

RAPPORT

DEMANDE D'AUTORISATION DE CREATION DU PROJET CIGEO

« GP2 » - SURETE EN EXPLOITATION

PSE-ENV

Rapport IRSN N° 2024-00623

Rapport établi en support à l'avis IRSN/2024-00167 du 29 novembre 2024

RÉSUMÉ

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, porté 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 à l'examen du Dossier d'options de sûreté (DOS) déposé par l'Andra en 2016. 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 souterraines (GP2) et (iii) l'évaluation de sûreté en phase d'après fermeture (GP3). Le présent rapport concerne le groupement de thématiques GP2 et fait suite à celui relatif au GP1 remis en avril 2024.

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

Les principes guidant la démarche de sûreté et de radioprotection, les fonctions de sûreté et les éléments importants pour la protection identifiés, ainsi que le cadre défini pour les situations du domaine de dimensionnement des installations de surface et souterraine, sont globalement satisfaisants. Il appartiendra à l'Andra de consolider le domaine d'extension du dimensionnement en objectivant le caractère peu vraisemblable des situations accidentelles de ce domaine et l'absence de dispositions complémentaires raisonnablement applicables pour ces situations. L'exclusion de scénarios nécessite en tout état de cause d'être fondée sur des exigences de conception, de réalisation et d'exploitation. Une situation de contamination notable de l'installation souterraine, bien qu'exclue à ce stade, devrait être étudiée au titre de la gestion des situations accidentelles et post-accidentelles. S'agissant de la surveillance de ces installations, la stratégie et les paramètres clés à surveiller retenus par l'Andra correspondent désormais à l'attendu à ce stade de développement du projet. A cet égard, un effort sera à porter au cours de la phase pilote pour ce qui concerne la faisabilité des dispositions de surveillance et la représentativité d'une surveillance déportée en alvéoles témoin.

Concernant la conception et le dimensionnement du génie civil des installations de surface et souterraine de Cigéo, l'IRSN considère que les dispositions retenues par l'Andra, notamment pour garantir la durabilité des ouvrages sur une période séculaire et les protéger contre les agressions de type séisme, chute d'avion ou chute de charges, sont à un niveau approprié au stade d'un DDAC. Les dispositions constructives visant à maîtriser les mécanismes induits par la déformation des bétons en phase de construction devront néanmoins faire l'objet d'une attention particulière préalablement au démarrage des travaux. L'Andra s'est en outre engagée à apporter des compléments notamment concernant la maîtrise des infiltrations d'eau, les effets induits par un incendie consécutif à une chute d'avion, ainsi que la prise en compte des modes locaux au niveau des voiles du bâtiment EP1 et des émergences des liaisons surface fond pour l'évaluation de la tenue du génie civil en cas de séisme.

Les études relatives aux risques internes d'origine nucléaire présentées par l'Andra sont suffisantes à ce stade en vue de montrer la maîtrise de l'exposition interne des travailleurs, du risque de dissémination (dispositions de confinement statique, dimensionnement global de la ventilation), du risque de criticité (évaluation des masses de matière fissile) et de la puissance thermique (identification des cibles à protéger, modélisations thermiques). Elles devront être poursuivies en vue de la mise en service s'agissant notamment (i) de la définition du zonage radiologique, du suivi dosimétrique des travailleurs et des méthodes de surveillance radiologique des locaux, (ii) de l'adaptation des débits de la ventilation nucléaire lors des extensions de l'installation souterraine, (iii) de la complétude de l'analyse de sûreté-criticité et des dispositions associées aux contrôles de la masse de matière fissile.

Concernant les risques liés aux agressions d'origine interne, la démonstration de la maîtrise des risques liés à l'incendie, à l'inondation interne, à la manutention, à la perte d'auxiliaires et à la coactivité est globalement satisfaisante au stade d'un DDAC. En vue de la mise en service, l'Andra s'est notamment engagée, vis-à-vis du risque d'incendie, à apporter des compléments relatifs à la justification des agressions retenues, au compartimentage des liaisons surface-fond et de l'installation souterraine et aux capacités d'intervention dans cette dernière. Ces compléments sont susceptibles de conduire à des adaptations de conception, voire de l'architecture, et devront donc être transmis avant les premiers travaux de creusement. S'agissant en particulier du stockage en l'état des colis de déchets bitumés, les éléments présentés par l'Andra conduisent l'IRSN à conclure au caractère accessible de la démonstration de sûreté pour les scénarios de référence, mais ne permettent pas de garantir l'absence de propagation d'un emballement de réactions exothermiques aux colis voisins pour les scénarios extrêmes. L'Andra a poursuivi la déclinaison opérationnelle des principes de sûreté pour la maîtrise des risques liés à la manutention, en cohérence avec l'état de l'art, ce qui est satisfaisant. A cet égard, l'IRSN souligne en particulier les efforts substantiels fournis par l'Andra pour une conception sûre du funiculaire prévu dans la descenderie dite « colis ». Concernant les risques liés à la coactivité, des compléments de justification devront être apportés, vis-à-vis notamment des phases transitoires particulières de livraison d'alvéoles (interface zone travaux et zone d'exploitation nucléaire) et de fermeture de ces ouvrages.

Les dispositions de maîtrise des risques d'explosion liés aux gaz de radiolyse et de corrosion prévues en phase de fonctionnement, dans les installations de surface et souterraine ventilées, ainsi que dans la hotte de transfert accueillant des colis MA-VL, n'appellent pas de remarque particulière. En revanche, lors des opérations de fermeture d'un alvéole MA-VL, ainsi que dans le cas d'un alvéole fermé, la démonstration de la maîtrise de ce risque n'est pas acquise à ce jour, compte tenu du caractère préliminaire des études relatives au devenir des gaz dans cet alvéole et aux conséquences d'une éventuelle explosion. Pour les alvéoles HA, l'IRSN considère que des incertitudes fortes demeurent quant à la faisabilité technique des dispositions actuelles de maîtrise de l'atmosphère interne (conception de la tête d'alvéole, dispositif d'inertage, etc.), qui visent à limiter la corrosion des conteneurs de stockage et du chemisage de l'alvéole et à éviter la formation d'une atmosphère explosive. Sur ces deux derniers points, sans toutefois qu'ils soient rédhitoires vis-à-vis de la DAC, l'accessibilité de la démonstration de sûreté, difficile à apprécier à ce stade, pourrait conduire à des évolutions de modes d'exploitation ou de conception.

Concernant les risques liés aux agressions d'origine externe, un niveau de maturité satisfaisant a été atteint pour la maîtrise de ceux liés à l'inondation externe, aux aléas météorologiques et à l'environnement industriel. Le niveau d'aléa sismique retenu par l'Andra pour le dimensionnement des installations, ainsi que la démonstration de la suffisance des dispositions de protection prévues pour le bâtiment EP1 concernant les effets directs de la foudre, restent à consolider et font l'objet d'engagements en ce sens de la part de l'Andra. Pour la chute accidentelle d'un aéronef, la démarche d'analyse présentée par l'Andra est globalement pertinente et les aéronefs retenus sont adaptés aux enjeux de sûreté associés à chacune des cibles ; la démonstration de la non-perforation des dalles et voiles extérieurs devra toutefois être confortée.

Les évaluations d'impact en phase d'exploitation sont, en l'état des connaissances, globalement fondées et concluent à un impact radiologique sanitaire et environnemental très faible en fonctionnement normal. En situations incidentelles et accidentelles, les évaluations de conséquences radiologiques et chimiques pour les populations proches conduisent bien à des doses respectant les objectifs de protection. Il en est de même pour les conséquences radiologiques pour les travailleurs. Sur un plan méthodologique, pour l'évaluation des conséquences relatives aux toxiques chimiques, des compléments doivent être apportés s'agissant de la prise en compte des rejets liquides.

Les thématiques faisant l'objet de spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires sont bien identifiées et les critères retenus sont cohérents avec la démonstration de sûreté. L'IRSN estime toutefois que les critères relatifs au confinement statique devront être approfondis en veillant à leur caractère opérationnel. Les contrôles systématiques retenus par l'Andra, complétés par les contrôles hors flux définis à ce stade, devraient permettre de garantir le respect des spécifications. Il appartiendra à l'Andra de préciser, en vue de la

mise en service de Cigéo, les contrôles hors flux qu'elle retient (modalités, familles de colis contrôlées, fréquence de contrôle, etc.).

Concernant la récupérabilité, les scénarios dits de « retrait d'exploitation » et de « retrait hypothétique » (gestion post-accidentelle ou réversibilité) fondent un ensemble d'études qui constitue une avancée au regard des précédents dossiers examinés. Ainsi, la conception des dispositions prises (robot de retrait de colis HA, acheminement d'un colis en surface...) a progressé et ces dispositions feront l'objet d'un programme d'essais dans les alvéoles de la phase pilote. L'IRSN rappelle toutefois les réserves qui doivent être levées en amont en matière de corrosion des composants métalliques (demande formulée à l'issue du GP1 en vue du GP3) et de maîtrise de l'atmosphère interne des alvéoles MA-VL non ventilés et HA vis-à-vis des risques liés à l'explosion (cf. *supra*). Ces dernières peuvent également impacter la stratégie des opérations de fermeture des quartiers de stockage. La capacité de l'architecture de Cigéo à concilier les flux relatifs aux activités nucléaires et aux activités de fermeture sans impact sur la maîtrise des risques devra en outre faire l'objet d'une attention particulière. A ce stade, les principales opérations de démantèlement identifiées par l'Andra pour les installations de surface et, en amont de sa fermeture, pour l'installation souterraine n'appellent quant à elles pas de remarque particulière sur le plan des principes.

Par ailleurs, s'agissant des risques liés aux facteurs organisationnels et humains, l'Andra a présenté plusieurs dispositions de management du programme Cigéo, mises en place récemment, qui sont à ce stade globalement satisfaisantes dans leur principe pour anticiper la maîtrise des risques. Toutefois, certaines montrent un degré de maturité insuffisant (système de management intégré, gestion de configuration, gestion des ressources et des compétences, intégration des facteurs organisationnels et humains, formalisation du retour d'expérience) et devront, par conséquent, faire l'objet de compléments que l'Andra s'est engagée à apporter en vue de la mise en service de Cigéo.

