénarios 1 et 4 consiste à analyser l'exposition radiologique du foreur dès la perte de la mémoire du site (soit à court terme) suite, respectivement, à une remontée de déchets et à une remontée d'un panache de gaz radioactifs en provenance du stockage. L'étude des scénarios 2 et 3 consiste à analyser l'exposition radiologique liée à l'utilisation d'eau contaminée après transfert sur le long terme de radionucléides à travers le court-circuit induit par un forage d'exploration abandonné et mal scellé.

Pour les scénarios 1, 2 et 3, l'Andra étudie l'impact d'un forage intrusif dans le quartier de stockage HA et dans le quartier MA-VL (analyses séparées). Pour le scénario 4, l'Andra ne considère pas de forage traversant le quartier de stockage HA car la quantité de carbone 14, seul radionucléide gazeux d'intérêt pour cette analyse, y est bien plus faible que dans le quartier de stockage MA-VL, **ce dont PSE-ENV convient.**

PSE-ENV estime que les scénarios 1 à 3 définis par l'Andra répondent aux préconisations internationales et à celles du guide n°1 de l'ASN, synthétisées supra. La prise en compte du scénario 4 retenu au-delà de ces préconisations ne soulève quant à elle pas de remarque particulière de la part de PSE-ENV.

Scénarios 1 et 4 (impacts au foreur)

L'analyse par l'Andra du scénario 1 porte sur l'impact d'un prélèvement de carottes issues de chaque quartier de stockage. Dans ce cadre, l'Andra considère une partie « active » de la carotte limitée au diamètre interne du conteneur primaire pour les déchets HA (entre 43 et 69 cm) ou de 1 m pour les déchets MA-VL (longueur représentative, pour l'Andra, de la taille d'une carotte en cours d'examen). Le foreur est alors soumis à une

exposition externe (rayonnements gamma) en se tenant à une distance de 40 cm de la carotte pendant une durée d'examen de 10 min.

PSE-ENV relève que d'autres hypothèses plus sévères auraient pu être retenues pour ce scénario (longueur totale de carottes supérieure à 1 m si mises bout à bout après leur extraction comme pratiqué usuellement, durée d'examen plus longue, voies d'exposition incluant l'inhalation de poussières, etc.). Néanmoins, ainsi qu'indiqué *supra*, de tels scénarios sont d'une part hautement improbables pour les stockages géologiques et d'autre part, leur évaluation quantifiée doit être utilisée avec grande prudence compte tenu des fortes incertitudes associées, que ce soit en termes de conceptualisation des scénarios ou de données prises en compte dans les calculs. En outre, PSE-ENV considère, dans le même esprit que la CIPR [67], qu'une remontée de déchets en surface, qui entraîne une exposition directe du foreur voire de la population avoisinante, introduit la possibilité d'expositions élevées et de doses significatives, ce qui est une conséquence inévitable de la perte postulée dans ce scénario de toutes les dispositions associées aux lignes de défense du système de stockage. **Aussi, PSE-ENV estime que la conceptualisation de ce scénario « extraction de carotte » est suffisante pour appréhender ses enjeux en termes de niveaux d'exposition du foreur.**

L'analyse du scénario 4 porte quant à lui sur l'impact d'un forage interceptant le quartier de stockage MA-VL pendant le transitoire hydraulique-gaz et engendrant la remontée d'un panache de gaz contenant des radionucléides gazeux et des gouttelettes d'eau potentiellement contaminées. L'Andra considère pour ce scénario les voies d'exposition externe et interne (par inhalation) du foreur par immersion pendant 5 mn dans le panache. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de PSE-ENV.**

Scénarios 2 et 3 (impacts à long terme liés aux transferts par l'eau)

L'Andra postule de manière pénalisante, pour les scénarios de forages d'exploration d'aquifères, un forage remblayé par un matériau de conductivité hydraulique élevée, à savoir équivalente à celle d'un matériau granulaire, avec des propriétés de rétention et de transport conservatives (solubilité infinie, coefficient de partage nul et coefficient de diffusion effectif élevé).

Pour l'étude du forage d'exploration géothermique visant le Trias (scénario 2), l'Andra ne considère pas l'exploitation d'un doublet de forages normalement requis pour ce type d'exploitation, du fait « *que les ressources avérées ou potentielles en géothermie sur la ZT n'ont aucun caractère exceptionnel, [à savoir qu'] elles sont similaires à celles qui existent à l'échelle régionale et plus largement à l'échelle du Bassin parisien* » [68] (cf. GP1 [2] pour l'expertise du potentiel géothermique du site de MHM) ; le scénario retenu vise néanmoins à étudier l'effet d'un forage présentant un diamètre important (445 mm). Ce dernier est abandonné au niveau de l'installation de stockage et mis en relais avec un forage d'exploitation d'eau dans l'aquifère du Barrois au droit de l'installation. Le forage d'exploration du Dogger (scénario 3), de diamètre 216 mm et abandonné à sa cote prévisionnelle, est mis en relais avec un forage d'exploitation d'eau dans la zone de fracturation diffuse située à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de la ZIOS, cette zone présentant une transmissivité suffisante pour envisager une telle exploitation (cf. GP1).

L'évaluation quantitative de ces deux scénarios repose sur la situation enveloppe du SEN (cf. chapitre 6.1 du présent rapport), avec le stockage en position haute pour le scénario 2 et en position basse pour le scénario 3, dans le but de minimiser la longueur de trajet vers chaque aquifère exploité. Pour le scénario 2, l'Andra considère un gradient de charge vertical ascendant identique à celui de la situation enveloppe du SEN (soit 0,21 m/m pour un stockage « haut ») lorsque le forage est implanté dans le quartier de stockage HA et un gradient ascendant de 0,14 m/m lorsque le forage est implanté dans le quartier de stockage MA-VL, en cohérence avec les conditions hydrogéologiques enveloppes du SEN appliquées de manière plus fine à la localisation de chaque forage. Pour le scénario 3, l'Andra retient le gradient de charge vertical descendant de -0,06 m/m identique à la situation enveloppe du SEN pour un stockage « bas ». PSE-ENV constate que ces hypothèses sont cohérentes avec les résultats du modèle hydrogéologique, examiné dans le cadre du GP1, sur lequel repose le SEN.

Pour ces deux scénarios, l'Andra positionne les forages dans les quartiers de stockage MA-VL et HA de manière à maximiser les inventaires mobilisables, à savoir dans la galerie d'accès sud de la tranche HA1, au droit des alvéoles de déchets COG-800 dont l'activité en ¹²⁹I par unité de surface est la plus forte, et dans le fond de l'alvéole situé au fond du quartier de stockage MA-VL (nord-est), au voisinage de la galerie de retour d'air nord. Pour le

cas du forage positionné dans le quartier de stockage MA-VL, l'Andra étudie l'impact associé à chaque radionucléide pris indépendamment, en considérant que l'alvéole ciblé par le forage contient les familles de déchets qui ont la plus forte concentration du radionucléide étudié. Ce mode pénalisant de distribution des radionucléides dans le quartier de stockage MA-VL conduit l'Andra à ne pas sommer les incidences radiologiques associées à chacun des radionucléides, car chaque radionucléide est pilote de sa propre distribution. Pour ce qui concerne la démarche globale de répartition de l'inventaire radiologique dans le quartier de stockage MA-VL, PSE-ENV relève que celle-ci n'a pas évolué depuis le DOS et convient du caractère majorant de l'impact associé à la distribution retenue pour chaque radionucléide.

Enfin, afin d'évaluer la robustesse du système de stockage vis-à-vis de ces SIHI, l'Andra utilise comme indicateurs les champs de charges hydrauliques et les débits d'eau drainés par le forage intrusif, ainsi que les débits molaires des radionucléides transitant par le forage jusqu'au toit et au mur de la couche du COx. Les incidences radiologiques sur l'homme sont ensuite quantifiées au niveau des pompages d'eau dans la zone maximale du panache des solutés, en considérant le groupe de référence hypothétique « multi-activités », les biosphères tempérée et chaude, ainsi que les classes d'âge adultes, enfants de 10 ans et enfants de 1 an. Les résultats obtenus sont examinés au chapitre 6.3.2 ci-après. L'Andra a par ailleurs précisé, au cours de l'expertise, que les SIHI étant postulés dans l'évaluation de sûreté de Cigéo afin d'évaluer la robustesse du stockage vis-à-vis de l'enjeu qu'ils représentent pour le stockage des déchets de haute activité, l'impact associé aux toxiques chimiques n'a pas fait l'objet d'une estimation pour ces scénarios. Comme exprimé au chapitre 4.3 relatif aux objectifs de protection, PSE-ENV considère que l'étude des scénarios SIHI ne nécessite pas d'utiliser des indicateurs relatifs aux substances toxiques chimiques ; **elle rejoint donc l'Andra sur ce point.**

6.3.2. Evaluations quantitatives des scénarios

6.3.2.1. Scénarios 1 et 4 (impacts au foreur)

Pour le forage avec prélèvement de carottes (scénario 1), l'Andra évalue les expositions externes maximales à 7 mSv et à 11 mSv, respectivement pour les carottes extraites des quartiers de stockage MA-VL et HA, et observe qu'elles sont inférieures à la valeur repère qu'elle retient comme seuil de dose efficace engagée annuelle pour ce type de scénario (cf. chapitre 4.3 relatif aux objectifs de protection). Dans les deux cas, le ^{94}Nb , le ^{229}Th et le ^{237}Np sont les principaux contributeurs, les isotopes ^{241}Am et ^{243}Am contribuant également à l'impact pour les déchets HA. PSE-ENV considère que ces estimations, possiblement non-enveloppes comme indiqué *supra*, indiquent des niveaux d'exposition du foreur de l'ordre de quelques mSv à quelques dizaines de mSv, **qui ne sont pas rédhibitoires selon PSE-ENV compte tenu notamment de la très faible vraisemblance du scénario et de l'hypothèse particulière sous-jacente de remontée de déchets en surface.**

Pour le forage exploratoire pendant le transitoire hydraulique-gaz (scénario 4), l'Andra évalue une dose au foreur de l'ordre de quelque mSv, **ce qui n'appelle pas de remarque de la part de PSE-ENV.**

6.3.2.2. Scénarios 2 et 3 (impacts à long terme liés aux transferts par l'eau)

Comportement hydraulique du stockage

S'agissant du scénario d'exploration géothermique visant le Trias et abandonné au niveau du stockage (scénario 2), l'Andra montre que pour les quartiers de stockage HA et MA-VL, le rayon d'influence hydraulique du forage intrusif s'étend sur l'intégralité respective des deux quartiers et draine respectivement un débit d'eau de l'ordre de 6 m³/an et de l'ordre de 4 m³/an. Pour le scénario de forage d'exploration du Dogger (scénario 3), l'Andra indique que les forages traversant les quartiers de stockage HA et MA-VL n'induisent pas de pertes de charges significatives dans les ouvrages de stockage et qu'ils drainent un débit d'eau respectif de l'ordre de 1 m³/an et de l'ordre de 0,6 m³/an.

PSE-ENV constate que ces débits sont du même ordre de grandeur que ceux (~1 m³/an) obtenus dans les LSF en situation enveloppe du SEN, qui pour rappel présentent des diamètres beaucoup plus importants mais à l'inverse limitent notablement les écoulements et les transferts de solutés grâce à la présence de scellements. L'Andra souligne que dans le cas d'un forage d'exploration du Dogger, la mise en connexion hydraulique entre l'Oxfordien et le Dogger, en mobilisant ces deux aquifères, limite les effets de « drain hydraulique » du forage (en comparaison de celui s'arrêtant au niveau du COx) et donc son influence au sein des différents quartiers du

stockage. PSE-ENV observe que ce comportement hydraulique du stockage en présence de forages intrusifs de ce type, ainsi que les valeurs de débits associés, sont cohérents avec ceux évalués par PSE-ENV sur la base de ses propres modélisations.

Transfert des radionucléides au sein du forage

Dans le cas du forage d'exploration géothermique visant le Trias (scénario 2) arrêté dans le quartier de stockage HA, les résultats présentés par l'Andra montrent que les débits molaires les plus élevés au toit du COx sont associés aux espèces mobiles (ainsi qu'au ^{107}Pd jusqu'à 10 000 ans), avec un maximum de $8,3 \cdot 10^{-4}$ mol/an associé au ^{79}Se atteint vers 200 000 ans environ. S'agissant du forage implanté dans le quartier de stockage MA-VL, les débits molaires maximums au toit du COx sont pilotés par le ^{14}C (1 mol/an) dès les premières années suivant l'abandon du forage, puis par le ^{107}Pd et enfin par l' ^{238}U en fin d'évaluation (à 1 million d'années). L'Andra note que le rayon d'influence du forage s'étend sur plus d'un alvéole et a précisé, au cours de l'expertise, que le fait de localiser le forage dans l'alvéole MA-VL présentant l'activité volumique la plus importante assurait le caractère pénalisant de l'évaluation menée, indépendamment de la localisation de l'alvéole dans le quartier de stockage MA-VL et du positionnement du forage dans l'alvéole. L'Andra précise à cet égard que l'alvéole impacté par le forage contient à lui seul 82% de l'inventaire total de ce quartier en ^{14}C .

Dans le cas du forage au Dogger (scénario 3) traversant le quartier de stockage HA, les résultats montrent des débits molaires maximaux au toit du COx de l'ordre de 10^{-5} mol/an, associés au ^{79}Se , au ^{36}Cl et à l' ^{129}I . Pour un forage traversant le quartier de stockage MA-VL, les débits molaires maximaux au toit du COx atteignent 0,1 mol/an dès le début du scénario (500 ans). Ces débits molaires sont également dominés par le ^{14}C jusqu'à environ 10 000 ans, puis par le ^{107}Pd et l' ^{238}U . L'Andra explique que le diamètre réduit du forage au Dogger et le gradient de charge hydraulique vertical plus faible en comparaison du forage visant le Trias arrêté au niveau du stockage expliquent l'impact plus modéré sur le transfert des radionucléides depuis les quartiers de stockage HA ou MA-VL.

PSE-ENV observe que les espèces mobiles pilotent le débit molaire en sortie du COx dans le cas des forages placés dans le quartier de stockage HA, comme pour le SEN, en raison d'une distribution de l'inventaire identique pour ces scénarios SIHI (2 et 3) et SEN. Les espèces moins mobiles contribuent aussi à ce débit molaire, notamment sur le long terme, dans le cas des forages dans le quartier MA-VL ; toutefois, les différences de distribution de l'inventaire ne permettent pas, dans ce cas, une comparaison directe avec le SEN. PSE-ENV relève en outre que le rayon d'influence des forages considérés (en galerie HA ou dans un alvéole MA-VL) s'étend sur plusieurs alvéoles. A cet égard, l'inventaire maximisé pour chaque radionucléide dans l'alvéole MA-VL impacté masque, selon PSE-ENV, le rayon d'influence du forage en termes de contribution de l'alvéole voisin au débit molaire à la sortie du COx. Ce mode de distribution de l'inventaire, certes pénalisant pour l'évaluation de l'impact radiologique, ne permet donc pas d'apprécier si un gain pourrait être apporté par des dispositions de compartimentage complémentaires pour des distributions non maximisées. En outre, PSE-ENV rappelle (cf. chapitre 7) que l'Andra n'a pas présenté dans le DDAC d'étude de sensibilité de la capacité globale de confinement de l'installation au nombre et à la performance des scellements de galerie, et a fortiori d'analyse visant à identifier si la mise en place de scellements supplémentaires pourrait conduire à une diminution des débits molaires via un forage dans le cas des scénarios d'intrusion associés à des transferts d'eau. **Aussi, en vue d'analyser le gain qui pourrait être apporté par de telles dispositions conceptuelles en cas d'intrusion humaine involontaire, PSE-ENV estime qu'une analyse de sensibilité des débits molaires en sortie de COx en fonction du niveau de compartimentage (localisation et nombre de scellements) au sein des quartiers de stockage HA et MA-VL serait utile.** Ce point est repris au chapitre 7 du présent rapport.

Impact sanitaire

S'agissant du forage d'exploration géothermique visant le Trias arrêté au niveau des alvéoles de stockage (scénario 2), et pour le cas d'une biosphère tempérée, une dose maximale d'environ 55 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ associée au ^{79}Se est atteinte, pour la classe d'âge « enfant de 1 an » pour un forage dans le quartier de stockage HA, et une dose d'environ 35 mSv/an associée au ^{14}C est atteinte pour un forage dans le quartier de stockage MA-VL pour cette même classe d'âge. Dans le cas d'une biosphère chaude, les doses maximales calculées sont supérieures de 10 à 20 % à celles de la biosphère tempérée pour la majorité des radionucléides, avec notamment une dose

maximale de 49 mSv/an pour la classe d'âge « enfant de 1 an » associée au ^{14}C dans le quartier de stockage MA-VL. Pour la classe d'âge « adulte », les doses maximales pour un forage localisé respectivement dans le quartier de stockage HA et MA-VL sont de 13 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ et 33 mSv/an, associées aux mêmes radionucléides. L'Andra conclut sur cette base au respect de l'objectif de protection qu'elle retient (100 mSv/an, cf. chapitre 4.3 du présent rapport) dans toutes les situations envisagées. PSE-ENV rappelle pour sa part, comme indiqué au chapitre 4.3 ainsi que *supra* s'agissant des SIHI, que les doses maximales de quelques dizaines de mSv/an atteintes dans le quartier MA-VL doivent être appréciées au regard de la sévérité des hypothèses considérées (notamment un forage ciblant l'alvéole contenant 82 % de l'inventaire total en ^{14}C de ce quartier) et du caractère très peu vraisemblable d'un forage traversant l'installation Cigéo, compte tenu de sa profondeur et de l'absence de ressources naturelles exceptionnelles (en eau dans le Dogger ou géothermique dans le Trias). Aussi, comme l'Andra, bien qu'en se basant sur des niveaux repères différents (cf. chapitre 4.3), **PSE-ENV estime que ces niveaux d'exposition estimés pour le scénario 2 d'intrusion humaine ne sont pas rédhitobires**. Néanmoins, PSE-ENV considère, comme indiqué *supra*, que leur diminution pourrait être recherchée, par exemple par un compartimentage supplémentaire dans le quartier de stockage MA-VL si une telle disposition s'avère efficace.

S'agissant du forage au Dogger (scénario 3), la dose maximale obtenue pour le quartier HA est estimée à environ 1,6 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (associée au ^{79}Se) et à environ 46 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (associée au ^{229}Th) pour le quartier de stockage MA-VL, pour la classe d'âge « enfant de 1 an », dans le cas de la biosphère chaude. Les doses pour la classe d'âge « adulte » sont environ 5 et 2 fois plus faibles, respectivement pour ces deux quartiers. PSE-ENV observe que les résultats obtenus dans le quartier de stockage MA-VL sont cohérents avec ceux obtenus via le scénario « discontinuité traversante postulée non détectée » (cf. chapitre 6.2.3) en termes de contributeur principal à la dose (^{229}Th) et **constate que les doses estimées pour le scénario 3 d'intrusion humaine demeurent très en-deçà des niveaux de référence pour l'évaluation des SIHI**.

7. ETUDES DE SENSIBILITE A L'ARCHITECTURE DU STOCKAGE

A l'issue de l'expertise du dossier « Ouvrages de fermeture » en 2014 [30], l'ASN a souligné que l'architecture générale du stockage (longueur des galeries, positionnement des LSF, etc.) pourrait apporter des marges supplémentaires pour la sûreté après fermeture en cas de défaillance d'une ou plusieurs barrières ouvragées. Aussi, elle a considéré que « *la démonstration de sûreté devra justifier l'architecture 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* » (exploitation et après fermeture). L'Andra avait présenté, au cours de l'expertise du DOS, une étude de sensibilité mono-paramétrique de la performance de confinement du stockage à des pistes d'optimisation de son architecture, qui portait notamment sur la distance entre le quartier de stockage MA-VL et la ZSL, sur la longueur et le diamètre des alvéoles ainsi que sur le nombre, le positionnement et la performance hydraulique des scellements. Si l'IRSN avait alors estimé que cette étude permettait notamment de montrer l'intérêt d'un allongement de la distance entre la zone des puits et les quartiers de stockage pour atténuer davantage les débits molaires de radionucléides dans les ouvrages, il regrettait l'absence d'une analyse d'options d'architecture (allongement de longueurs de galerie, positionnement des quartiers de stockage en aval hydraulique par rapport aux LSF...) au regard de la sûreté en exploitation, et appelait l'attention sur les conséquences du manque de maturité de ces études d'optimisation, en particulier vis-à-vis de la justification de la conception *in fine* retenue. Ainsi, la demandé précitée n'étant pas soldée, l'ASN [38] a estimé nécessaire à l'issue de l'expertise du DOS que l'Andra « *étudie une architecture de stockage qui renforce la capacité globale de confinement de l'installation, en prenant en considération au moins les lignes de défense suivantes et leur combinaison* :

- *le nombre et la performance des scellements de galerie,*
- *la distance entre les quartiers de stockage et la base des liaisons surface-fond,*
- *et le positionnement des quartiers de stockage par rapport aux liaisons surface-fond.* »

L'ASN précisait que « *l'architecture retenue dans la demande d'autorisation de création sera justifiée par une étude des avantages et inconvénients de différentes options, en considérant les aspects relatifs à la sûreté et à la radioprotection en exploitation et à long terme* » [38].

Dans le DDAC, pour justifier l'architecture qu'elle retient, l'Andra présente une étude de sensibilité de la capacité globale de confinement à la deuxième ligne de défense précitée. En l'absence de compléments apportés au cours de l'expertise sur les deux autres axes, un échange technique s'est tenu à leur sujet après la réunion préparatoire du 8 avril 2025. PSE-ENV rappelle à cet égard que seule une comparaison de plusieurs options d'architecture combinant les différentes lignes de défense, appelée par la demande de l'ASN précitée, au regard de critères relatifs à la sûreté en exploitation et après fermeture, est de nature à démontrer qu'une architecture donnée est optimisée. **Aussi, l'expertise menée par PSE-ENV ne peut être conclusive sur le caractère optimisé de l'architecture retenue.** Le présent chapitre examine néanmoins la sensibilité de la performance de confinement après fermeture du stockage à chacune des lignes de défense précitées prises isolément (chapitres 7.1 à 7.3), puis à l'ajout d'un puits dans la ZSL étudié par l'Andra en tant que piste d'optimisation (chapitre 7.4).

Les autres pistes d'optimisation de conception et d'architecture considérées par l'Andra dans le DDAC, relatives aux dimensions des alvéoles (diminution du diamètre des alvéoles MA-VL et de leur nombre, etc.), ne modifient pas, d'après les études de sensibilité présentées, le comportement hydraulique du stockage et le transfert des radionucléides à long terme. PSE-ENV convient que ces modifications, de même nature que celles identifiées et examinées au stade du DOS, ont peu d'influence sur la capacité globale de confinement du stockage ; elles ne sont donc pas analysées plus avant dans la suite de ce chapitre.

7.1. DISTANCE ENTRE LE QUARTIER DE STOCKAGE MA-VL ET LA BASE DES LSF

Dans le DDAC, l'Andra présente une étude de sensibilité qui évalue l'effet sur la performance de confinement du stockage de la distance entre la base des LSF et les alvéoles MA-VL contenant les inventaires radiologiques les plus importants [47][101]. Cette étude [101], du même type que celle réalisée au stade du DOS pour la configuration alors retenue (distance de 300 m notamment), se base sur l'architecture retenue au stade du DDAC, dans laquelle cette distance est de 700 m. L'Andra étudie l'effet d'une réduction de cette distance à 500 m puis à 300 m, en modifiant la position de la galerie de recoupe située au nord-est du quartier de stockage MA-VL (cf.

Figure 4). Sur ce point, PSE-ENV attire l'attention sur l'importance du positionnement de cette recoupe dans l'architecture retenue au stade du DDAC et souligne que toute modification ultérieure éventuelle de son positionnement serait susceptible de modifier l'évaluation de la performance de confinement du stockage.

L'Andra retient l'¹²⁹I comme radionucléide d'intérêt et évalue la performance du confinement, en fonction des trois distances retenues, pour le SEN (situation enveloppe) ainsi que pour les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements, sur la base des paramètres de la situation de référence du SEN. Au vu des résultats de l'Andra, PSE-ENV constate principalement que, pour le scénario *What-if* basé sur la situation de référence du SEN, la contribution de la voie « ouvrages » devient prépondérante pendant respectivement environ 170 000 ans et 250 000 ans pour des galeries de 500 m et 300 m, alors que la voie COx demeure la voie principale de transfert jusqu'à un million d'années pour une longueur de galerie de 700 m. PSE-ENV estime que ces résultats confirment, comme au stade du DOS [36], l'intérêt d'un allongement de la distance entre le quartier de stockage MA-VL et la base des LSF, dans la mesure où il permet de retarder et d'atténuer le transfert des radionucléides par la voie « ouvrages ». En effet, la surface d'échange entre les ouvrages et le COx augmente avec la distance entre le quartier de stockage MA-VL et la base des LSF et favorise ainsi le transfert des solutés par la voie « COx ». En outre, comme souligné au stade du DOS s'agissant des radionucléides de période relativement courte dans le contexte du stockage géologique (comme le ¹⁴C), l'augmentation de leurs temps de transfert à travers les ouvrages augmente et contribue à atténuer leurs flux. Dès lors, PSE-ENV regrette que l'Andra n'ait pas étudié un allongement de la distance retenue au stade du DDAC afin d'en évaluer les effets sur l'atténuation des débits de radionucléides par la voie « ouvrages ». PSE-ENV convient toutefois, comme au stade du DOS [36], que l'effet d'un allongement au-delà de 700 m est moindre pour les radionucléides à vie plus longue tels que l'¹²⁹I, le ³⁶Cl, et le ⁷⁹Se. Aussi, **PSE-ENV estime que l'allongement de la distance entre le quartier de stockage MA-VL et la base des LSF, de 300 m au stade du DOS à 700 m dans l'architecture retenue au stade de la DAC, constitue une optimisation, par rapport au DOS, bénéfique pour la sûreté après fermeture du stockage.**

7.2. POSITION DU QUARTIER DE STOCKAGE MA-VL PAR RAPPORT A LA ZSL

Comme indiqué *supra*, l'Andra n'a pas présenté d'étude de sensibilité portant sur le positionnement des quartiers de stockage par rapport aux LSF, comme appelé par la demande de l'ASN (3^{ème} alinéa de la demande précitée). Au cours de l'expertise (échange technique après la réunion préparatoire), l'Andra a indiqué que l'architecture retenue au stade du DDAC résulte de la prise en compte d'un ensemble de contraintes liées à l'exploitation, à la sécurité, à la sûreté après fermeture, au coût, au territoire, etc. En particulier, s'agissant de la position du quartier de stockage MA-VL, elle a précisé que l'implantation centrale de la base des LSF de l'architecture du DDAC permet d'« optimiser la construction et la fermeture », ainsi que les distances à parcourir par les différents flux (travaux, acheminement des colis de déchets, ventilation et secours). Elle a indiqué en outre que ce positionnement permettait l'utilisation optimale de l'ensemble de la ZIOS pour le stockage des déchets, en vue en particulier de l'adaptabilité de l'architecture souterraine vis-à-vis du stockage de l'inventaire de réserve. Toutefois, les éléments d'analyse de l'Andra pour justifier de l'architecture retenue au stade du DDAC n'ont pas été fournis au cours de l'expertise.