L'IRSN estime que la flexibilité de Cigéo constitue un enjeu fondamental afin de préserver la capacité d'une gestion sûre des déchets HA et MA-VL de l'inventaire de référence, compte tenu des incertitudes relatives au nombre, aux conditionnements et aux modes de stockage des colis primaires de cet inventaire (cf. GP1), ainsi que des besoins qui pourraient apparaître en termes d'évolutions de conception, de procédés d'exploitation ou de stratégie de fermeture, sans préjuger de leur bien-fondé à ce stade. Ce principe de flexibilité devra être décliné en dispositions organisationnelles et matérielles concrètes, dès la première tranche d'ouvrages et en anticipant les futures étapes de déploiement de Cigéo, au regard de la maîtrise des risques en exploitation, notamment ceux sensibles aux dimensions spatiales et temporelles, et de l'absence d'incidence sur la sûreté après fermeture de l'installation.

S'agissant de l'adaptabilité de Cigéo aux inventaires de réserve, basée sur une conception de stockage dont les principes pour les combustibles usés (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, l'IRSN n'identifie pas de point réhibitoire au stockage de ces inventaires au vu de l'analyse préliminaire de sûreté en fonctionnement présentée par l'Andra, relative aux risques internes nucléaires (dissémination, exposition des travailleurs, criticité, dégagement thermique), aux risques liés aux agressions internes (notamment manutention, incendie, explosion, pyrophoricité) et externes (notamment séisme, aléas météorologiques), ainsi qu'aux risques liés à la coactivité. L'analyse de sûreté-criticité du stockage des CU en alvéole méritera d'être approfondie lors des prochaines mises à jour des études d'adaptabilité, qui devront, par ailleurs, tenir compte des points identifiés à l'issue de la présente expertise pour l'inventaire de référence. Une potentielle extension de durée de vie de Cigéo pourrait en outre requérir des dispositions constructives, de surveillance et de maintenance spécifiques, eu égard au vieillissement des ouvrages souterrains, qu'il convient d'évaluer avant les premiers bétons. De manière plus générale et comme pour la flexibilité (cf. *supra*), il importe selon l'IRSN d'identifier les évolutions du niveau d'adaptabilité au regard des étapes possibles du déploiement des installations et de la maîtrise des risques en exploitation ainsi qu'après fermeture.

En conclusion, l'IRSN souligne les avancées notables de la démonstration de sûreté de Cigéo en phase d'exploitation, qui a atteint le niveau de maturité requis au stade d'un DDAC pour la plupart de ses composantes. Cette démonstration n'est toutefois pas acquise pour le stockage en l'état des colis de déchets bitumés vis-à-vis des risques liés à l'incendie, ainsi qu'en termes de maîtrise de l'atmosphère interne des alvéoles HA, et dans une moindre mesure de celle des alvéoles MA-VL en phase de fermeture, vis-à-vis des risques d'explosion. Aussi, il importe désormais de conforter et de compléter l'évaluation de la sûreté de Cigéo en phase d'exploitation, en vue de sa mise en service, sur la base notamment de démonstrateurs réalisés *in situ* dans des conditions d'environnement et de fonctionnement industriel. La phase industrielle pilote, dont le programme de travaux reste à préciser sur la base d'objectifs et de critères de réussite consolidés, devrait permettre de réunir les éléments nécessaires en ce sens, au cours de la trentaine d'années actuellement envisagée par l'Andra pour cette phase.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	12
1.1. Objet du présent rapport.....	12
1.2. Contexte	13
1.3. Présentation du dossier de l'Andra	14
2. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION CIGEO	15
2.1. Le site de Meuse/Haute-Marne	15
2.1.1. La formation du Callovo-Oxfordien et ses encaissants.....	15
2.1.2. Les niveaux aquifères principaux du site de Meuse/Haute-Marne.....	15
2.2. Architecture du stockage	16
2.2.1. Installations nucléaires en surface	16
2.2.2. Liaisons surface-fond	17
2.2.3. Installation nucléaire souterraine.....	19
2.3. Description des alvéoles HA et MA-VL.....	22
2.3.1. Alvéoles HA.....	22
2.3.2. Alvéoles MA-VL.....	24
2.4. Les colis de stockage.....	26
2.4.1. Colis de stockage HA.....	26
2.4.2. Colis de stockage MA-VL.....	27
2.5. Procédés mis en œuvre dans Cigéo	28
2.5.1. Procédés nucléaires dans l'installation de surface	29
2.5.2. Procédés nucléaires dans l'installation souterraine	34
2.6. Chronologie des phases de vie de Cigéo	37
2.7. Adaptabilité de Cigéo à l'inventaire de réserve.....	39
3. DEMARCHE DE SURETE.....	40
3.1. Démarche générale	40
3.2. Fonctions de sûreté	41
3.3. Situations de fonctionnement.....	41
3.3.1. Définition des familles de situations	41
3.3.2. Classement des scénarios	43
3.4. EIP, AIP et ED associées	44
3.4.1. Identification des EIP	44
3.4.2. Qualification des EIP	44
3.4.3. Identification des AIP	45
3.5. Stratégie de surveillance.....	46
3.5.1. Objectifs et principes directeurs de la surveillance.....	46
3.5.2. Identification des paramètres-clés et des dispositions	46

3.5.3.	Rôle des alvéoles témoin MA-VL et HA pour la surveillance	48
3.6.	Gestion des situations accidentelles et post-accidentelles	50
3.6.1.	Scénarios retenus pour définir les actions de gestion	50
3.6.2.	Modalités de gestion accidentelle et post-accidentelle	51
3.6.3.	Etude de dimensionnement du PUI.....	52
3.7.	Objectifs de protection contre les rayonnements ionisants.....	54
3.7.1.	Protection des travailleurs.....	54
3.7.2.	Protection du public	55
4.	EVALUATION DE SURETE EN PHASE D'EXPLOITATION	56
4.1.	Principes de conception et de dimensionnement du génie civil.....	56
4.1.1.	Ouvrages de surface	56
4.1.2.	Ouvrages souterrains.....	58
4.2.	Risques internes d'origine nucléaire.....	59
4.2.1.	Exposition des travailleurs	59
4.2.2.	Dissémination des substances radioactives	62
4.2.3.	Criticité.....	73
4.2.4.	Thermique.....	77
4.3.	Agressions d'origine interne	78
4.3.1.	Incendie	78
4.3.2.	Explosion.....	105
4.3.3.	Transport et manutention	114
4.3.4.	Inondation d'origine interne	118
4.3.5.	Coactivité	119
4.3.6.	Perte d'auxiliaires	123
4.4.	Agressions d'origine externe.....	125
4.4.1.	Séisme.....	125
4.4.2.	Inondation externe	136
4.4.3.	Aléas météorologiques (installations de surface)	141
4.4.4.	Risques liés à l'environnement industriel, aux voies de communication et à la chute d'aéronef (installations de surface).....	143
4.5.	Evaluation d'impact.....	151
4.5.1.	Fonctionnement normal.....	151
4.5.2.	Situations incidentelles et accidentelles.....	155
5.	SPECIFICATIONS D'ACCEPTATION ET CONTROLES DES COLIS	158
5.1.	Spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires	158
5.1.1.	Spécifications générales d'acceptation	158
5.1.2.	Spécifications particulières d'acceptation	158
5.2.	Contrôles des colis.....	162
5.2.1.	Contrôles systématiques à réception à Cigéo	163
5.2.2.	Contrôles hors flux.....	163

5.2.3. Gestion des écarts	165
6. DEVELOPPEMENT DE CIGEO	166
6.1. Organisation du programme Cigéo et anticipation de la maîtrise des risques	166
6.1.1. Principaux changements organisationnels du programme Cigéo	166
6.1.2. Démarche d'identification des besoins et des compétences	170
6.1.3. Anticiper les risques liés à la conception, à la construction et à l'exploitation	172
6.2. Phase industrielle pilote	174
6.3. Opérations de démantèlement - fermeture.....	176
6.3.1. Stratégie retenue	176
6.3.2. Principales opérations de démantèlement-fermeture.....	177
6.3.3. Scénario prévisionnel de fermeture	180
6.4. Récupérabilité.....	181
6.5. Flexibilité et adaptabilité.....	184
6.5.1. Flexibilité.....	184
6.5.2. Adaptabilité	187
7. CONCLUSION.....	196

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figures

Figure 1. Schéma des installations de surface et souterraine de Cigéo. En orange, la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) [34].	16
Figure 2. Illustration des liaisons surface-fond [35].	18
Figure 3. Illustration du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA à terminaison [37].	21
Figure 4. Illustration du quartier de stockage MA-VL [35].	22
Figure 5. Schéma de la tête d'alvéole HA et de son armoire technique (dispositif de prélèvement et d'inertage non représenté) [37].	23
Figure 6. Schéma d'un alvéole MA-VL et de sa galerie d'accès [35].	24
Figure 7. Schéma de la paroi d'accostage d'un alvéole MA-VL [38].	25
Figure 8. Schéma de la paroi de radioprotection entre la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole MA-VL [38].	26
Figure 9. Illustration des composants d'un conteneur de stockage HA pour le cas de colis primaire de déchets vitrifiés provenant de l'usine d'Orano La Hague [40].	27
Figure 10. Illustration des composants d'un conteneur de stockage MA-VL à couvercle vissé de type CS4.1 [40].	28
Figure 11. Illustration du bâtiment nucléaire de surface EP1 – Niveau +0 m (adapté de [35]).	29
Figure 12. Illustration de la zone d'évolution des transbordeurs/chariots à +0 m [35].	30
Figure 13. Emballage de transport positionné sur la réhausse (-11 m) et accosté à la cellule supérieure de déchargement (+0 m) par la trappe d'accostage [35].	31
Figure 14. Illustration de la trappe d'accostage de la cellule de déchargement [35].	31
Figure 15. Illustration de la zone de préparation des colis de stockage (cellule de déchargement à droite, de contrôle au centre, de préparation à gauche) [35].	32
Figure 16. Illustration de la cellule de fermeture HA et des postes associés [35].	33
Figure 17. Hotte MA-VL accostée dans le parc à hottes au niveau de la façade d'accostage avec la cellule de mise en hotte. La table d'accostage est en jaune et la hotte en orange [35].	33
Figure 18. Illustration de la cellule de mise en hotte HA avec sur le mur de gauche en bleu la façade d'accostage [35].	34
Figure 19. a) Illustration du carrousel de la ZSLE. b) Illustration du trajet des chariots chargés de hotte MA-VL (en vert trajet du chariot vers la galerie de liaison MA-VL nord et en bleu vers la galerie MA-VL sud) [35].	35
Figure 20. Hotte déposée sur la table d'accostage (en jaune sur le dessin) [35].	35
Figure 21. Hotte accostée à la façade d'accostage d'un alvéole MA-VL [35].	36
Figure 22. Illustration du chargement de la première nappe de colis de stockage MA-VL dans la partie utile de l'alvéole. En rouge, les portes de radioprotection ouvertes [35].	36
Figure 23. Opérations de transfert du colis de stockage HA en tête d'alvéole [35].	37
Figure 24. Illustration des ouvrages souterrains construits lors de la phase de construction initiale [42].	38