PSE-ENV rappelle qu'au vu d'une part du rôle important joué par les scellements sur le fonctionnement hydraulique du système de stockage et, d'autre part, des incertitudes pesant au stade du DOS sur leur réalisation et leur performance (conception en cours, performances hydrauliques assignées non étayées par les expérimentations...), l'IRSN avait estimé nécessaire que l'Andra retienne, au stade du DDAC, une architecture de stockage qui procure une redondance avérée de la fonction des scellements de LSF. En particulier, l'IRSN avait souligné [36] que le positionnement des LSF en amont hydraulique du quartier MA-VL pourrait minimiser les transferts de radionucléides par les ouvrages. Compte tenu de ce rôle potentiellement important que peut jouer le positionnement des quartiers vis-à-vis des LSF, PSE-ENV a réalisé, en appui à la présente expertise, des calculs sur la base d'une architecture simplifiée représentant le quartier de stockage MA-VL en aval hydraulique des LSF, pour le SEN et pour le scénario *What-if* de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements (en situation de référence et enveloppe), qui montrent en effet un gain significatif en termes de prévalence de la voie « COx » sur la voie « ouvrages ».

Après la réunion préparatoire du 8 avril 2025 (échange technique précité), l'Andra a présenté des résultats de calcul dans le cas d'architectures positionnant le quartier de stockage MA-VL en aval hydraulique des LSF. Cette architecture est nommée ci-après « aval hydraulique ». De ces résultats portant sur l'étude du transfert des radionucléides ^{129}I , ^{36}Cl et ^{79}Se pour le SEN (en situation de référence et enveloppe) ainsi que pour les SEA et *What-if* de dysfonctionnement des scellements, il apparaît que les débits d'eau sortant aux LSF sont insignifiants dans l'architecture « aval hydraulique », même en cas de défaillance de l'ensemble des scellements. L'importance moindre des scellements dans cette architecture s'explique par leur sollicitation hydraulique réduite car le stockage est situé en aval hydraulique de la ZSL. Ainsi, en cas de dysfonctionnement des scellements, PSE-ENV estime ce gain significatif sur le comportement hydraulique du stockage procuré par le positionnement du quartier de stockage MA-VL en aval hydraulique des LSF, au regard de l'objectif de prédominance du transfert diffusif par la voie COx sur le transfert plus rapide par la voie « ouvrages », critère que PSE-ENV estime pertinent pour juger du bien-fondé des principes directeurs retenus pour l'architecture. S'agissant des transferts de radionucléides, dans les modélisations réalisées par l'Andra, l'architecture « aval hydraulique » permet de diminuer le pic de débit molaire du ^{79}Se au toit du COx (sortie LSF comprise) de moins d'un ordre de grandeur par rapport à celui de l'architecture retenue au stade du DDAC. PSE-ENV constate que cet écart se répercute sur la dose maximale (pilotee par le ^{79}Se , cf. chapitre 6.1 du présent rapport), évaluée par l'Andra à 0,25 mSv/an pour l'architecture « aval hydraulique » (dose maximale à l'enfant, en biosphère chaude, à l'exutoire de l'Oxfordien) par rapport à 0,3 mSv/an pour l'architecture au stade du DDAC. Ainsi, bien que l'architecture « aval hydraulique » permette d'assurer la prévalence de la voie « COx » sur la voie « ouvrages » dans le cas des scénarios de dysfonctionnements de scellements étudiés au stade du DDAC, PSE-ENV convient que le gain global procuré sur la performance de confinement et l'impact radiologique est faible. PSE-ENV rappelle toutefois à cet égard que la voie « ouvrages » est susceptible de conduire à des phénomènes d'accumulation localisés des solutés dans les encaissants et que l'atténuation de leur concentration est alors tributaire de la capacité de dilution des encaissants.

En conclusion, PSE-ENV estime significatif le gain en sûreté passive reposant sur le positionnement des quartiers de stockage en aval hydraulique de la base des LSF, dans la mesure où ce positionnement procure une redondance avérée aux scellements. Toutefois, PSE-ENV convient que les éléments mentionnés par l'Andra après la réunion préparatoire semblent montrer, d'une part, un gain limité en termes d'incidence sanitaire (quelques dizaines de pourcent au plus), d'autre part que l'implantation des quartiers autour de la base des LSF présente des avantages, en particulier en matière d'emprise du stockage limité à la ZIOS, en cohérence avec son engagement territorial, dans la perspective d'un stockage de l'inventaire de réserve. En tout état de cause, en l'absence d'une comparaison étayée, au regard de critères relatifs à la sûreté en exploitation et après fermeture, entre plusieurs options d'architecture combinant les lignes de défense appelées par la demande ASN précitée, et comme indiqué *supra*, **PSE-ENV ne peut se prononcer sur le caractère optimisé de l'architecture du stockage retenue au stade du DDAC, sans toutefois préjuger qu'elle ne le soit pas, et estime, comme à l'issue de l'expertise du DOS, que celle-ci fait reposer un poids supplémentaire sur les scellements de galerie du quartier de stockage MA-VL.** Ce point est examiné ci-dessous.

7.3. SCHELLEMENTS

PSE-ENV relève que l'Andra a réduit le nombre des scellements des galeries dans l'architecture retenue au stade du DDAC par rapport à celle retenue au stade du DOS, passant de 22 à 11, sans toutefois présenter de justification ni d'étude d'impact de ces évolutions. PSE-ENV rappelle que les scellements sont des ouvrages essentiels pour limiter le transfert de radionucléides par les ouvrages et, qu'en particulier, les scellements de galerie offrent une redondance des scellements des LSF (cf. chapitre 6.2 du présent rapport) en cas de dysfonctionnement de ces derniers. De plus, bien que PSE-ENV convienne que les scellements dans les quartiers de stockage HA sont peu sollicités sur le plan hydraulique, compte tenu de la position de ces quartiers en aval hydraulique des écoulements par rapport aux LSF (cf. [36]), elle souligne que la fonction des scellements de galerie ne se limite pas à s'opposer à la circulation de l'eau dans le stockage. En effet, ces scellements pourraient également contribuer à limiter, en le compartimentant, l'inventaire radiologique drainé par la présence d'un forage, et ainsi limiter les conséquences d'un scénario d'intrusion humaine (cf. chapitre 6.3 du présent rapport).

PSE-ENV rappelle [2] que les concepts de scellement retenus par l'Andra et présentés dans le DDAC sont encore à un stade de principes de conception. Un concept complet de scellement de galerie s'appuyant sur des résultats

tangibles quant à son caractère opérationnel tirés notamment du démonstrateur prévu *in situ* pendant la phase pilote est attendu lors du bilan de cette phase ; leur niveau de performance ne pourra en revanche pas être établi de manière probante au terme de la phase pilote compte tenu des durées très longues de restauration d'un tel scellement. Au regard de ces éléments, PSE-ENV regrette que l'Andra n'ait pas réalisé d'étude de sensibilité à différentes options (nombre et localisation) de scellements de galerie et intégrant les incertitudes relatives à la démonstration de leur performance. Elle rappelle à cet égard que la comparaison de plusieurs options est primordiale pour fonder la démonstration de l'optimisation de l'architecture. Par conséquent, **PSE-ENV estime que l'Andra devra fournir, pour la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique, l'étude d'options relatives aux scellements de galerie et notamment concernant leur nombre et leur localisation en intégrant une analyse de sensibilité à leur performance. Les résultats de ces études devront être examinés par l'Andra sous l'angle de la redondance des scellements de LSF, ainsi que sous l'angle de la potentielle fonction de compartimentage de l'inventaire, notamment en cas de SIHI.**

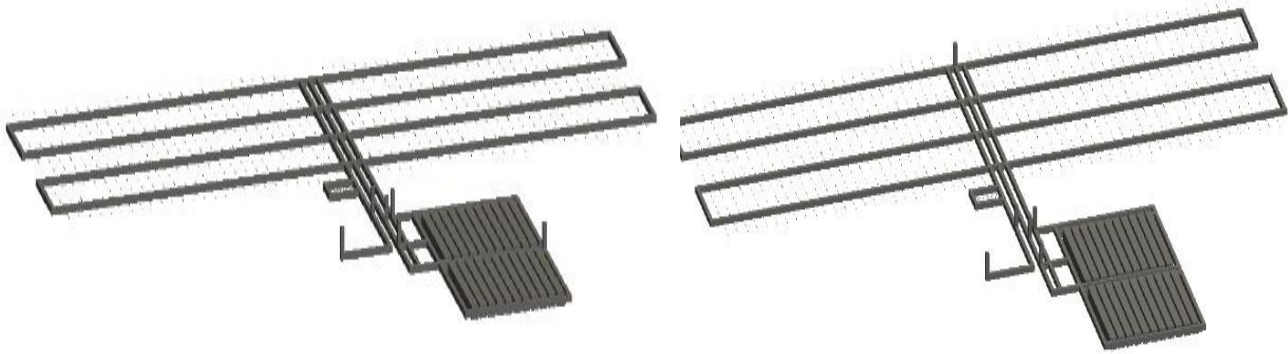
Ce point fait l'objet de l'**engagement 2025-E8** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. PSE-ENV estime que cet engagement est satisfaisant.

7.4. PUIS SUPPLEMENTAIRE

L'Andra évalue, dans ses études de sensibilité de la capacité globale de confinement à des options d'architecture, présentées au stade du DOS et du DDAC, l'influence d'un puits supplémentaire reliant la surface et la ZSL souterraine, où sont regroupées les arrivées de l'ensemble des LSF. L'Andra conclut à une faible influence de ce puits supplémentaire, de l'ordre de 20 % sur le débit molaire d'¹²⁹I en sortie des LSF en cas de dysfonctionnement de tous les scellements, ce dont PSE-ENV convient au vu des simulations de l'Andra.

Lors de l'expertise GP2 relative à la sûreté en phase d'exploitation [4], des modifications potentielles d'architecture ont été mentionnées au titre de la flexibilité/adaptabilité de Cigéo, dont la création d'un puits supplémentaire, en lien avec la maîtrise des délais d'intervention en cas d'incendie d'une part et pour la gestion des flux de fermeture d'autre part. Aussi, afin d'éclairer les conséquences à long terme de l'ajout d'un puits qui serait « décentralisé », PSE-ENV a évalué à des fins exploratoires, dans ses propres modélisations de l'évolution du stockage, les conséquences à long terme de l'ajout d'un puits dans le quartier de stockage HA ou le quartier MA-VL (cf. Figure 23) sur la performance globale de confinement.

PSE-ENV attire l'attention sur le fait que cette évaluation exploratoire ne vise pas à remettre en cause les grands principes d'architecture générale de l'installation souterraine retenus par l'Andra au stade du DDAC, que sont notamment le regroupement de l'ensemble des LSF et le caractère « borgne » des quartiers de stockage pour limiter les flux d'eau au sein du stockage (cf. chapitre 2 du présent rapport), mais bien à apprécier l'impact d'un éventuel renoncement partiel à ses principes sur la sûreté après fermeture. Une telle orientation ne saurait être retenue qu'à l'issue d'une analyse poussée de ses avantages et inconvénients en termes de sûreté et de radioprotection, en exploitation et à long terme, dans l'esprit de la demande de l'ASN relative à la justification de l'architecture au stade du DDAC (cf. *supra* et [38]).



(a)

(b)

Figure 23 : Architectures (a) « puits MA-VL » et (b) « puits HA » considérées par PSE-ENV.

Pour cette évaluation exploratoire, PSE-ENV considère les scénarios SEN et *What-if* de « dysfonctionnement de tous les scellements », sur la base des hypothèses et des données des situations de référence et enveloppe (stockage en position basse), telles que définies au chapitre 6.1 du présent rapport.

Pour ce qui concerne le comportement hydraulique du stockage, les résultats préliminaires obtenus pour le SEN et le scénario *What-if*, sur la base des situations de référence et enveloppe, montrent que l'ajout d'un puits, qu'il soit dans le quartier de stockage HA ou MA-VL, n'induit pas de hausse significative des débits d'eau sortant des LSF par rapport à l'architecture retenue au stade du DDAC. Cette hausse se limite en effet à une vingtaine de pourcents dans les scénarios SEN et *What-if*. Elle est toutefois plus importante, de l'ordre de 50 pourcents, pour le scénario *What-if* lorsque le puits est localisé dans le quartier de stockage HA, en raison du gradient hydraulique horizontal orienté vers le nord.

S'agissant du transfert des radionucléides, PSE-ENV observe que, quel que soit le scénario étudié (SEN ou *What-if*) et la situation considérée (référence ou enveloppe), l'ajout d'un puits intensifie le transfert des radioéléments considérés dans l'étude (^{129}I et ^{79}Se) par la voie « ouvrages », en comparaison avec l'architecture retenue au stade du DDAC. En SEN, la voie « COx » demeure toutefois largement prépondérante par rapport à la voie « ouvrages », et ce pour les deux situations considérées. Selon PSE-ENV, ces résultats préliminaires, dans le domaine d'évolution prévisible du système de stockage, tendent à montrer l'absence d'élément rédhitoire vis-à-vis de la sûreté après fermeture à l'ajout d'un puits déporté de la base des LSF, dès lors que les composants du système de stockage assurent leurs fonctions de sûreté.

Toutefois, en cas de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements dans la situation de référence, PSE-ENV constate que l'ajout d'un puits dans le quartier de stockage HA favorise plus significativement le transfert des radionucléides via la voie « ouvrages », en comparaison du SEN, par rapport à un puits localisé dans le quartier de stockage MA-VL. En outre, dans ce cas, l'ajout d'un puits dans le quartier de stockage MA-VL conduit à une co-dominance des voies de transfert pour les deux espèces mobiles, alors que la prédominance de la voie COx n'est pas remise en cause pour ce scénario avec l'architecture retenue au stade du DDAC (cf. chapitre 6.2.1 du présent rapport). En situation enveloppe, la voie « ouvrages » est très largement prépondérante lors de l'ajout d'un puits dans le quartier de stockage MA-VL ou HA (avec un ratio des pics de débits molaires « COx »/ « ouvrages » compris entre 10^{-1} et 10^{-2}), alors qu'une co-dominance était observée dans le cas de l'architecture retenue au stade du DDAC (cf. chapitre précité). Aussi, PSE-ENV estime en première approche, sur la base de ces évaluations quantitatives exploratoires, qu'en présence d'un puits dans les quartiers de stockage MA-VL ou HA, le dysfonctionnement de tous les ouvrages de scellement altérerait significativement la capacité globale de confinement du stockage.

En conclusion, les résultats préliminaires issus des évaluations quantitatives exploratoires menées par PSE-ENV laissent à penser que l'ajout d'un puits déporté de la base des LSF est conditionné à la démonstration de la performance des scellements.

8. ADAPTABILITE DU STOCKAGE

L'ASN [38] a demandé à l'Andra, au stade du DDAC, de « justifier qu'il n'y a pas d'élément rédhitoire au stockage des déchets de [l'] inventaire de réserve ». Les études et justifications doivent ainsi « permettre d'avoir la raisonnable assurance que la démonstration de sûreté pourra, le cas échéant, être confirmée pour les déchets de l'inventaire de réserve ». PSE-ENV rappelle que dans le cas où il serait envisagé de stocker dans Cigéo d'autres déchets que ceux autorisés par un décret pris sur la base du dossier objet de la présente expertise, une démonstration de sûreté complémentaire devra être apportée.

L'expertise par l'IRSN des données réunies par l'Andra relatives aux déchets de l'inventaire de réserve (connaissances des colis primaires, inventaires radiologiques et chimiques, modèles de relâchement des CU, etc.) et des évaluations préliminaires associées à l'inventaire de réserve dit « augmenté » (i.e. intégrant les déchets issus du projet NNF), réalisée dans le cadre du GP1, conclut à leur caractère suffisant pour fonder les études d'adaptabilité [2]. Dans ce cadre, l'IRSN n'identifie pas [2] d'élément de connaissances relatives à la géologie qui remette en cause l'adaptabilité de Cigéo aux inventaires de réserve, en particulier au regard de l'emprise du stockage ou de l'impact géomécaniques et thermo-hydraulique-gaz du stockage des CU en lien avec leur caractéristiques spécifiques (thermiques ou dimensionnelles notamment).

Le présent chapitre porte sur l'évaluation de la performance de confinement du système de stockage après fermeture pour les inventaires de réserve. Cette évaluation, présentée dans le DDAC [57] au stade esquisse de la conception de Cigéo, est basée sur les deux scénarios de politique énergétique prospectif « SR1 » et « SNR enveloppe », auxquels sont ajoutés les déchets FA-VL. Pour rappel, l'examen par PSE-ENV des risques liés à la criticité après fermeture du stockage au titre de l'adaptabilité est présenté au chapitre 5.1.1.2 du présent rapport.

8.1. DEMARCHE D'EVALUATION DE LA CAPACITE DE CONFINEMENT

Dans les études d'adaptabilité au stade du DDAC, l'Andra évalue la sûreté après fermeture du stockage en considérant les scénarios suivants :

- SEN basé sur la situation de référence ;
- SEN basé sur la situation enveloppe ;
- SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface, basé sur la situation enveloppe du SEN ;
- SIHI de forage abandonné à la profondeur du stockage, basé sur la situation enveloppe du SEN.

L'Andra justifie le choix de ce SEA par sa plus grande influence, constatée dans le cas du stockage de l'inventaire de référence (cf. chapitre 6.2), sur les débits molaires transitant par la voie « COx » et la voie « ouvrages » jusqu'au toit de la couche du COx. L'Andra précise que ce scénario couvre, en termes d'impact radiologique, le scénario SEA « dysfonctionnement de conteneur de stockage HA », d'après les enseignements tirés de l'évaluation de ce SEA pour l'inventaire de référence. Sur ce point, PSE-ENV convient que pour l'inventaire de réserve, la position en aval hydraulique des quartiers de stockage HA et CU par rapport aux LSF devrait, de la même manière que celle du quartier de stockage HA pour l'inventaire de référence, limiter l'influence d'une défaillance des conteneurs de stockage HA et CU. PSE-ENV convient également, au regard des résultats des évaluations des SIHI retenus par l'Andra pour l'inventaire de référence (cf. chapitre 6.3 du présent rapport), que le scénario retenu par l'Andra de forage abandonné à la profondeur du stockage est bien le plus pénalisant en termes d'indicateurs retenus pour l'évaluation de la performance de confinement du stockage et de sa robustesse.

Pour chacun des scénarios précités, l'Andra évalue la capacité globale de confinement du stockage sur la base des mêmes indicateurs que ceux retenus dans le cadre du stockage de l'inventaire de référence, ainsi que les impacts sanitaires au regard des mêmes objectifs de protection des personnes et de l'environnement (cf. chapitres 4.3 et 5.3 du présent rapport). De manière similaire, les mêmes biosphères, exutoires, groupes de référence hypothétique et classes d'âge que ceux présentés au chapitre 4.4 sont considérés par l'Andra dans le cadre des études d'adaptabilité au stade du DDAC [107]. S'agissant des substances toxiques chimiques, l'Andra a fourni au cours de l'expertise des éléments relatifs à leur impact pour le SEN en situation enveloppe du cas « SNR enveloppe + FA-VL ».

Des éléments ci-dessus, PSE-ENV constate que le cadre méthodologique donné par l'Andra aux évaluations de la capacité de confinement de Cigéo pour l'inventaire de réserve au stade des études d'adaptabilité est le même que celui qui fonde la démonstration de sûreté pour l'inventaire de référence. PSE-ENV estime par ailleurs que la sélection des scénarios par l'Andra, bien qu'elle n'intègre pas les scénarios *What-if* les plus pénalisants, permet d'apprécier en première approche la robustesse du stockage des inventaires de réserve pour un ensemble de scénarios ayant présentés des effets lors de l'évaluation du stockage de l'inventaire de référence. **Aussi, PSE-ENV convient que l'étude des scénarios d'évolution sélectionnés par l'Andra permet dans son principe de fournir une première évaluation de la sûreté à long terme, en vue de justifier de l'absence d'obstacle rédhibitoire au stockage de l'inventaire de réserve dans Cigéo.**

Dans les chapitres suivants, PSE-ENV examine la conceptualisation puis l'évaluation quantitative présentées par l'Andra pour les quatre scénarios d'évolution qu'elle retient dans le cadre de ses études d'adaptabilité au stade du DDAC.

8.2. EVALUATION DE LA PERFORMANCE DU STOCKAGE

8.2.1. Conceptualisation des scénarios

S'agissant des modèles de relâchement, l'Andra suppose que l'inventaire radiologique et chimique des CU est relâché en deux phases (relâchement instantané « IRF », puis relâchement congruent avec la dissolution progressive de la matrice combustible), selon les modèles expertisés lors du GP1 [2], et que celui des déchets FA-VL est relâché de façon labile (sur un an) dès la fermeture du stockage. Les hypothèses associées au relâchement des colis MA-VL et HA communs à ceux de l'inventaire de référence sont renouvelées dans le cas des études d'adaptabilité.

En termes d'inventaire, l'Andra précise que dans le cas « SR1 », il augmente de 16%, 17% et 10% respectivement pour l'¹²⁹I, le ³⁶Cl et le ⁷⁹Se par rapport à l'inventaire de référence. Dans le cas « SNR enveloppe », il augmente d'un facteur 24 et de 4% respectivement pour l'¹²⁹I et le ⁷⁹Se par rapport à l'inventaire de référence, et diminue de 0,35% pour le ³⁶Cl [57]. PSE-ENV estime pertinents les inventaires retenus par l'Andra dans ses études d'adaptabilité (cf. GP1, [2]). Par ailleurs, l'Andra précise [57] que les CU ainsi que les déchets FA-VL n'introduisent pas de substances toxiques différentes par rapport à ceux de l'inventaire de référence. PSE-ENV note que le stockage de CU, pour l'inventaire de réserve et l'inventaire de réserve « augmenté », fait apparaître au sein du quartier des substances toxiques chimiques en quantité plus importante que dans le quartier HA de l'inventaire de référence [134][135][136], notamment l'uranium (dont la quantité est multipliée par 88 par rapport à l'inventaire de référence dans le cas « SNR enveloppe »), ainsi que le chrome et le nickel dans une moindre mesure. A cet égard, PSE-ENV rappelle que dans le cadre du GP1 [2], l'Andra s'est engagée (2024-E3) à présenter, avant l'enquête publique, un programme d'étude visant à consolider l'inventaire en substances toxiques chimiques à considérer pour l'étude d'impact de Cigéo. **Il appartiendra à l'Andra d'intégrer à ce programme d'études des éléments en lien avec la consolidation de l'inventaire en substances toxiques chimiques de l'inventaire de réserve, afin de justifier son caractère raisonnablement enveloppe dans les prochaines études d'adaptabilité.**

Concernant la distribution de l'inventaire radiologique dans les quartiers de stockage des CU et des déchets FA-VL, l'Andra retient :

- une distribution de l'inventaire des CU cohérente avec des chroniques de livraison intégrant un temps de refroidissement des CU en entreposage permettant le respect du dimensionnement THM de leur quartier de stockage ;
- une distribution de l'inventaire FA-VL pénalisante vis-à-vis du transfert des solutés par les ouvrages, en considérant un remplissage des alvéoles par activité décroissante en ¹²⁹I depuis le nord-ouest du quartier de stockage, plus proche de la base des LSF. Le choix de l'¹²⁹I permet de favoriser le court-circuit de la voie de transfert « COx » par celle dite « ouvrages », en raison de sa demi-vie élevée (16 millions d'années) et de sa forte mobilité.

PSE-ENV constate que ces deux modes de distribution sont cohérents avec ceux retenus par l'Andra pour les déchets HA et MA-VL dans le cadre de l'évaluation de sûreté du stockage de l'inventaire de référence et considère, pour les mêmes raisons (impact limité de la répartition dans le quartier HA compte tenu de sa position en aval

hydraulique par rapport aux LSF, voie de transfert « ouvrages » favorisée pour les déchets FA-VL notamment), **qu'ils sont pertinents** (cf. chapitre 6.1.1 du présent rapport).

S'agissant de la forme chimique du sélénium, dont la spéciation au sein des déchets impacte sa vitesse de transfert dans le COx [120], l'Andra précise que le sélénium au sein de la matrice combustible est principalement à l'état réduit (-II), forme peu soluble. Elle considère également la présence de Se(VI), plus mobile, dans certains composants des CU et pour l'IRF du ⁷⁹Se, et postule une fraction de sélénium sous cette forme dans le quartier de stockage des CU de 4% en situation de référence du SEN et de 6% en situation enveloppe. Dans le cas des déchets FA-VL, en l'absence de connaissance sur sa spéciation, l'Andra considère 100 % du sélénium sous sa forme (+VI), ce qui est pénalisant. **PSE-ENV convient que ces hypothèses sont adaptées en première approche en regard de la littérature disponible pour ce qui concerne le degré d'oxydation du ⁷⁹Se dans les matrices combustibles [137][138]. PSE-ENV relève toutefois que cette littérature reste limitée et, au regard de la contribution importante du sélénium à l'impact radiologique, encourage l'Andra à maintenir une veille scientifique sur le sujet de sa spéciation au sein des matrices combustibles et dans les composants des assemblages.**

Les autres hypothèses considérées par l'Andra (position du stockage dans la couche du COx, paramètres hydrauliques et de transfert, nature des exutoires, positions des scellements, etc.) sont les mêmes que celles retenues par l'Andra pour les évaluations de sûreté du stockage de l'inventaire de référence. A cet égard, il convient de souligner que l'Andra ne prend pas en compte, dans ses évaluations de sûreté du stockage de l'inventaire de réserve en situation enveloppe du SEN, de conductivité hydraulique du COx sain ni de gradient hydraulique vertical pénalisants, tels que retenus par PSE-ENV (cf. chapitre 6.1 du présent rapport).

8.2.2. Scénario d'évolution normale

L'Andra axe les évaluations de la capacité globale de confinement du stockage des inventaires de réserve sur les trois radionucléides mobiles à vie longue qui pilotent les impacts radiologiques dans le cadre du stockage de l'inventaire de référence (¹²⁹I, ⁷⁹Se et ³⁶Cl) et présente les résultats à l'aide d'indicateurs de performance évalués au regard des trois fonctions de sûreté assignées au stockage (cf. chapitre 4.2 du présent rapport).