Figure 25. La phase industrielle pilote (à partir de [42], sans les durées car modifiées au cours de l’instruction).....38

Figure 26. Illustration des interfaces entre les zones en exploitation et en travaux – Quartier de stockage MA-VL [86].120

Figure 27. a) Illustration du sas entre la ZT et la ZEX, b) Coupe depuis la ZEXP, c) Coupe depuis la ZT.....121

Figure 28. Exploration des incertitudes au niveau SMS par « arbre logique », d’après la figure 4.1 du rapport [98] de l’Andra. Figure modifiée par l’ajout du SDD-2023 (en rouge), enveloppe du SDD-2016 (en vert) et du percentile 75.127

Figure 29. Exploration des incertitudes au niveau SMS selon les hypothèses de l’IRSN. Voir la légende sur la figure. Le spectre 1,5 x SDD-2016 correspond à l’évaluation par l’Andra de la robustesse de l’installation à une majoration de 50 % du SDD-2016.128

Figure 30. Procédures et étapes des opérations de démantèlement-fermeture et de surveillance envisagées par l’Andra [82].....177

Figure 31. Illustration du quartier de CU de l’inventaire de réserve [144].188

Figure 32. Illustration du quartier de stockage des déchets FA-VL de l’inventaire de réserve [144].189

Tableaux

Tableau 1. Modes d’exploitation de l’installation de surface [35]29

Tableau 2. Objectifs de protection à l’égard des risques radiologiques [44].54

Tableau 3. Températures maximales atteintes en surface des colis primaires non actifs (sur 4 colis primaires dans le CS 4.1 et 5 colis primaires dans le CS 4.2) [41].96

Tableau 4. Epaisseurs de la barrière de confinement définies par l’Andra en l’absence d’agresseurs internes [133].161

1. INTRODUCTION

1.1. Objet du présent 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 trois groupements thématiques :

- 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 souterraines ;
- 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] ; celle du GPD pour le GP1 dans son avis CODEP-MEA-2024-028272 [4].

Le présent rapport concerne le deuxième groupement thématique. Pour celui-ci, l'ASN a demandé à l'IRSN de se prononcer sur la pertinence des dispositions de conception ayant conduit à la configuration de référence de l'installation de stockage, ainsi que celle des dispositions de construction et d'exploitation retenues, en examinant (i) la démarche de sûreté en fonctionnement jusqu'à la fermeture du stockage, comprenant la stratégie de surveillance de l'installation souterraine, (ii) l'évaluation des risques d'origine interne et externe et (iii) l'évaluation des impacts radiologiques et chimiques sur l'homme et l'environnement associés aux différentes situations étudiées pour la phase d'exploitation. L'ASN a demandé que la démonstration de sûreté présentée par l'Andra relative au stockage des déchets bitumés dans Cigéo soit incluse dans cet examen et a précisé que celui-ci devra notamment tenir compte des conclusions qu'elle a formulées 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, l'ASN a demandé à l'IRSN d'examiner en particulier :

- les objectifs de sûreté ;
- les activités et éléments importants pour la protection (**AIP** et **EIP**) ainsi que la qualification des EIP ;
- les principes pour la mise en œuvre de la flexibilité ;
- les principes de contrôle des colis ;
- l'identification et le classement des scénarios incidentels et accidentels ;
- la définition des domaines de fonctionnement ;
- la stratégie de fermeture de l'installation ;
- la stratégie de surveillance après la fermeture de l'installation ;
- les principes organisationnels pour le passage de la phase de conception à celle de réalisation.

Concernant l'évaluation de sûreté, l'ASN a demandé à l'IRSN d'inclure notamment dans son expertise :

- les risques internes d'origine nucléaire (exposition des travailleurs, criticité, dissémination de substances radioactives) ;
- les agressions internes (incendie, explosion, manutention, inondation d'origine interne, perte d'auxiliaires de puissance, risques liés à la co-activité) ;

- les agressions externes (séisme, aléas météorologiques, chute d'avion, impact des activités industrielles, inondation externe...)

Concernant enfin l'évaluation de l'impact sanitaire et environnemental, l'ASN a demandé que l'examen de l'IRSN inclue notamment :

- la méthodologie d'évaluation des impacts radiologiques et chimiques sur l'homme et l'environnement ;
- les résultats des évaluations pour les différentes situations et phases successives de fonctionnement.

S'agissant des dispositions relatives à la mémoire, également mentionnées dans la saisine de l'ASN, leur examen est reporté au GP3.

Par ailleurs, l'ASN [5] a demandé à la Présidente du GPD l'avis du groupe d'experts qu'elle préside sur ce deuxième 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**).

En outre, comme pour le GP1, la présente expertise a fait l'objet d'un dialogue technique (DT DAC Cigéo), organisé 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, dans la continuité des actions d'ouverture à la société civile sur les déchets HA - MA-VL menées 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'IRSN et (ii) de permettre à la société civile de se forger sa propre opinion sur les sujets de sûreté nucléaire et de radioprotection et participer ainsi à la décision publique. Il fait l'objet d'une annexe dédiée (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'instruction 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 l'IRSN de ce dossier (chapitres 3 à 6) et comprend une liste des références, une liste des acronymes ainsi que des annexes administratives et techniques.

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

- en **caractères gras** sont mentionnées les **conclusions de l'IRSN** ;
- lorsque ces conclusions de l'IRSN 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 7 octobre 2024, ceux-ci sont mentionnés en caractères **bleus gras** sous forme d'un numéro précédé de la mention « **2024-E** », et renvoient à la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 [6] en Annexe A2 ;
- enfin, les conclusions qui font l'objet de recommandations en vue de la réunion des GPE figurent en caractères **bleus gras**, et sont précédées d'un titre mentionnant « **Recommandation N° X** ».

L'IRSN 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 prévue en vue de l'enquête publique (cf. *infra*).

1.2. Contexte

Pour rappel [2], la loi de programme du 28 juin 2006 [7] 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* ». À 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 [8], en intégrant en particulier le dépôt d'un DOS, en préalable au dépôt du DDAC, 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 ») [9], précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible, modifie la loi n°2006-739 du 28 juin 2006 [7] 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 [10], se positionnait entre la fin des études d'avant-projet sommaire (**APS**) et le début de celles d'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 en exploitation 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 (notamment, « Dossier 2005 Argile » [11][12][13], « Dossier 2009 » [14][15][16], le jalon intermédiaire de conception au stade de l'esquisse en 2012 [17], les ouvrages de fermeture en 2014 [18][19][20], les risques en exploitation en 2015 [21][22][23], le plan de développement des composants du projet en 2016 [24][25], le DOS en 2018 [26][27][28]). 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.

Comme indiqué ci-dessus, le principe d'une phase industrielle pilote de Cigéo est inscrit dans l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement. Celui-ci dispose que l'exploitation du centre débute par une phase industrielle pilote, que l'autorisation de mise en service est limitée à cette phase et que les résultats de cette phase font l'objet d'un rapport de l'Andra. Sur la base de ce rapport, accompagné de l'avis de différents évaluateurs (**CNE**, **ASN**, **OPECST**), le gouvernement présente un projet de loi adaptant les conditions d'exercice de la réversibilité du stockage. Au regard de son importance dans le développement de Cigéo, l'échéance du bilan de la phase pilote est associée dans le présent rapport à certaines conclusions de l'IRSN. Cette échéance, qui renvoie l'évaluation des résultats des actions mises en œuvre à quelques dizaines d'années, suppose la mise en place de points d'avancement réguliers en amont de ce bilan, qui restent à définir. Ainsi, outre la mise à jour de la version préliminaire du rapport de sûreté de Cigéo prévue en vue de l'enquête publique, d'autres révisions périodiques pourraient ensuite être fixées, à un intervalle de l'ordre de la dizaine d'années, auxquelles certaines conclusions du présent rapport sont associées. Enfin, au cours de la réunion préparatoire au GP2, tenue le 7 octobre 2024, l'Andra a présenté une modification de la chronologie prévisionnelle de développement de Cigéo (cf. chapitre 2.6 du présent rapport), portant le début des creusements à l'horizon 2035, les essais « en inactif » (sans colis de déchets radioactifs) à la fin des années 2040 puis la mise en service (limitée à la phase pilote) actuellement à l'horizon 2050.

1.3. Présentation du dossier de l'Andra

Par lettre DG/23.008 du 16 janvier 2023 [29], 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'instruction, par d'autres documents techniques et par les réponses apportées par l'Andra aux questions de l'IRSN.

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.

2. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION CIGEO

Le présent chapitre, exclusivement descriptif, est dédié à la présentation générale de l'installation Cigéo en lien avec l'évaluation de sûreté en phase d'exploitation. Cette présentation est réalisée à partir des éléments transmis par l'Andra dans le DDAC et au cours de l'instruction. Elle rappelle les principaux éléments concernant le site de Meuse/Haute-Marne, l'architecture de Cigéo, l'inventaire et les colis de stockage ainsi que les phases de vie de l'installation, présentés dans le rapport d'expertise de l'IRSN relatif au GP1 [2]. Ce chapitre décrit également les alvéoles HA et MA-VL de manière plus détaillée, en particulier les têtes d'alvéoles et les équipements mis en œuvre durant la phase d'exploitation, ainsi que les procédés nucléaires prévus au sein de Cigéo.

2.1. Le site de Meuse/Haute-Marne

2.1.1. La formation du Callovo-Oxfordien et ses encaissants

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 de Paris.

La « zone de transposition », 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 zone de transposition, l'Andra a défini en 2009 une « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie » (**ZIRA**), d'environ 30 km². 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 les accès entre la surface et la zone souterraine ainsi que le volume du COX délimité par la ZIRA [30].