Evaluations du comportement hydraulique et de la performance du confinement

S'agissant du comportement hydraulique du stockage en lien avec la fonction de sûreté « *s'opposer à la circulation d'eau* », les débits d'eau en sortie des LSF pour les deux cas étudiés au titre de l'adaptabilité (« SR1 » et « SNR enveloppe ») sont du même ordre de grandeur que ceux déterminés pour l'inventaire de référence, en situations de référence et enveloppe du SEN. L'Andra conclut à un comportement hydraulique similaire du stockage pour les inventaires de référence et de réserve, ce dont PSE-ENV convient, notamment sur la base des résultats de ses propres simulations présentés en Annexe T8 du présent rapport.

L'Andra observe, dans ses études d'adaptabilité en SEN, que les débits molaires au cours du temps estimés au toit et au mur du COx ainsi qu'en sortie des LSF, pour les situations de référence et enveloppe, confirment la prépondérance de la voie de transfert par le COx par rapport à la voie « ouvrages », comme pour l'inventaire de référence en SEN (cf. chapitre 6.1). Ces résultats sont en outre cohérents avec la tendance mise en évidence par l'Andra au stade du DOS, pour le stockage prenant en compte les CU [14].

Ces débits molaires au cours du temps montrent, pour les situations de référence et enveloppe, des profils et des pics similaires pour les deux cas d'adaptabilité « SR1 » et « SNR enveloppe », hormis pour l'¹²⁹I dont le pic de débit molaire en sortie du COx dans le cas « SNR enveloppe » est supérieur, pour la situation enveloppe, de plus d'un ordre de grandeur à celui estimé dans le cas « SR1 » et pour le SEN avec l'inventaire de référence (respectivement 0,1 et 4.10⁻³ mol/an). Cette différence s'explique par la fraction d'iode importante localisée dans le quartier CU dans le cas « SNR enveloppe », qui migre principalement par la voie COx. PSE-ENV relève toutefois que cette forte concentration d'iode n'impacte pas le débit molaire en sortie des LSF en situation de référence, du fait en particulier de la localisation du quartier CU en aval hydraulique des LSF. En effet, l'¹²⁹I en sortie des LSF provient principalement du quartier pilote HA, du fait de sa proximité avec les LSF. La proportion de l'inventaire initial en ¹²⁹I provenant de la zone HA relâchée à 1 million d'années, évaluée à 2.10⁻⁶% par l'Andra, est par conséquent similaire à celle du SEN avec l'inventaire de référence (<10⁻⁶%). En situation enveloppe du

SEN, l'¹²⁹I en sortie des LSF provient principalement des quartiers MA-VL et FA-VL (respectivement 0,7% et 0,1% de l'inventaire initial), comme pour l'inventaire de référence (0,25%). Par ailleurs, PSE-ENV note que le débit molaire maximum d'¹²⁹I en sortie du COx provenant du quartier de stockage FA-VL est inférieur d'un ordre de grandeur à celui du quartier de stockage MA-VL (respectivement $4 \cdot 10^{-5}$ mol/an et $3 \cdot 10^{-4}$ mol/an pour la situation de référence), en accord avec les inventaires en ¹²⁹I présents dans ces deux quartiers (cf. Annexe T6).

PSE-ENV a évalué, par des simulations réalisées en propre (cf. Annexe T8), la performance du confinement dans le cas « SNR enveloppe » basé sur la situation enveloppe du SEN, en considérant uniquement les quartiers de stockage HA et CU. Le comportement hydraulique ainsi que les débits molaires pour les éléments mobiles ¹²⁹I, ⁷⁹Se et ³⁶Cl, ainsi que pour l'²³⁸U, élément moyennement sorbé mais présent en quantité importante dans les CU, ont été déterminés en sortie de la roche hôte par les voies « ouvrages » et « COx ». Les pics de débit molaire sont plus élevés et précoces que ceux calculés par l'Andra, en cohérence avec l'adoption d'hypothèses plus conservatives par PSE-ENV pour ce qui concerne la conductivité hydraulique du COx sain et le gradient hydraulique vertical (cf. Chapitre 6.1). Par exemple, les pics de débits molaire d'¹²⁹I et de ⁷⁹Se au toit du COx sont respectivement quatre et deux fois plus élevés que ceux calculés par l'Andra au niveau du quartier de stockage HA/CU, et leur occurrence plus précoce de 50 000 et 110 000 ans. Sur la base de ses résultats et de ceux présentés par l'Andra. **PSE-ENV convient, s'agissant du transfert des radionucléides, que les principaux enseignements tirés de l'évaluation de performance du confinement en SEN pour l'inventaire de référence sont transposables aux inventaires de réserve**, à savoir la prépondérance de la voie de transfert par le COx et le bénéfice du positionnement du quartier de stockage HA et/ou CU en aval hydraulique des puits, vis-à-vis des transferts des radionucléides via les LSF. PSE-ENV souligne toutefois que l'évaluation par l'Andra, en situation enveloppe du SEN, du débit molaire accru en ¹²⁹I en sortie du COx, n'intègre pas les incertitudes existantes relatives à l'origine de la surpression interstitielle et à la conductivité hydraulique du COx sain et pourrait donc être légèrement sous-estimée, de même que son incidence sur les évaluations d'impact sanitaire présentées ci-après.

Enfin, l'Andra a présenté au cours de l'expertise l'évaluation de la performance de confinement du stockage pour le cas « SNR enveloppe » avec l'inventaire de réserve « augmenté », dit « arrêt du recyclage », basé sur la situation enveloppe du SEN et conclut de son évaluation à un impact limité de l'intégration des déchets issus du projet NNF par rapport au cas « SNR enveloppe ». Sur la base de ses propres simulations et hypothèses, présentées en Annexe T8 au présent rapport, PSE-ENV observe des pics de débit molaire de l'¹²⁹I et de l'⁷⁹Se au toit du COx plus élevés de quelques dizaines de pourcents au niveau du quartier de stockage HA/CU par rapport au cas « SNR enveloppe ». Aussi, PSE-ENV convient d'un niveau de confinement pour le cas « arrêt du recyclage » du même ordre que celui estimé pour le cas « SNR enveloppe ».

Evaluations d'impact sanitaire

Concernant le SEN en situation de référence du cas « SNR enveloppe », l'Andra détermine la dose maximale de $2,4 \cdot 10^{-2}$ mSv/an à l'exutoire du Dogger pour une biosphère chaude et pour les enfants de 10 ans. PSE-ENV relève que cette dose est pilotée par l'iode avec une valeur maximale du cumul de dose atteinte à 700 000 ans, alors que dans le cas de l'inventaire de référence, la dose est pilotée par le ³⁶Cl puis le ⁷⁹Se (valeur maximale du cumul de dose atteinte vers 500 000 ans). Ce résultat est cohérent, selon PSE-ENV, avec l'inventaire plus important en ¹²⁹I, en lien avec le stockage de CU. La dose pour l'adulte est de $1,4 \cdot 10^{-2}$ mSv/an, également pilotée par l'¹²⁹I. PSE-ENV constate ainsi que le cas « SNR enveloppe », le plus pénalisant, conduit à une dose supérieure d'environ un et deux ordres de grandeur par rapport au SEN avec l'inventaire de référence pour respectivement l'enfant et l'adulte (soit respectivement, à l'exutoire du Dogger, $1,5 \cdot 10^{-3}$ mSv/an et $5,2 \cdot 10^{-4}$ mSv/an). **Aussi, en situation de référence du SEN, représentative de l'évolution la plus probable du stockage au regard des connaissances actuelles, PSE-ENV estime que le stockage des déchets des inventaires de réserve ne devrait pas induire d'impact inacceptable à long terme.** Par ailleurs, comme pour l'inventaire de référence, les groupes étudiés en sensibilité montrent des incidences légèrement supérieures à celles du groupe de référence « multi-activité » (cf. chapitre 4.4 du présent rapport).

En situation enveloppe, l'Andra obtient les doses maximales à l'exutoire de l'Oxfordien (ZFD) pour une biosphère chaude et l'enfant de 1 an, avec des valeurs respectives de 0,29 mSv/an et 0,39 mSv/an dans les cas « SR1 » et « SNR enveloppe », contre 0,25 mSv/an dans la situation enveloppe du SEN pour l'inventaire de référence. Pour l'adulte, ces doses sont respectivement de $6,7 \cdot 10^{-2}$ mSv/an et 0,15 mSv/an. Elles sont pilotées, pour l'adulte et

l'enfant de 1 an, par le ^{79}Se pour le cas « SR1 », et l' ^{129}I et le ^{79}Se pour le cas « SNR enveloppe ». En outre, PSE-ENV souligne que les propriétés hydrauliques du COx intégrant l'ensemble des incertitudes (cf. *supra*) n'ont pas été retenues par l'Andra dans ses évaluations et estime de ce fait, au vu de l'expertise présentée au chapitre 6.1 du présent rapport, que les doses maximales pourraient s'élever à des valeurs de l'ordre de 1 mSv/an. Les évaluations réalisées en situations enveloppe du SEN, évolution du stockage intégrant les incertitudes cumulées de l'ensemble des paramètres du stockage, conduisent ainsi à des évaluations d'incidences sanitaires qui demeurent du même ordre de grandeur que celles évaluées en situation enveloppe de l'inventaire de référence, et donc ne présentent plus de marge au regard de la valeur de référence en SEN (0,25 mSv/an). PSE-ENV considère néanmoins que ce résultat doit être nuancé au regard du caractère très conservatif du scénario analysé, comme indiqué au chapitre 5.3. **Aussi, PSE-ENV estime que l'évaluation du SEN basé sur la situation enveloppe, sans constituer à ce stade de point rédhibitoire au stockage des inventaires de réserve, montre, comme pour l'inventaire de référence (cf. chapitre 6.1), le besoin de réduire certaines incertitudes au titre de l'adaptabilité. Ces incertitudes, de même nature que pour l'inventaire de référence, concernent notamment les connaissances relatives à la roche hôte, en particulier la solubilité du sélénium ainsi que les paramètres hydrauliques que sont la surpression et la conductivité hydraulique.** A cet égard, PSE-ENV a pris acte lors du GP1 des études menées et prévues par l'Andra pour l'inventaire de référence afin d'approfondir les connaissances relatives à ces paramètres [91][126], dont les résultats pourront être mis à profit en vue d'apporter le cas échéant, en temps voulu, la démonstration de la sûreté du stockage des inventaires de réserve.

Au cours de l'expertise, l'Andra a présenté une évaluation de l'impact des substances toxiques chimiques pour la situation enveloppe du SEN du cas « SNR enveloppe ». L'Andra souligne que par rapport à l'inventaire de référence, l'uranium montre une augmentation de la concentration à l'exutoire comprise entre un facteur 3 (exutoire « pompage dans l'Oxfordien ») et un facteur 5 (exutoire « pompage dans le Dogger »), et le sélénium une augmentation d'un facteur 2 (exutoire « pompage dans le Dogger »), en cohérence avec les quantités accrues de ces éléments dans l'inventaire de réserve. PSE-ENV note que les maximums de concentrations des substances toxiques chimiques observés à l'exutoire de l'Oxfordien sont d'environ trois ordres de grandeur inférieurs aux NQ. **Ces premiers éléments d'appréciation de l'impact liés aux substances toxiques chimiques de l'inventaire de réserve n'appellent pas de remarque de la part de PSE-ENV.**

8.2.3. SEA adaptabilité dysfonctionnement de tous les scellements

L'Andra évalue la performance de confinement du système de stockage avec l'inventaire de réserve pour le SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface entre le noyau argileux et les argilites, basé sur la situation enveloppe du SEN, en considérant les mêmes trois radionucléides mobiles à vie longue que pour le SEN. L'Andra montre que le comportement du ^{36}Cl et du ^{79}Se au sein du stockage est similaire à celui observé pour le SEA avec l'inventaire de référence, et ce dans les deux cas considérés dans les études d'adaptabilité, les quantités de ces radionucléides étant du même ordre de grandeur dans les inventaires de référence et de réserve. S'agissant de l' ^{129}I , bien que le transfert des radionucléides au toit du COx par la voie « ouvrages » augmente par rapport aux SEN enveloppe dans ces deux cas, le COx reste la voie de transfert principale sur un million d'années. Par ailleurs, comme pour le SEN enveloppe, le quartier de stockage MA-VL reste le principal contributeur au transfert par la voie « ouvrages », compte tenu de sa position en aval hydraulique des puits. Concernant le cas « SR1 », PSE-ENV note que les débits molaires maximaux de l' ^{129}I au toit du COx et en sortie des LSF, de même que leurs dates d'occurrence, sont similaires à ceux estimés par l'Andra dans le cadre de l'évaluation du SEA équivalent pour l'inventaire de référence, avec une voie « ouvrages » également prépondérante pendant environ 20 000 ans, avant que la voie « COx » ne devienne majoritaire jusqu'à un million d'années. Dans le cas « SNR enveloppe », l'inventaire en iode plus important dans le quartier de stockage des CU favorise significativement son transfert via le COx par rapport au SEA équivalent pour l'inventaire de référence (x40), tandis que les débits en sortie des LSF sont du même ordre de grandeur (avec un facteur 2 environ), comme pour l'inventaire de référence, du fait de la distance et de la localisation en aval hydraulique du quartier CU par rapport aux LSF. Ainsi, la migration via la voie « COx » est favorisée jusqu'à un million d'années. Enfin, les incidences sanitaires ne sont pas quantifiées par l'Andra, les débits molaires des éléments mobiles au toit du COx étant similaires à ceux obtenus pour le SEN en situation enveloppe des deux cas considérés pour les études d'adaptabilité.

Au vu des éléments ci-avant et en cohérence avec son expertise des évaluations présentées pour l'inventaire de référence (cf. chapitre 6.2 du présent rapport), **PSE-ENV convient que les estimations associées au stockage de l'inventaire de réserve pour les cas « SR1 » et « SNR enveloppe », ne remettent pas en cause les enseignements tirés des évaluations de performance de l'installation pour le stockage de l'inventaire de référence en cas de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements au niveau de leur interface (SEA).** Ainsi, les résultats de l'Andra, corroborés par les modélisations de PSE-ENV, montrent que quel que soit l'inventaire de référence ou de réserve étudié à ce stade et considéré dans ce scénario d'évolution altérée du stockage évalué en situation enveloppe, les phénomènes convectifs localement plus prononcés dans les ouvrages souterrains ne remettent pas en cause la robustesse du système de stockage, au regard des lignes de défense passives qui le constituent.

8.2.4. Scénario d'intrusion humaine involontaire

Au cours de l'expertise, l'Andra a fourni une évaluation du cas d'adaptabilité « SNR enveloppe + FA-VL » en considérant un scénario de forage d'exploitation géothermique visant le Trias abandonné à la profondeur du stockage, basé sur les hypothèses et données de la situation enveloppe du SEN. L'Andra a en outre précisé que cette évaluation est menée dans les mêmes conditions et en utilisant les mêmes données et hypothèses que celles postulées pour l'inventaire de référence. Le forage est localisé dans une galerie d'accès du quartier de stockage des CU, où l'activité en ¹²⁹I par unité de surface est la plus élevée, selon une approche analogue à celle retenue pour le forage dans le quartier de stockage HA associé à l'inventaire de référence.

S'agissant des incidences sanitaires d'un tel scénario, l'Andra présente les doses maximales ainsi que leur date d'occurrence pour les dix radionucléides de plus fort impact à l'exutoire « pompage dans le Barrois », dans une biosphère chaude et pour le groupe de référence hypothétique « multi-activités », couvrant les classes d'âge « adulte », « enfant de 10 ans » et « enfant de 1 an ». PSE-ENV rappelle que pour cette famille de scénario, l'impact radiologique constitue un indicateur de la robustesse de stockage [67][65] et doit être nuancé au regard de la vraisemblance du scénario retenu et de la sévérité des hypothèses qui le fondent. PSE-ENV note que la dose maximale est observée pour les enfants de 10 ans et 1 an, avec une valeur d'environ 0,9 mSv/an. Les principaux contributeurs à cette dose sont le ²²⁶Ra puis le ²¹⁰Pb, isotopes issus de la filiation radioactive de l'²³⁸U. PSE-ENV rappelle que, s'agissant d'un forage dans le quartier de stockage HA avec l'inventaire de référence, l'impact sanitaire maximum est de 60 µSv/an, et piloté par le ⁷⁹Se (cf. chapitre 6.3). PSE-ENV relève que le scénario d'intrusion humaine involontaire de type forage dans le quartier de stockage des CU, basé sur la situation enveloppe du SEN, induit des impacts qui sont de l'ordre de grandeur des objectifs de protection retenus pour ce type de scénarios (cf. chapitre 4.3), traduisant ainsi la robustesse du stockage.

Aussi, PSE-ENV convient que le stockage de l'inventaire de réserve le plus pénalisant parmi ceux étudiés à ce stade vis-à-vis d'un scénario d'intrusion (cas « SNR enveloppe » basé sur la situation enveloppe du SEN) ne remet pas en cause les enseignements tirés des évaluations de performance de l'installation pour le stockage de l'inventaire de référence en cas de forage abandonné à la profondeur du stockage, cas le plus pénalisant vis-à-vis d'un court-circuit hydraulique.

8.3. CONCLUSION

Au vu de l'ensemble des éléments ci-avant, PSE-ENV considère, à ce stade des études d'adaptabilité, que la capacité globale de confinement de Cigéo en cas de stockage des inventaires de réserve ne devrait pas être compromise en situation d'évolution normale du stockage. En outre, PSE-ENV estime que les évaluations des scénarios d'évolution altérée de type SEA « dysfonctionnement de tous les scellements » ou SIHI « forage abandonné à la profondeur du stockage » tendent à montrer la robustesse du stockage des inventaires de réserve vis-à-vis de ce type de scénarios. Cependant, si aucun élément rédhibitoire n'a été identifié à ce stade, certaines incertitudes - notamment sur la solubilité du sélénium et les propriétés hydrauliques du COx - mériteraient, comme pour l'inventaire de référence, d'être réduites afin de disposer de marges en situation enveloppe. PSE-ENV souligne à cet égard l'importance de poursuivre les efforts de consolidation des données précitées, ainsi que celles relatives aux déchets, en vue d'apporter le cas échéant, en temps voulu, la démonstration de sûreté du stockage de ces derniers.

9. CONCLUSION DU GP3

A la demande de l'ASN, l'expertise du dossier de demande d'autorisation de création (DDAC) de Cigéo est organisée selon trois groupements de thématiques : (i) les données de base retenues pour l'évaluation de sûreté de Cigéo, (ii) la démonstration de sûreté en phase d'exploitation et (iii) la démonstration de sûreté après la fermeture de l'installation. Le présent examen concerne le troisième et dernier groupement de thématiques (GP3).

En conclusion de son expertise, PSE-ENV estime pertinente la démarche retenue par l'Andra pour évaluer la sûreté de Cigéo après sa fermeture, fondée sur l'examen de sa performance de confinement via des scénarios d'évolution du stockage déduits d'une analyse globalement satisfaisante des risques sur le long terme et des incertitudes associées à la performance de ses composants. En particulier, la prise en compte dans ces scénarios d'événements perturbateurs supplémentaires (faille non détectée et effondrement d'un alvéole MA-VL en phase d'exploitation), en cohérence avec l'expertise du dossier d'options de sûreté (DOS), constitue une amélioration notable de la démonstration de sûreté de Cigéo. Concernant l'analyse des risques et des incertitudes, des justifications devront toutefois être apportées quant au caractère enveloppe de l'aléa sismique retenu pour le dimensionnement de certains composants, ainsi que celui des modèles d'évolution des alvéoles considérés dans les études de sûreté-criticité. S'agissant de la vérification des incidences radiologiques et chimiques au regard des objectifs de protection sanitaires et environnementaux, des compléments méthodologiques sur les évaluations d'impacts sanitaires chimiques sont attendus, sans toutefois être de nature à remettre en cause les ordres de grandeur estimés.

PSE-ENV considère que l'évaluation du scénario d'évolution prévisible du stockage, dite « normale » (SEN), montre une bonne capacité de confinement du système de stockage, même pour sa « situation enveloppe » qui cumule des données conservatives et des hypothèses pénalisantes. La poursuite des efforts de consolidation des données, en particulier relatives à la solubilité du sélénium ou encore aux propriétés hydrauliques de la formation géologique du Callovo-Oxfordien, reste néanmoins nécessaire afin de dégager des marges pour cette situation par rapport aux objectifs de protection. Bien que les scénarios de dysfonctionnement des scellements ou des conteneurs de stockage HA, ou encore d'effondrement d'un alvéole durant la phase d'exploitation, puissent conduire à des performances de confinement dégradées, PSE-ENV constate que les niveaux de leurs impacts sanitaires restent du même ordre de grandeur qu'en SEN. Ces impacts sont en revanche plus élevés (de l'ordre de quelques dizaines de mSv par an ou ponctuellement pour un foreur) pour les scénarios postulant une faille non détectée dans le quartier de stockage MA-VL ou une intrusion humaine involontaire (forage). A cet égard, PSE-ENV estime que ces impacts doivent être nuancés au regard de la très faible vraisemblance des scénarios retenus et de la sévérité des hypothèses qui les fondent. Au vu de l'ensemble de ces éléments et des résultats de ses propres modélisations, PSE-ENV estime que le système de stockage, dans l'architecture retenue, est robuste vis-à-vis de l'ensemble des événements perturbateurs considérés. Enfin, au regard de la durée séculaire de l'exploitation de Cigéo, une situation d'abandon du stockage avant sa fermeture constitue un scénario possible, régulièrement soulevée par la société civile, qu'il importe selon PSE-ENV de considérer afin d'en tirer des enseignements, notamment en matière de fermeture préventive anticipée du stockage, et ainsi d'en limiter les conséquences sur la sûreté à long terme.

Le principal point d'attention de PSE-ENV à l'issue de la présente expertise (GP3) concerne l'optimisation de l'architecture du stockage retenue au stade de la DAC. En effet, l'Andra n'a pas présenté de comparaison étayée, au regard de critères relatifs non seulement à la sûreté après fermeture mais aussi à celle en exploitation, entre plusieurs options relatives à l'architecture combinant différentes lignes de défense (*i.e.* longueur des galeries, positionnement des quartiers de stockage par rapport aux liaisons surface-fond (LSF), nombre et performance des scellements). Aussi, en l'absence d'une telle comparaison, PSE-ENV ne peut se prononcer sur le caractère optimisé de l'architecture du stockage retenue, sans toutefois préjuger qu'elle ne le soit pas. En outre, PSE-ENV souligne, comme au stade du DOS, que cette architecture confère une importance supplémentaire aux scellements des galeries en ne mettant pas à profit le gain avéré d'un positionnement du quartier de stockage MA-VL en aval hydraulique des LSF. A cet égard, PSE-ENV convient que des critères autres que techniques en lien notamment avec l'adaptabilité du stockage puissent intervenir dans les choix effectués. PSE-ENV estime néanmoins que la justification du nombre, de la localisation et de la performance des scellements des galeries dans l'architecture retenue reste à apporter. En tout état de cause, toute évolution future éventuelle de cette

architecture, par exemple au titre de la flexibilité ou de l'adaptabilité de Cigéo, devra selon PSE-ENV faire l'objet d'une justification sur la base d'une comparaison de différentes options d'optimisation, au regard de critères relatifs notamment à sa sûreté en exploitation et après fermeture.

Enfin, bien qu'aucun point réhibitoire lié à la sûreté après fermeture du stockage des inventaires de réserve n'ait été identifié à ce stade des études d'adaptabilité, PSE-ENV souligne que les efforts à mener pour démontrer l'absence de risque de criticité à long terme du stockage des CU restent substantiels, dès lors que le maintien de leur géométrie n'est plus garanti.

10. CONCLUSION GENERALE

Le dossier de demande d'autorisation de création (DDAC) pour le stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs HA et MA-VL constitue une étape essentielle dans le processus de développement de Cigéo. PSE-ENV souligne les avancées notables depuis le dossier d'options de sûreté (DOS) de la démonstration de sûreté de Cigéo, tant dans la constitution du socle de connaissances qui la fonde, que dans son évaluation en phase d'exploitation et après fermeture. PSE-ENV estime ainsi que cette démonstration a atteint le niveau de maturité requis à ce stade pour la plupart de ses composantes. Les compléments ou consolidations identifiés comme nécessaires à l'issue de l'expertise du DDAC ont pour le plus grand nombre fait l'objet d'un engagement de l'Andra en vue des prochaines étapes du développement de Cigéo. Parmi ceux-ci, les points d'attention majeurs soulevés par PSE-ENV sont développés ci-après.

Le premier point d'attention a trait aux incertitudes relatives aux propriétés de la roche hôte du Callovo-Oxfordien au droit des structures profondes observées dans le nord du quartier HA. Bien qu'elles soient intégrées dans la démonstration de sûreté après fermeture du stockage, elles devront être levées dans le cadre d'un programme de reconnaissance au cours de la phase industrielle pilote et en tout état de cause avant le creusement des galeries de liaison qui desserviront le quartier HA.

S'agissant des alvéoles de stockage, la maîtrise de l'atmosphère interne des alvéoles HA en phase d'exploitation présente des incertitudes fortes pour la conception actuelle au regard notamment des risques d'explosion. En outre, les données disponibles pour justifier le dimensionnement des composants métalliques de ces alvéoles vis-à-vis de la corrosion restent à ce stade marquées par des incertitudes significatives. Par ailleurs, la démonstration de sûreté des alvéoles MA-VL vis-à-vis des risques liés à l'incendie n'est pas acquise en phase d'exploitation pour le stockage en l'état des colis de déchets bitumés, ainsi que, dans une moindre mesure, en termes de maîtrise de l'atmosphère interne en phase de fermeture, vis-à-vis des risques d'explosion. PSE-ENV souligne que des évolutions de modes d'exploitation ou de conception pourraient de ce fait être nécessaires pour atteindre la démonstration de sûreté. Enfin, bien que des progrès ont été réalisés en matière de stratégie de surveillance, la représentativité de la surveillance déportée en alvéole témoin et, plus généralement, la définition des dispositions de surveillance des ouvrages de la première tranche, demandent encore une attention particulière.

Un point d'attention supplémentaire concerne les scellements, qui sont encore au stade de principes de conception et dont la démonstration de leur opérationnalité et de leur performance reste à apporter. Au vu de leur rôle essentiel pour la sûreté après fermeture, une méthode de creusement qui ne crée pas plus d'endommagement de la roche qu'une méthode mécanique devra être mise en œuvre au droit des zones à sceller. PSE-ENV estime en outre nécessaire que le nombre, la localisation et la performance des scellements des galeries soient justifiés, notamment au regard de leur rôle de compartimentage dans des situations d'intrusion humaine involontaire (forage).

Par ailleurs, en l'absence d'une comparaison étayée entre plusieurs options d'architecture, au regard de critères relatifs à la sûreté en exploitation et après fermeture comme demandée par l'ASN à l'issue de l'expertise du DOS, PSE-ENV ne peut se prononcer sur le caractère optimisé de l'architecture du stockage retenue au stade du DDAC, sans toutefois préjuger qu'elle ne le soit pas. Néanmoins, au vu des évaluations des scénarios d'évolution du stockage après fermeture et des impacts associés, le système de stockage avec l'architecture retenue au stade du DDAC montre une bonne performance globale de confinement et un comportement robuste vis-à-vis des risques et incertitudes liées à son évolution.