La couche du COX est localisée stratigraphiquement entre deux formations calcaires : le Dogger en dessous et l'Oxfordien au-dessus, surmonté par le semi-perméable marneux du Kimméridgien et l'aquifère superficiel des calcaires karstifiés du Barrois. La formation du COX est une couche sédimentaire compactée, communément appelée « argilites du COX », essentiellement composée d'argiles et de carbonates [31]. Sur la ZIOS, la couche présente une épaisseur comprise entre 142 m et 162 m et est légèrement inclinée avec un pendage d'environ 1,5° 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 [30].

2.1.2. 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 ; il est très productif lorsqu'il est saturé. Au sein de la ZIOS, son épaisseur peut atteindre 130 m. L'aquifère de l'Oxfordien, d'environ 280 m d'épaisseur, présente une transmissivité globale de 10⁻⁷ à 10⁻⁵ m²/s [32]. Au niveau de la zone de transposition, 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 (voire non) producteurs et plus producteurs. La nappe de l'Oxfordien se scinde vers le nord-est en plusieurs horizons producteurs par des couches marneuses appelées « Série grise » [32]. L'aquifère calcaire du Dogger, d'environ 250 m d'épaisseur, présente une transmissivité globale de 10⁻⁹ à 10⁻⁵ m²/s, dont le principal ensemble producteur est le Bathonien. Les écoulements sont également orientés vers le nord-ouest avec un gradient de l'ordre de 0,1 %. Les aquifères de l'Oxfordien et du Dogger ont des transmissivités plus élevées dans la zone fracturée discrète.

Le gradient hydraulique vertical à travers le COX, résultant des différences de charge entre l'Oxfordien carbonaté et le Dogger (respectivement 290 m et 305 m NGF au niveau du LSMHM), varie entre une valeur légèrement négative au sud-est de la ZIOS (gradient descendant) et environ 0,12 m/m au nord-ouest de cette zone (gradient ascendant) [33]. Ce gradient est amené à évoluer dans le futur en raison de l'érosion.

2.2. Architecture du stockage

La demande d'autorisation de création de Cigéo porte sur un périmètre d'installation nucléaire de base (INB) constitué de trois zones (cf. Figure 1) :

- une « zone descenderie » en surface, principalement dédiée à la réception des colis de déchets radioactifs envoyés par les producteurs, 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 des colis de déchets radioactifs, « zones de soutien logistique » (ZSL) et les liaisons surface-fond (LSF).

Deux installations de surface principales de Cigéo sont situées hors périmètre de l'INB (cf. Figure 1) : une liaison reliant la zone puits à la zone descenderie, qui comprend un convoyeur et deux voies dédiées à la circulation des poids lourds et des véhicules légers, ainsi qu'une installation terminale embranchée en surface qui relie la zone descenderie au réseau ferré national à Gondrecourt-le-Château et qui inclut une plateforme logistique dans cette commune.

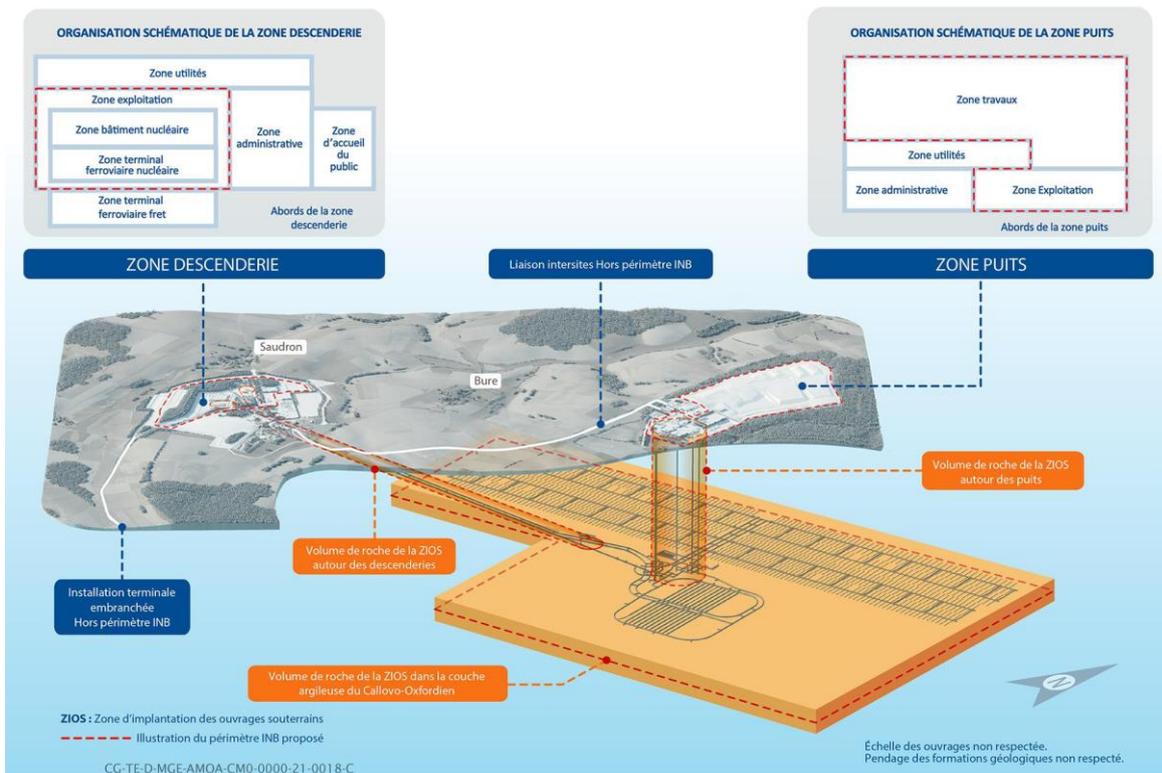


Figure 1. Schéma des installations de surface et souterraine de Cigéo. En orange, la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) [34].

2.2.1. Installations nucléaires en surface

L'INB en zone puits comprend principalement une zone dite « exploitation » sur la partie sud et une zone dite « travaux » occupant la partie centrale et nord (cf. Figure 1) :

- la zone exploitation abrite un atelier de maintenance et une zone de stockage du matériel, ainsi que les bâtiments et équipements dédiés à l'accueil et au transfert du personnel d'exploitation vers la « ZSL exploitation » (ZSLE) de l'installation souterraine ;

- la zone travaux, dédiée aux travaux d'extension des ouvrages souterrains, comprend les bâtiments et équipements dédiés à l'accueil et au transfert du personnel « travaux » vers la « ZSL travaux » (**ZSLT**) de l'installation souterraine ;
- la zone de gestion des verses, dans une large moitié nord de la zone puits, comprend le stockage de la roche excavée (« marin ») de la couche du COX, les installations de gestion (stockage tampon) et celles destinées au traitement de ces verses en vue du remblaiement des ouvrages².

L'INB en zone descenderie (cf. Figure 1) comprend notamment la zone « terminal ferroviaire nucléaire » au sud et la zone « bâtiment nucléaire » au centre, qui rassemble le bâtiment nucléaire de surface « Exploitation Phase 1 » (**EP1**) semi-enterré (11 m de profondeur) et la tête de descenderie « colis ». Ces deux zones constituent la « zone exploitation », qui comprend également des bâtiments et équipements non nucléaires en support à l'exploitation de l'INB, dont la tête de la descenderie « de service », les ateliers et magasins support, les ouvrages liés à la gestion des eaux et effluents et les ouvrages de protection du site. Les principales opérations liées au procédé nucléaire, décrites plus précisément au chapitre 2.5.1, se déroulent au sein du bâtiment EP1. L'Andra prévoit la construction et la mise en service, postérieurement à la phase pilote, d'un bâtiment de déchargement des emballages de transport (**ET**) à déchargement horizontal (**ETH**³), mode de déchargement actuellement non retenu par l'Andra pour la tranche 1, et d'un bâtiment nucléaire de surface « Exploitation Phase 2 » (**EP2**), dédié au déchargement, au contrôle et à la préparation pour le stockage des colis HA1/HA2 dits « thermiques » dont la prise en charge est prévue à l'horizon 2080. S'agissant du bâtiment de surface ETH, les évaluations de sûreté présentées dans le DDAC étant à un stade préliminaire pour certains risques, l'examen par l'IRSN ne peut pas être conclusif pour ceux-ci. S'agissant du bâtiment EP2, celui-ci ne fait pas partie du périmètre de la demande d'autorisation de création présentée par l'Andra. Des réserves foncières sont d'ores et déjà prévues par l'Andra au sein du périmètre INB pour ces bâtiments, dont l'accueil est encadré par les articles R. 593-55 à R. 593-58 du code de l'environnement dans le cas où les modifications prévues en vue de cet accueil sont soumises à autorisation de l'ASN ou par les articles R. 593-59 à R. 593-61 dans le cas où elles sont soumises à déclaration auprès de l'ASN.

2.2.2. Liaisons surface-fond

Les LSF [35] comprennent deux descenderies et cinq puits (cf. Figure 2), détaillés ci-après.

² Une partie des verses traitées est prévue d'être utilisée comme matériau de remblai pour l'obturation et la fermeture définitive des ouvrages souterrains de Cigéo.

³ Bâtiment prévu d'être raccordé à EP1 par un tunnel de transfert pour la réception de certains colis MA-VL reçus en emballages de transports horizontaux, qui ne sont pas prévus d'être stockés au cours de la phase pilote.

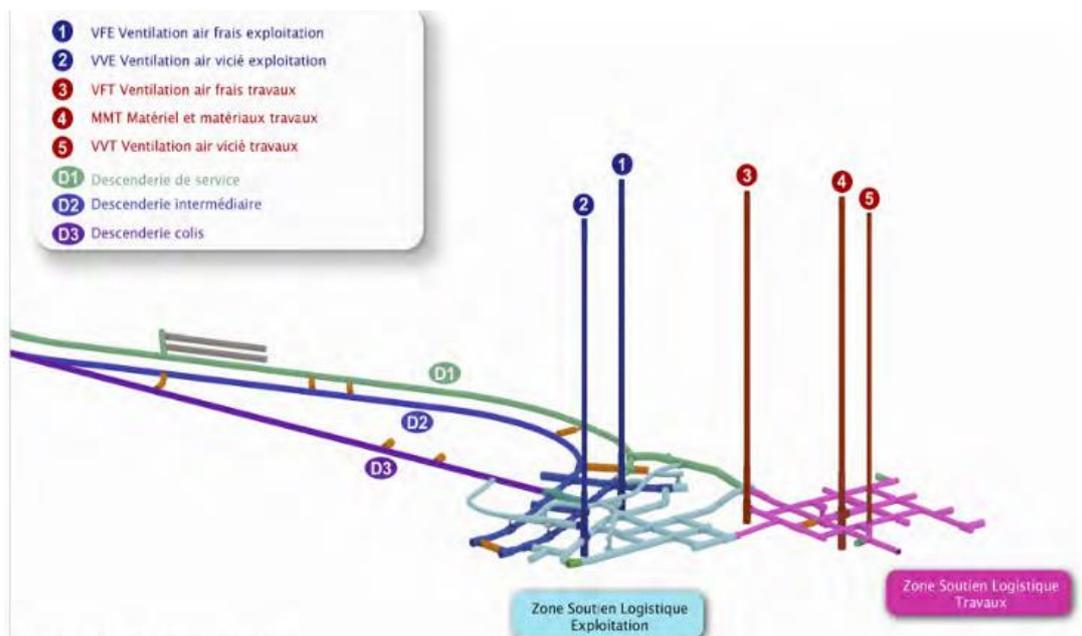


Figure 2. Illustration des liaisons surface-fond [35].

S'agissant des descenderies, les deux tunnels qui constituent la descenderie « colis » (**DSC**) et la descenderie « de service » (**DSS**) sont inclinés d'environ 12 % et s'étendent depuis la zone descenderie en surface vers le sud-ouest. Ils sont parallèles (distants de 60 m), d'une longueur de l'ordre de 4 300 m et de diamètres utiles compris entre 8,4 m (dans le COX) et 9,3 m (hors du COX). Ces deux descenderies sont complétées, avant leur entrée dans le COX, par une descenderie intermédiaire (**DSI**) de 1 000 m de long et de même diamètre, qui résulte d'une bifurcation du tunnelier servant à creuser la DSC afin de lui permettre de creuser une partie du quartier MA-VL (cf. Figure 2). Les trois descenderies convergent vers la ZSLE. Elles sont connectées par des recoupes dédiées à l'intervention des secours et/ou l'évacuation (8 entre la DSC et la DSS, 4 entre la DSI et la DSS, 1 entre la DSC et la DSI).

La DSC est reliée à la tête de descenderie colis, elle-même reliée à l'installation EP1. Elle est équipée d'un funiculaire qui permet de descendre et remonter les hottes dans lesquelles sont placés les colis de stockage. La DSS, reliée à la tête de descenderie de service, est dédiée au soutien à l'exploitation et permet l'accès du personnel exploitant et des visiteurs ainsi que des véhicules de secours ; elle permet le transfert des matériels et équipements de maintenance et de jouvence ainsi que la remontée des effluents et des déchets induits. Au passage du toit du COX, la DSS dessert la zone d'implantation du démonstrateur de scellement de descenderie.

Par ailleurs, cinq puits permettent de connecter la zone puits en surface aux ZSL, répartis entre la zone nucléaire et la zone travaux (cf. Figure 2), avec des diamètres utiles de 6 m à 8 m et une hauteur comprise entre 520 m et 560 m. En zone exploitation, le puits « ventilation air frais exploitation » (**VFE**) est dédié au transfert du personnel et à l'apport d'air frais, et le puits « ventilation air vicié exploitation » (**VVE**) est dédié au retour d'air vicié de la zone exploitation. En zone travaux, le puits « ventilation air frais travaux » (**VFT**) est dédié au transfert du personnel et à l'apport d'air frais, le puits « matériels et matériaux travaux » (**MMT**) est dédié à l'apport et l'évacuation des matériels et matériaux de construction, et enfin le puits « ventilation air vicié travaux » (**VVT**) est dédié au retour d'air vicié de la zone travaux.

2.2.3. Installation nucléaire souterraine

2.2.3.1. Principes d'architecture

L'architecture générale de l'installation souterraine est proche, dans ses grands principes, de celle retenue au stade du DOS, avec notamment [35] :

- des quartiers de stockage sur un seul niveau, afin de maximiser les gardes de COX sain de part et d'autre de l'installation ;
- une séparation physique entre les zones travaux et exploitation nucléaire ;
- deux ZSL (ZSLE et 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 est relié à la ZSLE par une galerie de liaison (**GLI**), qui peut être légèrement en pente (2,5 %) ;
- dans chaque quartier, des alvéoles de stockage alignées « en peigne » face aux galeries d'accès (**GA**) 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 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.

La principale évolution depuis le DOS pour la zone travaux consiste en l'ajout d'une colonne (forage tubé) pour l'approvisionnement en carburant des engins de chantier. L'Andra retient également la possibilité dans le futur d'acheminer le béton depuis la surface vers la ZSLT *via* un forage vertical [36].

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) et un quartier moins grand.

La conception de l'architecture souterraine prévoit aussi l'intégration de démonstrateurs qui ont été précisés depuis le DOS :

- un démonstrateur d'alvéole MA-VL, localisé en entrée du quartier de stockage MA-VL ;
- deux démonstrateurs d'alvéole HA (un démonstrateur d'alvéole du quartier pilote HA dit « démonstrateur de constructibilité » réalisé dans la ZSLT et un démonstrateur d'alvéole HA fermé localisé au fond du quartier pilote HA) ;
- un démonstrateur de scellement de descenderie, localisé dans une galerie reliée à la DSS (cf. *supra*) ;
- un démonstrateur de scellement de galerie, localisé dans la ZSLT.

Des alvéoles témoins⁴ sont également implantés dans les quartiers de stockage HA et MA-VL. Ils sont notamment décrits plus en détails dans le chapitre 3.5 du présent rapport, relatif à la surveillance.

⁴ Les alvéoles témoins sont, selon l'Andra, des ouvrages qui ne sont pas destinés à recevoir des colis de déchets radioactifs, mais dont le fonctionnement et le comportement sont représentatifs de ceux des ouvrages dont ils sont le témoin (alvéole HA et MA-VL).

L'Andra prévoit des zones de « carrefours dénivelés », où des galeries se superposent, notamment :

- la galerie de retour d'air (**GRA**) de la zone MA-VL passant au-dessus des galeries de liaison exploitation accédant au quartier MA-VL ;
- la galerie évacuation et secours de la ZLSE passant au-dessus des galeries de liaison exploitation accédant aux quartiers pilote et stockage HA ;
- le plenum de ventilation de la ZSLE passant au-dessus de plusieurs galeries et recoups de la ZSLE.

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 MA-VL (jusqu'à la bordure est de la ZIOS) et au-delà du quartier de stockage HA (bordure nord de la ZIOS).

2.2.3.2. Zones de soutien logistique

Deux ZSL assurent un appui logistique aux travaux de construction des ouvrages (ZSLT) et à l'exploitation du stockage (ZSLE). La ZSLT constitue l'interface entre les puits travaux (VVT, VFT, MMT) et les ouvrages en cours de construction, notamment des « tranches ultérieures » (après la phase pilote). Elle permet le transit des flux entrants et sortants (matériaux, équipements, air, etc.). Elle intègre également des démonstrateurs (scellement et alvéole HA). La ZSLE a pour fonction principale d'assurer le soutien aux opérations de mise en stockage des colis en connectant les puits (VVE et VFE) et descenderies (DSC) aux quartiers de stockage. Le cheminement des colis dans la ZSLE est décrit au chapitre 2.5.2. La ZSLE permet le transit de nombreux flux (colis, matériaux et équipements pour la maintenance ou la fermeture, secours, etc.) et répond principalement aux fonctionnalités suivantes : circulation, stockage de véhicules et matériels, maintenance, alimentation électrique et ventilation de la zone en exploitation. En particulier, un plénum, creusé au-dessus des galeries de la zone exploitation, relié à celles-ci par des puits verticaux et connecté au puits VFE, permet de gérer par soufflage la ventilation des galeries des différents quartiers. L'air vicié de l'installation souterraine, acheminé à l'aide d'un réseau d'extraction implanté en voûte des galeries (partie utile), converge quant à lui vers le puits VVE afin d'être rejeté en surface. Ces ZSL accueillent en outre des locaux ou niches techniques (électriques, de zone vie et secours, de stockage et maintenance des matériels, de froid et pour la ZSLT, stockage de véhicules, carburant, lavage, béton projeté, charge des batteries).

2.2.3.3. Quartiers pilote et de stockage HA

Le quartier pilote HA est destiné à recevoir des colis HA parmi les moins exothermiques (colis HA0). Le quartier de stockage HA sera construit et exploité plusieurs dizaines d'années après la mise en service prévue lors de la phase pilote (exploitation aux alentours de 2080), sur la base du retour d'expérience de l'exploitation du quartier pilote.

Le quartier pilote HA comporte jusqu'à une vingtaine d'alvéoles (cf. Figure 3). Trois alvéoles témoins sont positionnés au sein du quartier pilote HA et un démonstrateur de fermeture d'un alvéole est prévu au fond du quartier (à l'ouest après la recoupe entre GA et galerie d'évacuation/secours).

Les colis HA sont transférés vers le quartier pilote HA par la GLI nord-sud partant du carrousel situé dans la ZSLE, puis jusqu'aux alvéoles par une GA partant vers l'ouest, comme illustré sur la Figure 3. A l'est de la GLI et parallèle à celle-ci se trouvent une galerie dédiée à l'évacuation et au secours puis une galerie de liaison travaux, toutes deux connectées d'un côté à la ZSLT et de l'autre à la galerie d'évacuation/secours formant la bordure nord du quartier.

L'Andra prévoit de prolonger ces trois GLI vers le nord après la phase pilote pour desservir le quartier de stockage HA. Le déploiement de ce quartier est planifié en quatre sous-quartiers exploités les uns après les autres dans le sens horaire, depuis le sous-quartier sud-ouest jusqu'au sud-est. Le quartier de stockage HA est prévu pour accueillir environ un millier d'alvéoles dédiés principalement au stockage des colis de déchets vitrifiés fortement exothermiques (colis HA1/HA2). À la différence du DOS où les intercalaires étaient constitués de colis factices, au stade du DDAC, le quartier de stockage HA est également prévu pour accueillir des colis HA0 (la totalité était envisagée d'être stockée dans le quartier pilote dédié) et des colis MA-VL de déchets vitrifiés (leur stockage était

envisagé en quartier MA-VL) en intercalaires ; les autres intercalaires entre colis de stockage HA sont constitués d'espaces vides.