Les trois points d'attention ci-avant devront faire l'objet, comme d'autres points identifiés dans la présente expertise, de rendez-vous d'évaluation visant à examiner le bien-fondé des solutions techniques retenues, en amont de la prochaine grande étape réglementaire de mise en service de l'installation actuellement envisagée par l'Andra à l'horizon 2050 (par exemple avant le début du creusement, avant la construction du premier alvéole...). PSE-ENV confirme que la phase industrielle pilote est désormais indispensable pour compléter et consolider la démonstration de sûreté, sur la base notamment de démonstrateurs réalisés *in situ* dans des conditions d'environnement et de fonctionnement industriel, en vue de la mise en service de l'installation.

Enfin, PSE-ENV estime que la flexibilité de l'installation constitue un enjeu fondamental afin de garantir la gestion sûre de l'ensemble des déchets de l'inventaire de référence, y compris en cas d'évolution de l'architecture ou de

la conception de l'installation considérées au stade de la DDAC. S'agissant de l'adaptabilité de Cigéo à l'inventaire de réserve, PSE-ENV n'identifie pas, à ce stade des études, de point réhibitoire lié à la sûreté du stockage des combustibles usés et des déchets FA-VL. PSE-ENV rappelle que dans le cas où il serait envisagé d'y stocker d'autres déchets que ceux autorisés par un décret pris sur la base du dossier objet de la présente expertise, une démonstration de sûreté complémentaire devra être apportée.

GLOSSAIRE

AEN	Agence pour l'énergie nucléaire
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
ARI	Analyse des risques et des incertitudes
ASN	Autorité de sûreté nucléaire
ASNR	Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEC	Colis de coques et embouts cimentés
CIP	Composant important pour la protection
CIPR	Commission internationale de protection radiologique
CP	Colis primaire
CSD-C	Conteneur standard de déchets compactés
CSM	Centre de stockage de la Manche
CtS	Conteneur de stockage
COG 800	Famille de colis vitrifiés produits selon la spécification 300 AQ 060
COx	Callovo-Oxfordien
CU	Combustibles usés
D&E	Demandes de l'ASN, engagements de l'Andra et recommandations des GPE
DAC	Demande d'autorisation de création
DDAC	Dossier de demande d'autorisation de création
DDM	Dossier détaillé de mémoire
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
DOS	Dossier d'option de sûreté
DSC	Descenderie colis
DSI	Descenderie intermédiaire
DSM	Dossier synthétique de mémoire
DSS	Descenderie de service
DT DAC Cigéo	Dialogue technique sur l'expertise de la demande d'autorisation de création de Cigéo
ECHA	Agence européenne des produits chimiques
FA-VL	Faible activité – vie longue
GA	Galerie d'accès
GLI	Galerie de liaison
GPD	Groupe permanent d'experts pour les déchets
GPE	Groupe permanent d'experts
GPU	Groupe permanent d'experts pour les laboratoires et usines
GRA	Galerie de retour d'air
HA	Haute activité
HAR	Démonstrateurs complets d'alvéole représentatif du quartier pilote HA
INB	Installation nucléaire de base
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
IRF	« Instant fraction release », fraction instantanée relâchée
IRSN	Institut de radioprotection de sûreté nucléaire
JRA	Jonction de retour d'air
LSF	Liaison Surface-Fond
LSMHM	Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (Andra)
MA-VL	Moyenne activité – vie longue

MF	Matière fissile
MFR	Milieu fissile de référence
MHM	Meuse/Haute-Marne
MOX	Mélange d'oxydes
MREA	Matériaux de remplissage annulaire
Mw	Magnitude de moment
NNF	Nouveau nucléaire français
NQ	Norme de qualité
PEC	Predicted Environmental Concentration
PCM	Pour cent mille
PIVER	Installation pilote de vitrification (Marcoule)
PN	Propulsion nucléaire navale
PNEC	Predicted No Effect Concentration
PNGMDR	Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs
PSE-ENV	Direction de la recherche et de l'expertise en environnement
REP	Réacteur à eau pressurisée
SDD	Séisme de dimensionnement
SEA	Scénario d'évolution altérée
SEN	Scénario d'évolution normale
SIHI	Scénario d'intrusion humaine involontaire
SDD	Spectre de dimensionnement
SMHV	Séisme maximal historiquement vraisemblable
SMPP	Spectre maximal physiquement possible (spectre sismique après fermeture)
SNR	Scénario de non-renouvellement
SR1	Scénario de renouvellement 1
SR2	Scénario de renouvellement 2
SR3	Scénario de renouvellement 3
THM	Thermo-hydrromécanique
UA	Unité argileuse
UNE	Uranium naturel enrichi
URE	Uranium de retraitement enrichi
USC	Unité silto-carbonatée
UT	Unité de transition
VVE	Puits de retour d'air vicié de la zone exploitation
ZBS	Campagne de forages ZIOS Boreholes Survey
ZFC	Zone de fracturation connectée
ZFC-f	Zone de fracturation connectée foisonnée
ZFD	Zone de fracturation discrète
ZIOS	Zone d'implantation des ouvrages souterrains (2023)
ZIRA	Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (2009)
ZSL	Zone de soutien logistique
ZSLE	Zone de soutien logistique « exploitation »
ZSLT	Zone de soutien logistique « travaux »
ZT	Zone de transposition des données du LSMHM

RÉFÉRENCES

- [1] Lettre ASN/CODEP-DRC-2023-030596 du 7 juin 2023. Examen du dossier de demande d'autorisation de création du projet Cigéo – Saisine n°SAISI-DRC-2023-0093.
- [2] Rapport IRSN n°2024-00212. Demande d'autorisation de création du projet Cigéo – « GP1 » – Evaluation des données de base retenues pour l'évaluation de sûreté. Rapport établi en support à l'avis IRSN/2024-00051 du 12 avril 2024.
- [3] Avis IRSN n°2024-00051 du 12 avril 2024. Demande d'autorisation de création du projet Cigéo – « GP1 » – Evaluation des données de base retenues pour l'évaluation de sûreté.
- [4] Rapport IRSN n°2024-00623. Demande d'autorisation de création du projet Cigéo – « GP2 » – Sûreté en phase d'exploitation. Rapport établi en support à l'avis IRSN/2024-00167 du 29 novembre 2024.
- [5] Avis IRSN n°2024-00167 du 29 novembre 2024 - Demande d'autorisation de création du projet Cigéo – « GP2 » – Sûreté en phase d'exploitation.
- [6] Avis CODEP-MEA-2024-028272 du 24 mai 2024 – avis du Groupe Permanent « Déchets » des 24 et 25 avril 2024 - DAC Cigéo : Evaluation des données de base retenues pour l'évaluation de sûreté de Cigéo.
- [7] Avis CODEP-MEA-2025-001992 du 10 janvier 2025 – avis du Groupe Permanent « Déchets » émis lors de sa réunion des 10 et 11 décembre 2024 - DAC Cigéo : Evaluation de sûreté en phase d'exploitation des installations de surface et souterraines.
- [8] Lettre CODEP-DRC-2025-022314 du 13 mai 2025. Examen du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation Cigéo. Réunion n°3 du GPD. Saisine n°SAISI-DRC-2025-0018.
- [9] Lettre Andra CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025 – engagements pris par l'Andra à l'issue de l'expertise du GP3.
- [10] Loi n°2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.
- [11] Guide n°1 de l'ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 12 février 2008.
- [12] 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.
- [13] Loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016 dite loi « Longuet-Namy » 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.
- [14] Lettre Andra DG/16-0105 du 6 avril 2016 - Dossier d'Options de Sûreté.
- [15] 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.
- [16] 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 ».
- [17] 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.
- [18] Avis DSU n°2009-166 du 22 décembre 2009 sur le choix d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie.

- [19] 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.
- [20] 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 ».
- [21] 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.
- [22] Avis ASN CODEP-DRC-2011-002092, Examen du « Dossier 2009 » relatif au projet HA-MAVL présenté devant le GPD les 29-30 novembre 2010.
- [23] Avis IRSN n°2013-00159 du 26 avril 2013 sur les évolutions du projet Cigéo au stade « Jesq03 » depuis le Dossier 2009.
- [24] 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.
- [25] Rapport IRSN n°2013-00001, Projet Cigéo – Examen des études remises depuis 2009, présenté devant le GPD le 5 février 2013.
- [26] Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » du 5 février 2013, « Avis relatif au projet de stockage CIGEO - Examen des études remises depuis 2009 ».
- [27] 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.
- [28] Rapport IRSN N°2014-00006, « Projet de stockage Cigéo – Ouvrages de fermeture », présenté devant le GPD le 1er juillet 2014.
- [29] 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 ».
- [30] Lettre ASN CODEP-DRC-2014-039040 du 9 octobre 2014 - Dossier « projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde — Ouvrages de fermeture ».
- [31] 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.
- [32] 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".
- [33] 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 ».
- [34] Avis IRSN-0348 du 6 novembre 2015 « Plan de développement des composants du projet Cigéo ».
- [35] Lettre ASN CODEP-DRC-2016-005220 du 20 juin 2016 – « Plan de développement des composants du projet Cigéo ».
- [36] Rapport IRSN 2017-00013 - Projet de stockage Cigéo — Examen du Dossier d'Options de Sûreté - Réunion des Groupes permanents d'experts pour les déchets et pour les laboratoires et les usines des 18-19 mai 2017.
- [37] Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » et « Usines » du 12 janvier 2018 - Dossier d'options de sûreté pour le projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde - CODEP-DRC-2018-001635.

- [38] Avis n°2018-AV-0300 du 12 janvier 2018 de l'ASN relatif au dossier d'options de sûreté présenté par l'Andra pour le projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde.
- [39] Lettre Andra DG/23.008 du 16 janvier 2023. Dossier de demande d'autorisation de création (DAC) pour une installation de stockage réversible en couche géologique profonde
- [40] Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances - Tome I du référentiel de site - L'histoire géologique et l'état actuel - CG-TE-D-RAP-AMOA-GE0-0000-20-0003.
- [41] Retraitement et interprétation de profils sismiques 2D pour la révision du schéma structural de la partie nord de la zone de fracturation diffuse et de la faille de Poissons – Rapport final. CG-RP-FGEO-22-009/A.
- [42] Pièce 16 – Plan directeur de l'exploitation. CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-19-0001-A.
- [43] Pièce 6 - Étude d'impact du projet global Cigéo - Volume II - Justification et description du projet global Cigéo - CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-V002-22-0005-A.
- [44] Pièce 7 - VPRS - PARTIE II : description de l'INB et de son environnement - Volume 4 - Le site d'implantation de l'INB et son environnement - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V004-21-0007-A.
- [45] Note conceptuelle : Le transfert des radionucléides - CG -TE-D-NTE-AMOA -OBS -0000-19-0004/A.
- [46] Pièce 7 - VPRS - PARTIE II : description et fonctionnement du centre de stockage - Volume 5 - Les installations, ouvrages et équipements - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V005-21-0007-A.
- [47] Pièce 7 - VPRS - PARTIE III : démonstration de sûreté - Volume 8 - La démonstration de sûreté après fermeture - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V008-21-0007-A.
- [48] Documents techniques support au dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Justification des choix de conception : Dossier de justification de la conception de l'alvéole HA CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0044/A.
- [49] Pièce 13 - Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance - CG-TE-D-PDG-AMOA-OBS-0000-19-0001-A
- [50] Documents techniques support au dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo Justification des choix de conception : Dossier de justification de la conception de l'alvéole MA-VL CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0045/A
- [51] Documents techniques support au dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo Justification des choix de conception : Dossier de justification de la conception des conteneurs de stockage HA CG-TE-D-DJC-AMOA-CS0-0000-19-0002/A
- [52] Pièce 7 - VPRS - PARTIE II : description de l'INB, de son environnement - Volume 3 - Les colis de déchets - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V003-21-0007-A.
- [53] Pièce 20 - Plan de développement de l'INB du centre de stockage - CG-TE-D-PDD-AMOA-SDR0000-19-0002-A.
- [54] Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture - CG-TE-D-DJC-AMOA-FER0000-19-0045-A.
- [55] Coupes descenderie colis - CG-TE-D-PLA-SCVG-ASU-4000-17-0003-A
- [56] Coupes descenderie service - CG-TE-D-PLA-SCVG-ASU-4000-17-0007-A
- [57] Documents techniques support au dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) - Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de déchets de l'inventaire de réserve - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-21-0016-A

- [58] Projet nouveau nucléaire français – Evaluation de l'impact sur les filières de gestion des déchets – Z-NT-ADG-21-0022 – Andra, 08/07/2021, Gouvernement, rapport « travaux relatifs au nouveau nucléaire », PPE 2019-2028, 2022
- [59] Lettre CODEP-DRC-2024-027947 du 30 mai 2024.
- [60] Programme de R&D sur la corrosion des conteneurs de stockage et chemisages des alvéoles HA post dépôt de la DAC CG-AMOA-LET-24-0011.
- [61] Synthèse des résultats à fin août 2024 du programme de R&D sur la corrosion des composants métalliques d'un alvéole HA post-dépôt de la DAC CG-AMOA-REP-24-0028.
- [62] Justification des choix de conception : Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo Les référentiels de connaissances - les matériaux innovants prospectifs pour Cigéo CG-TE-D-NTE-AMOA-MT0-0000-20-0002/A.
- [63] Lettre CG-AMOA-LET-24-0036 du 22 janvier 2025 – Projet Cigéo – Réponse à l'engagement 2024-E41 : Définition du Spectre de dimensionnement en phase d'exploitation.
- [64] Projet Cigéo – Réponse à l'engagement 2024-E41 : Définition du Spectre de dimensionnement en phase d'exploitation – Complément - CG-AMOA-LET- 25-0006
- [65] International Atomic Energy Agency (IAEA). Disposal of Radioactive Waste. SSR n°5.
- [66] International Atomic Energy Agency (IAEA). The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. SSG n°23.
- [67] ICRP, 2013. Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste - Publication n°122. Ann. ICRP 42(3)
- [68] Note support : Justification de la démonstration : Synthèse de l'analyse des risques et incertitudes après fermeture de Cigéo - CG-TE-D-NSY-AMOA-SR2-0000-20-0013/A
- [69] ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [70] An International Peer Review of the Safety Options Dossier of the Project for Disposal of Radioactive Waste in Deep Geological Formations (Cigéo): final report of the IAEA International Review team. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2016). N°IAEA/CIG/FRA. 43 p
- [71] ICRP, 2012 ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2).
- [72] Guide méthodologique ASN/IRSN pour l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages : concepts, éléments de base et mise en œuvre au sein de l'étude d'impact.
- [73] Beresford N., Brown J., Copplestone D., Garnier-Laplace J., Howard B.J., Larsson C.M., Oughton O., Pröhl G., Zinger I. (eds) (2007). D-ERICA: an integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionizing radiation. Description of purpose, methodology and application. Contract number: FI6R-CT-2004-508847. European Commission.
- [74] Andersson Pål, Garnier-Laplace Jacqueline, Beresford Nicholas A., Copplestone David, Howard Brenda J. Howe Paul, Oughton Deborah, Whitehouse Paul, Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context, (protect): proposed numerical benchmark values, Journal of Environmental Radioactivity 100 (2009) 1100–1108.
- [75] Ministère de de la santé et des solidarités. Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. Annexe I.