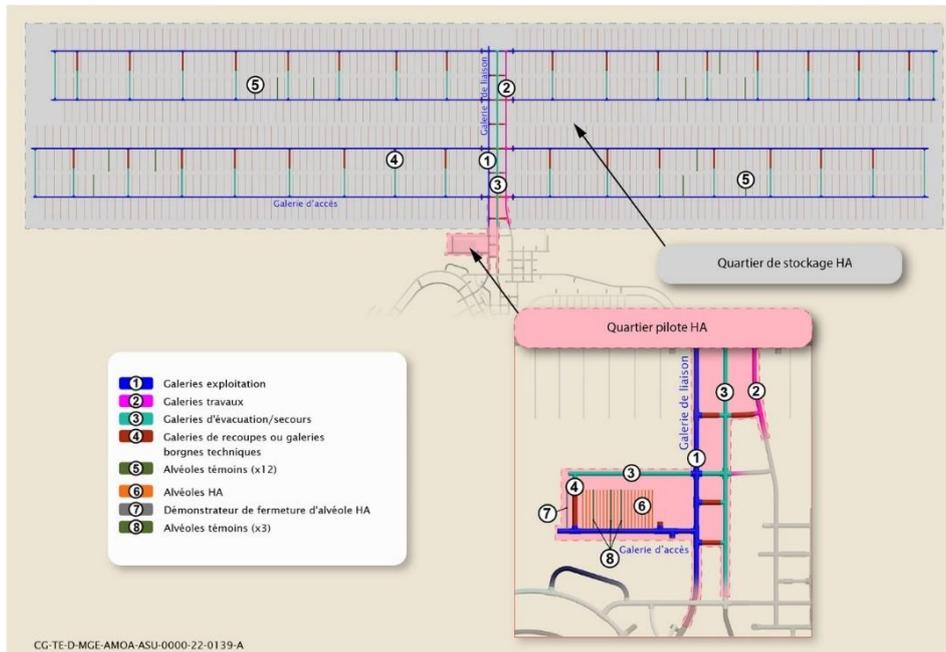


Figure 3. Illustration du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA à terminaison [37].

2.2.3.4. Quartier MA-VL

Le quartier MA-VL (cf. Figure 4) est constitué de 22 alvéoles (plus 4 alvéoles optionnelles, cf. chapitre 6.5) et de galeries qui servent à l'exploitation de ces alvéoles. Les alvéoles et leurs galeries d'accès sont placés perpendiculairement à la GLI et à la 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 ; des galeries de recoupe, situées entre les deux tubes *a minima* tous les 400 m, assurent des fonctions techniques (stations électriques) ou d'évacuation et d'intervention. 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 VVE. Enfin, des galeries travaux permettent de faire communiquer le quartier de stockage et la ZSLT.

Le quartier 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.

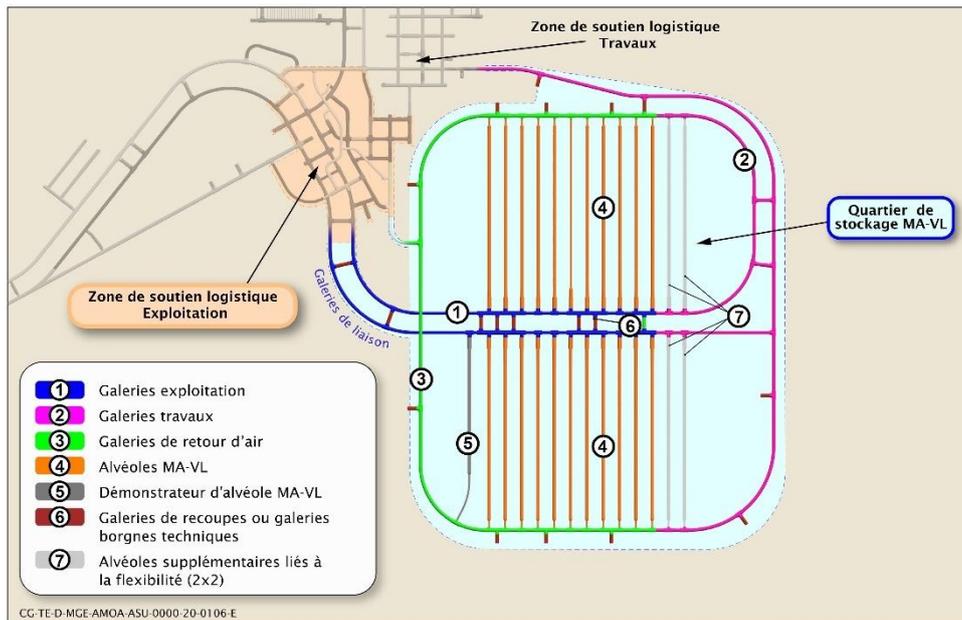


Figure 4. Illustration du quartier de stockage MA-VL [35].

2.3. Description des alvéoles HA et MA-VL

2.3.1. Alvéoles HA

Les alvéoles HA [37] 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 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.

La partie utile de l'alvéole est constituée d'un chemisage en acier non allié (nuance API 5L X65 MS), 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. Un jeu fonctionnel entre l'intrados du chemisage et le colis permet le remplissage de l'alvéole.

Les principaux éléments de la tête d'alvéole sont (cf. Figure 5) :

- le massif d'accostage en béton armé, fixé au revêtement de la GA et permettant l'accostage de la hotte (cf. chapitre 2.5.2). Il est équipé d'une paroi d'accostage en interface avec la hotte, et d'une bride métallique de fermeture ;
- l'insert métallique de tête d'alvéole, qui est un tube en acier de plus grand diamètre que le chemisage, placé dans le massif d'accostage et équipé d'un dispositif d'extraction des eaux d'exhaure ;
- la virole, tube en acier de plus grand diamètre que le chemisage, permettant le coffrage du béton du revêtement intérieur de la GA et le passage du chemisage ;
- le massif d'amorce en béton armé, situé entre le revêtement de la GA et le milieu géologique, zone utilisée notamment comme point d'entrée et de guidage du micro-tunnelier et permettant ensuite de créer une jonction étanche à l'eau entre la galerie d'accès et l'alvéole ;
- le support de joint d'étanchéité, composé d'un tube en acier scellé dans le massif d'amorce, d'une bride et d'une contre-bride. L'objectif du joint est de stopper le retour du MREA dans la galerie lors de son injection.

Une armoire technique (dite « d'inertage ») (cf. Figure 5) est positionnée en GA, à côté de la tête d'alvéole. Elle est équipée d'un dispositif d'analyse de la composition de l'atmosphère de l'alvéole (prélevée à l'aide d'un tube positionné sur toute la longueur de l'alvéole), d'une soupape de régulation pour limiter la surpression de l'alvéole

par rapport à celle de la galerie et d'un dispositif de récupération des eaux d'exhaure et des fines de corrosion, qui permet également de réaliser des prélèvements pour contrôles ultérieurs.

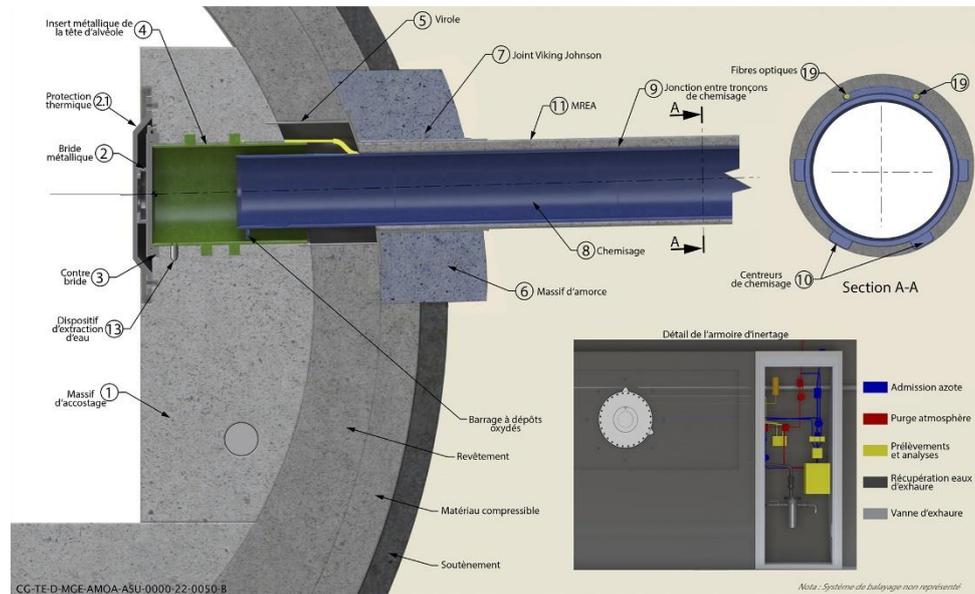


Figure 5. Schéma de la tête d'alvéole HA et de son armoire technique (dispositif de prélèvement et d'inertage non représenté) [37].

Différents équipements sont mis en place lors de la construction, l'exploitation et la fermeture de l'alvéole :

- un dispositif d'extraction de l'eau d'exhaure, qui est dirigée vers des cuves situées dans une niche dédiée à l'entrée du quartier pilote ou dans les recoupes des GA aux alvéoles du quartier de stockage HA ;
- un dispositif amovible de prélèvement de l'atmosphère interne et d'inertage, constitué d'un tube introduit au travers de la bride et guidé par un fourreau situé à l'intrados du chemisage et relié à l'armoire technique ;
- une fibre optique fixée à l'extrados du chemisage, sur toute la longueur de l'alvéole, permettant la surveillance de la température dans celle-ci ;
- un bouchon de radioprotection d'exploitation, amovible, placé en tête d'alvéole entre la bride métallique et le chemisage. Ce bouchon est retiré puis remplacé par la hotte et par le robot-poussoir lors de la mise en place de chaque colis ;
- un bouchon d'alvéole, constitué de trois conteneurs de géométrie proche de celle des colis CSD-V et d'un conteneur d'un diamètre légèrement supérieur visant à combler au mieux l'espace annulaire entre les colis et le chemisage afin de réduire les potentielles fuites de rayonnement entre l'alvéole et la galerie, remplis d'un matériau argileux bentonitique. Le conteneur le plus proche des colis est équipé d'un bouchon de radioprotection définitif. Ces équipements sont mis en place dans la continuité du stockage du dernier colis HA, avant la fermeture de l'alvéole ;
- un capot de protection thermique destiné à maintenir l'intégrité de la bride et du bouchon d'alvéole en cas d'incendie dans la GA.

S'agissant de la construction, de l'exploitation puis de la fermeture de l'alvéole HA, la première étape consiste au creusement de l'alvéole par un micro-tunnelier. Les tronçons de chemisage, de l'ordre de 2 à 3 m de longueur, sont mis en place les uns derrière les autres, une fois l'alvéole creusé sur toute sa longueur, puis le MREA est injecté par le fond d'alvéole. Ensuite, la tête de l'alvéole est construite et les équipements sont mis en place. Les conditions d'environnement de l'alvéole sont surveillées (notamment, concentration en oxygène et température) jusqu'au chargement des premiers colis de stockage. Il peut s'écouler de quelques semaines à une vingtaine d'années entre la construction et le chargement d'un alvéole. Avant le chargement du premier colis, la géométrie interne de l'alvéole est vérifiée et le tube de prélèvement et d'inertage est retiré. Des contrôles sont également réalisés avant la mise en service (vérification de la conformité de la construction aux spécifications

relatives aux matériaux, équipements, dimensions, etc.). Le bouchon de radioprotection d'exploitation est retiré puis remis en place entre chaque chargement de colis (cf. chapitre 2.5.2 ci-après relatif aux procédés nucléaires). Le chargement d'un alvéole s'étale sur une durée de quelques semaines. Après le chargement du dernier colis et la mise en place du bouchon d'alvéole, les conditions d'environnement sont de nouveau surveillées (remise en place du tube de prélèvement et d'inertage). Le dispositif d'extraction de l'eau et les moyens de surveillance (prélèvement/inertage et fibre optique) restent en place jusqu'à la fermeture définitive de l'alvéole. La durée entre la fin du chargement et la fermeture définitive d'un alvéole est de l'ordre de 15 à 60 ans. La fermeture définitive d'un alvéole consiste principalement à retirer le tube de prélèvement et d'inertage, ainsi qu'à arrêter le suivi de la température et du drainage d'eaux d'exhaure, au fur et à mesure du remblaiement de la GA aux alvéoles. La durée de cette phase est de l'ordre d'un an pour l'ensemble du quartier pilote HA, et de l'ordre de 3 à 4 ans pour chaque sous-quartier du quartier de stockage HA. A terme, la température s'élève de 22°C à 50°C pour le quartier pilote HA et de 22°C à 90°C pour le quartier HA.

2.3.2. Alvéoles MA-VL

Les alvéoles MA-VL sont des tunnels d'axe quasi horizontal [38]. Ils sont constitués d'une cellule de manutention qui comporte les équipements nécessaires à la manutention des colis pour leur mise en place dans l'alvéole, d'une partie utile de stockage et d'une jonction de retour d'air (JRA) en fond de partie utile (cf. Figure 6). 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 : de l'ordre de 8 m pour la partie utile et 4 m pour la JRA. Les alvéoles MA-VL sont tous semblables, à l'exception de ceux dédiés au stockage des colis de type CS 6⁵ (conteneurs métalliques), de diamètres plus petits.

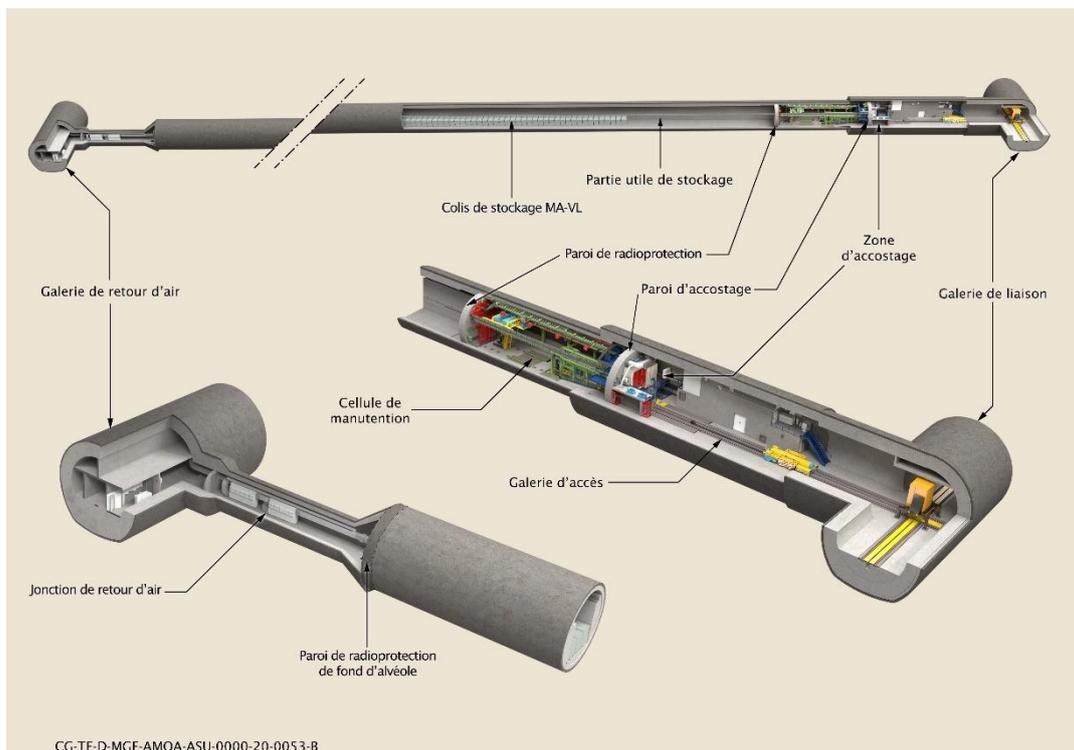


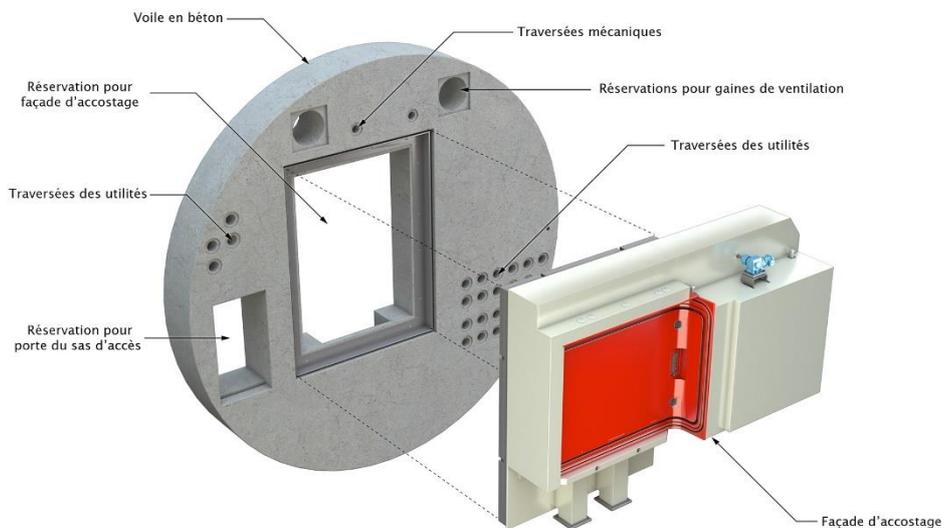
Figure 6. Schéma d'un alvéole MA-VL et de sa galerie d'accès [35].

La stabilité de l'alvéole est assurée par un revêtement en béton, mis en place rapidement derrière le front de taille lors de l'excavation au tunnelier. L'extrados de ce revêtement intègre un matériau compressible, dans l'objectif de réduire et retarder les efforts mécaniques sur le revêtement, induits par la convergence de la roche. La jupe du tunnelier est laissée en place en fin de creusement de l'alvéole et constitue le revêtement en fond de

⁵ Les colis de type CS 6 ne sont pas gerbés et une seule ligne de colis de 500 m de longueur est prévue par alvéole. Le diamètre de l'alvéole est réduit en partie utile à 3-4 m afin de limiter les vides.

partie utile. La JRA est quant à elle creusée par une méthode conventionnelle à partir de la GRA, avec soutènement en béton projeté. La construction du génie civil de l'alvéole comporte ensuite la réalisation du revêtement définitif, puis la pose du génie civil secondaire (radiers, voiles, remplissage en voûte, etc.). Le radier comporte des réservations pour différents équipements nécessaires à l'exploitation de l'alvéole. Enfin, les réseaux et équipements nécessaires au fonctionnement de l'alvéole sont mis en place et les essais préalables à la mise en service sont réalisés (tests de bon fonctionnement des équipements en inactif).

La paroi d'accostage (cf. Figure 7) marque la limite entre la GA (zone où le colis MA-VL est dans la hotte) et la cellule de manutention. Le voile de cette paroi est construit en béton armé, d'épaisseur d'ordre métrique, avec des traversées pour les passages de câbles et de la ventilation. La façade d'accostage est intégrée dans ce voile. Un sas, accolé à la paroi d'accostage, permet l'accès à la cellule de manutention.



CG-TE-D-MGE-AMOA-ASU-0000-20-0050-A

Figure 7. Schéma de la paroi d'accostage d'un alvéole MA-VL [38].

La cellule de manutention, d'une longueur d'environ 25 m, est occupée par les équipements permettant d'extraire le colis de la hotte MA-VL et de le positionner pour qu'il puisse être pris en charge par le pont stockeur et acheminé vers sa localisation de stockage dans l'alvéole (cf. chapitre 2.5.2 ci-après relatif aux procédés nucléaires). La circulation du pont stockeur s'effectue *via* deux rails situés en partie haute de la voute. La paroi de radioprotection (cf. Figure 8), entre la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole, placée en zone contrôlée rouge, est constituée d'une partie fixe en béton d'une épaisseur d'ordre métrique et d'un écran constitué de panneaux mobiles en acier. L'écran reste fermé, sauf pour laisser passer le pont stockeur. Une seconde paroi de radioprotection est présente en fond de partie utile. Enfin, la JRA, d'une trentaine de mètres de longueur, comporte notamment les conduits de ventilation provenant de la partie utile et les filtres.