- [76] Institut national de l'environnement industriel et des risques. Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires. Démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées. Deuxième édition – Septembre 2021.
- [77] Agence internationale à l'énergie atomique. « Reference biospheres » for solid radioactive waste disposal. Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSEssment (BIOMASS) Programme. Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS). Vienne, Juillet 2003.
- [78] International Atomic Energy Agency (IAEA). Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2010) TRS N°472. 208 p.
- [79] Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Enquête alimentaire sur la zone OPE du Centre Meuse Haute-Marne de l'Andra. Synthèse des résultats. Référence SUR.NT.ASSE.14.0009 (2015).
- [80] Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) relatif à « la troisième étude individuelle nationale des consommations alimentaires (Etude INCA3) ». Rapport d'expertise collective. Juin 2017. Etude scientifique.
- [81] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSG-3, IAEA, Vienna (2013)
- [82] ICRP, 2006. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public. ICRP Publication 101a. Ann. ICRP 36 (3).
- [83] ICRP, 1998. Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 81. Ann. ICRP 28 (4).
- [84] Pièce 7 - VPRS - PARTIE II : description de l'INB, de son environnement - Volume 6 – L'organisation de l'Andra en tant qu'exploitant de l'INB Cigéo - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V006-21-0007-A.
- [85] NEA (2019), Preservation of Records, Knowledge and Memory Across Generations: Final Report, OECD Publishing, Paris
- [86] Pièce 7 - VPRS - PARTIE II : description de l'INB, de son environnement et de son fonctionnement et évolution du système de stockage après fermeture - Volume 7 - L'évolution phénoménologique du système de stockage après sa fermeture - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V007-21-0007-A.
- [87] 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.
- [88] Rapport Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-SML-4000-22-0001/A - évaluation du risque de sur-endommagement du Callovo Oxfordien sous l'effet de gonflement des déchets bitumés.
- [89] Saâdi Z., Dymitrowska M., Deleruyelle F. & Marsal F., 2020. An evaluation model of the impact of hydrogen 'piston effect' on water displacement in a deep geological disposal of radioactive waste. Environmental Earth Sciences (79):1-18.
- [90] Rapport final Andra - Influence du fluage à long terme des argilites sur les écoulements d'eau dans les ouvrages CG-RP-FEAP-190029/A.
- [91] Le programme des activités scientifiques et technologiques après le dépôt de la demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo. CG-TE-D-PRG-AMOA-AST-0000-22-0001.
- [92] Justification de la démonstration – Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo, Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques – CG-TE-D-LST-AMOA-TR0-

- 0000-20-0001-A – § 2.2 (pile sédimentaire), 2.17 (glaciations), 2.18 (effet d'un séisme à l'aplomb de la ZIRA).
- [93] Justification des données d'entrée – Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo – Les référentiels de connaissances – Tome I du référentiel de site – L'histoire géologique et l'état actuel – CG-TE-D-RAPAMOA-GE0-0000-20-0003-A – § 3.
- [94] Justification des données d'entrée – Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo – Les référentiels de connaissances – Tome III du référentiel de site – Évolution naturelle sur le prochain million d'années – CG-TE-D-NTE-AMOA-ESE-0000-20-0017 – § 4.2 (p.122 glaciations), 4.3 (SMPP), 5.2 (spectres), 5.3 (effets SMPP).
- [95] Justification des données d'entrée – Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo – Les notes conceptuelles – L'évolution du site de Cigéo sur le prochain million d'années du fait des évolutions géodynamiques et des effets en grand du stockage – CG-TE-D-NTE-AMOA-GE0-0000-20-0001 – § 2.2.3.3 p.31 (effets séismes sur le milieu géologique).
- [96] Justification des données d'entrée – Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo – Les notes conceptuelles – Modèle conceptuel du milieu géologique – CG-TE-D-NTE-AMOA-GE0-0000-19-0010 – (hydrogéologie).
- [97] Justification des données d'entrée – Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo – Les notes conceptuelles – Le modèle hydrogéologique à l'actuel et son évolution sur le prochain million d'années – CG-TE-D-NTE-AMOA -GE0-0000-20-0002 – (description du milieu géologique).
- [98] Pièce 8 – Étude de maîtrise des risques – CG -TE-D-ERQ-AMOA -SR0-0000-19-0037-A – § 4 (maîtrise des risques), 7.4 (impact sur les scellements, évolution des encaissants).
- [99] Compléments et modifications depuis les options de sûreté - CG-TE-D-NSY-AMOA -SR0-0000-20-0018-A – § 3.4.2.
- [100] Justification de la démonstration – Note d'analyse des risques liés au risque sismique – CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-20-0011-A (probabiliste et profondeur).
- [101] Justification des choix de conception : Dossier de justification des choix d'architecture souterraine – CG-TE-D-DJC-AMOA-AF0-0000-19-0001 – § 6.1.8 p.166 à 169 (effet d'un séisme, SMPP, PFDHA).
- [102] Rapport CG-RP-FGES-16-0065 du 24 juin 2016 : « Réévaluation de l'aléa sismique pour les futures implantations du projet Cigéo – Approches déterministe et probabiliste » - GTR/AND/0516-1436.
- [103] Thèse de doctorat d'Adrien Damon, Impact des forçages environnementaux sur l'activation des failles et la sismicité dans l'Est du Bassin de Paris (site Cigéo), <https://theses.fr/2023UMONG042>.
- [104] Damon A., S. Mazzotti, P. Vernant, R. Vachon, J. Grosset, F. Ego, D. Baumont, Impact of far-field glacially-induced stresses on fault stability in the eastern Paris Basin. *Tectonophysics*, 864 (2023), Article 230035, 10.1016/j.tecto.2023. 230035.
- [105] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The International Project on Inadvertant Human Intrusion in the Context of Disposal of Radioactive Waste, IAEA, Vienna (in preparation).
- [106] Pièce 6 : Étude d'impact du projet global Cigéo Volume 6 : Incidences sur la santé humaine CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE 0000-22-0005/A.
- [107] Justification de la démonstration - Choix et description des biosphères pour les évaluations d'impact à l'Homme après fermeture du stockage - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-19-0015/B.
- [108] Document Technique - Synthèse de l'évaluation des caractéristiques hydrauliques du Callovo-Oxfordien - CG-TE-D-NTE-AMOA-INS-0000-23-0005/A

- [109] Distinguin, M., & Lavanchy, J. M. (2007). Determination of hydraulic properties of the Callovo-Oxfordian argillite at the bure site: Synthesis of the results obtained in deep boreholes using several *in situ* investigation techniques. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(1-7), 379-392.
- [110] Delay J., Vinçot A., Krieguer J.-M., Rebours H., Armand G., 2007. Making of the underground scientific experimental programme at the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, North Eastern France. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(1-7) :2-18.
- [111] Enssle C.P., Cruchaudet M., Croisé J., 2011. Determination of the permeability of the Callovo-Oxfordian clay at the metre to decametre scale. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C* 36(17). DOI 10.1016/j.pce.2011.07.031
- [112] Groupement de laboratoires Transfert – Subatech - Objectif n° 4 Rôle de la variabilité minéralogique sur les propriétés de transfert de radionucléides (De, Kd), CRPFSTR1 20039
- [113] Note conceptuelle : Le transitoire hydraulique-gaz et le devenir des radionucléides gazeux en après fermeture - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0007-A
- [114] Hypothèses et valeurs paramètres retenus dans évaluations quantitatives performance et sûreté après fermeture - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-20-0097-A
- [115] Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062
- [116] Note conceptuelle - Le comportement mécanique et la corrosion des composants métalliques des alvéoles HA dans le temps (exploitation et après fermeture) CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0005/A
- [117] Andra - Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture - CG-TE-D-DJC-AMOA-FER-0000-19-0045-A
- [118] Examen par l'IRSN du dossier de demande d'autorisation de création de l'INB - CIGEO – Evaluation de la sûreté en phase d'après-fermeture – Mise à jour de graphes et tableaux du volume 8 de la version préliminaire du rapport de sûreté - CG-AMOA-LET-25-0003.
- [119] Lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0022 du 20/09/24 en réponse à l'engagement [2024- E10] issu de l'expertise du GP1.
- [120] Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo – Les référentiels de connaissances – Le comportement des radionucléides et des toxiques chimiques - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-20-0022-A.
- [121] Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, IRSN, ASN. Guide méthodologique de gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives. Annexes. Décembre 2011.
- [122] Ministère de la santé, de la famille et des personnes handicapées. Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.
- [123] K. F. Eckerman, J. C. Ryman, Federal Guidance Report n°12 - External exposure to radionuclides in air, water and soil. EPA 402-R-93-081, ORNL, 1993.
- [124] Ministère de la transition énergétique. Arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.
- [125] M. B. Bellamy and al, Federal Guidance Report n°15 - External exposure to radionuclides in air, water and soil. EPA 402-R-19-002, ORNL, 2019.
- [126] Projet Cigéo – Présentation du programme de forages profonds en limite de ZIOS - ZBS_FOND_UP1 - D-RP-ADCC-23-0002-A.

- [127] Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles - État initial et évolution de la zone endommagée - CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-19-0005-A.
- [128] Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base.
- [129] Justification de la démonstration – étude du scénario conventionnel d'effondrement dans les ouvrages souterrains - CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR1-0000-21-0004/A.
- [130] Incidence des vides dans les tunnels de stockage sur la propagation de l'EDZ à long terme, Projet Cigéo, CG.NT.ADPG.13.0026/A, 2014.
- [131] Incidence des vides dans les tunnels de stockage sur la propagation de l'EDZ à long terme : Estimation de l'extension de la zone endommagée par une méthode géométrique hors aspects temporels - Projet Cigéo, CG.NT.ADPG.13.0026/B.
- [132] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2022), <https://doi.org/10.61092/iaea.rxi-t56z>
- [133] Gerard Bruno, Milan Vujovic (2025) "Inadvertent Human Intrusion – International Overview", SITEX.Network Topical Day 2025: Human intrusion scenarios in safety cases for radioactive waste disposal facilities, IAEA oral communication <https://www.sitex.network/joint-event-recap-sitex-networks-8th-general-assembly-and-topical-day-2025/>
- [134] Démarche d'élaboration des inventaires de l'INB du centre de stockage Cigéo - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-20-0014-A.
- [135] Lettre CG-AMOA-LET-24-0009 - Examen par l'IRSN du dossier de demande d'autorisation de création de l'INB CIGEO – Evaluation de la sûreté en exploitation
- [136] Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base du centre de stockage Cigéo - Pièce 7 - VPRS - PARTIE IV : volumes complémentaires répondant au III de l'article R. 593-16 du code de l'environnement - Volume 12 - L'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V012-21-0007-A
- [137] Selenium redox speciation and coordination in high-burnup UO₂ fuel: Consequences for the release of ⁷⁹Se in a deep underground repository Enzo Curti a,† , Annick Froideval-Zumbiehl a , Ines Günther-Leopold a , Matthias Martin a , Andrej Bullemer a , Hanspeter Linder a , Camelia N. Borca b , Daniel Grolimund b, Journal of Nuclear Materials 453 (2014) 98–106,
- [138] Characterization of selenium in UO₂ spent nuclear fuel by micro X-ray absorption spectroscopy and its thermodynamic stability† E. Curti,*a A. Puranen,b D. Grolimund,a D. Jädernas,b D. Sheptyakova and A. Mesbahcd, Environmental Science: Processes & Impacts, issue 10, 2015

Siège social :
15 rue Louis Lejeune
92120 Montrouge

Adresse postale :
BP 17 - 92262
Fontenay-aux-Roses cedex

Divisions territoriales :
asnr.fr/nous-contacter

info@asnr.fr
Tél. : 01 58 35 88 88

asnr.fr