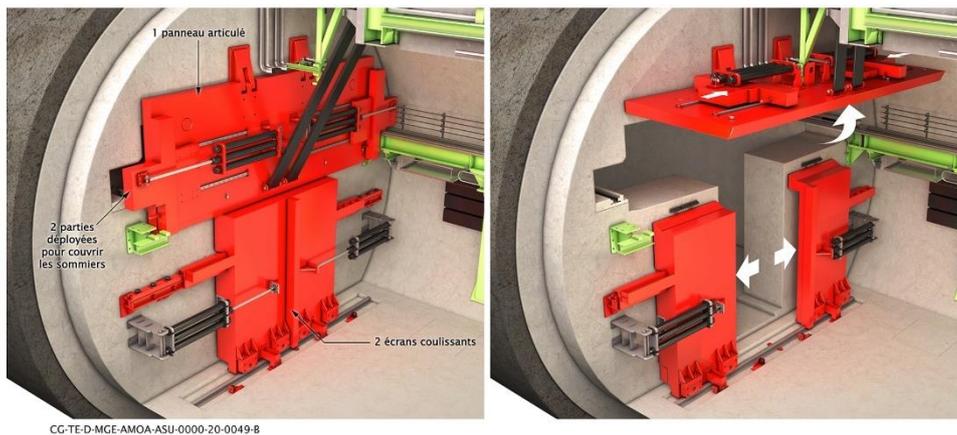


Figure 8. Schéma de la paroi de radioprotection entre la cellule de maintenance et la partie utile de l'alvéole MA-VL [38].

Les moyens de surveillance et les câbles de transmission de données sont intégrés dans le béton du génie civil ou placés en paroi de la partie utile de l'alvéole. Il s'agit notamment d'équipements pour mesurer la température ou la concentration d'hydrogène dans l'air, pour suivre dans le temps les évolutions mécaniques du revêtement ou la capacité à mettre en place et retirer les colis (par exemple, suivi des jeux de maintenance), pour surveiller la zone endommagée dans le COX suite au creusement⁶, ou encore pour s'assurer du bon fonctionnement de la ventilation.

Au cours de la phase de fonctionnement de l'alvéole, le remplissage se fait par nappes⁷, depuis le fond de l'alvéole. A la fin du remplissage de chaque nappe, des blocs sont mis en place à l'entrée de la partie utile de l'alvéole afin de constituer un écran de radioprotection. Selon le type de colis, les alvéoles contiennent entre une et trois nappes, constituées d'une à trois rangées. Le remplissage des alvéoles est prévu pour s'étaler sur au moins une vingtaine d'années, voire plusieurs décennies pour certains alvéoles.

Après le remplissage de la dernière nappe et la mise en place des blocs de radioprotection, l'alvéole est mis « sous cocon » (mise en veille ou retrait d'équipements) ; la ventilation est maintenue pendant cette phase. Enfin, la fermeture de l'alvéole et de sa galerie d'accès consiste notamment à retirer les derniers équipements, à arrêter la ventilation en partie utile de l'alvéole (maintien d'une ventilation provisoire en cellule de maintenance) et à réaliser un clavage entre les blocs de radioprotection et entre les blocs et la paroi de radioprotection pour assurer le confinement statique de l'alvéole. La cellule de maintenance et la JRA sont ensuite remblayées.

2.4. Les colis de stockage

L'inventaire de référence (voir Annexe T3) intègre les déchets d'exploitation et de démantèlement de toutes les installations nucléaires existantes (réacteurs, usines, laboratoires) soit environ 10 000 m³ de déchets HA (près de 56 000 colis primaire) et 73 000 m³ de déchets MA-VL (près de 167 000 colis primaire).

2.4.1. 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. Ils sont répartis en 19 familles de colis.

Le colis de stockage HA, confectionné dans le bâtiment EP1 pour les colis HA0 stockés en phase pilote et dans le bâtiment EP2 pour les colis HA1/HA2 stockés dans les phases d'exploitation ultérieures, est composé d'un conteneur de stockage étanche contenant un ou deux colis primaires (cf. Figure 9). 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

⁶ Un suivi de l'évolution de la zone endommagée est réalisé dans l'alvéole témoin, au niveau de sections instrumentées et de forages radiaux réalisés dans la roche depuis l'intérieur de l'ouvrage.

⁷ Une nappe correspond à un niveau horizontal de colis de stockage.

fond soudé d'une épaisseur adaptée à celle de la virole et d'un couvercle de forme convexe (limitant la surface de contact entre les colis de stockage en alvéoles) muni d'une gorge de manutention, tous trois réalisés en acier à bas carbone non allié (nuance P 285 NH [39]). Quatre patins en céramique 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. Ils facilitent le glissement du colis de stockage lors de sa mise en place et de son éventuel retrait. Du fait de sa nature non sensible à la corrosion, le patin porte l'identification du colis (gravure).

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 et leur masse, une fois le colis de stockage constitué, est comprise entre 1,2 t et 2,3 t. 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 15⁸ (épaisseurs respectivement de 32,5 mm et 20,5 mm).

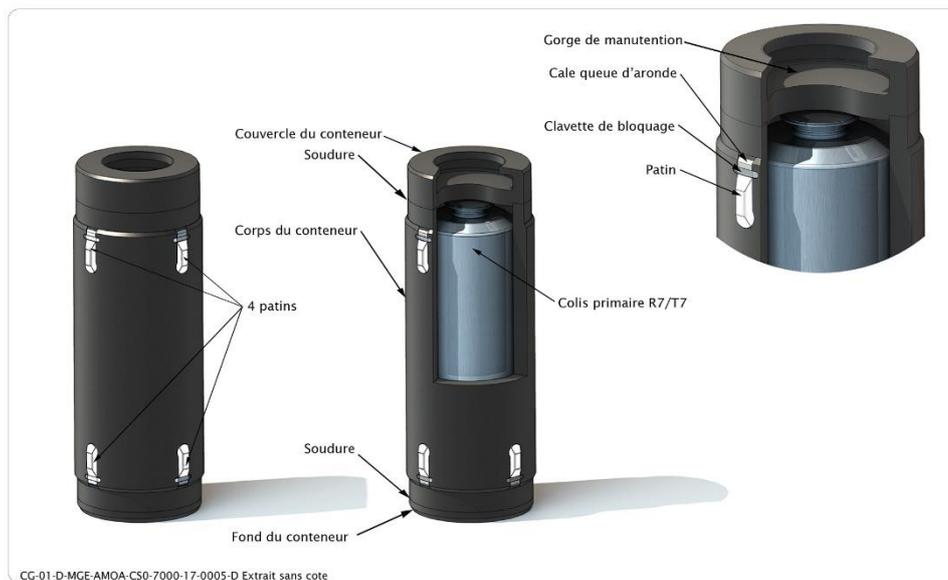


Figure 9. Illustration des composants d'un conteneur de stockage HA pour le cas de colis primaire de déchets vitrifiés provenant de l'usine d'Orano La Hague [40].

2.4.2. Colis de stockage MA-VL

Les déchets MA-VL 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. Les colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence sont répartis au sein de 80 familles [40].

Afin de distinguer leur évolution à long terme, ils sont également classés selon 7 catégories physico-chimiques : les colis de déchets salins (MA-VL1), de déchets bitumés (MA-VL2), de déchets organiques (MA-VL3), de déchets métalliques de structure avec matrice cimentaire (MA-VL4) et sans matrice cimentaire (MA-VL5), de déchets vitrifiés (MA-VL6) et de déchets sodés (MA-VL7). Ces catégories sont également utilisées par l'Andra pour établir des règles de co-stockage : les catégories MA-VL1, MA-VL2 et MA-VL3, susceptibles de générer des perturbations physico-chimiques entre elles et vis-à-vis des autres familles, sont stockées dans des alvéoles dédiés. Pour les autres, l'Andra retient tant que possible un agencement dans les alvéoles sans mélange de catégories, sans exclure la possibilité d'un co-stockage⁹.

⁸ Destiné aux colis primaires AVM, moins exothermiques que la plupart des déchets vitrifiés.

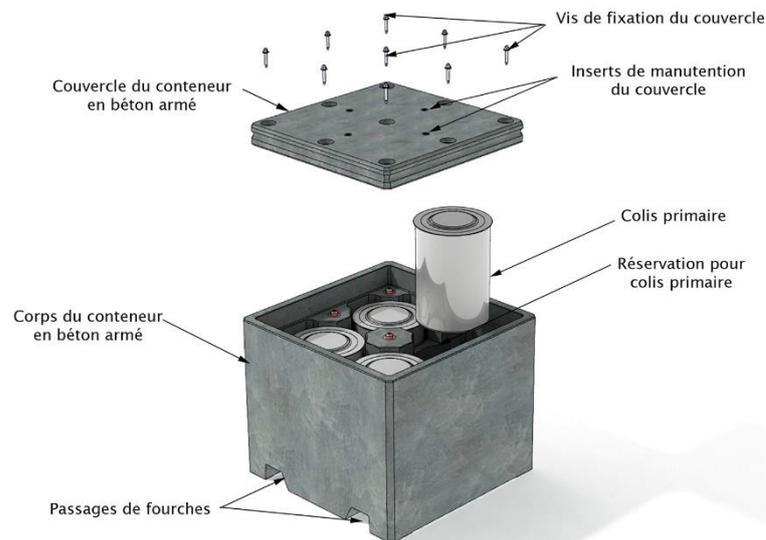
⁹ Les colis de la catégorie MA-VL7 sont en très faible nombre et ne sont pas encore produits ; ils ne sont pas stockables avec d'autres catégories de déchets et l'Andra identifie deux options, leur stockage en l'état dans des alvéoles dédiés ou leur traitement pour être classés en catégories MA-VL4 ou MA-VL5.

Deux modes de stockage sont retenus pour le stockage de déchets MA-VL :

- le stockage des colis primaires après mise en conteneur de stockage dans l'installation EP1, soit en conteneur standard avec couvercle vissé, soit en conteneur renforcé vis-à-vis du confinement avec un couvercle vissé et clavé ;
- le « stockage direct », consistant à la mise en place du colis primaire directement en alvéole de stockage soit de façon unitaire, soit en disposant plusieurs colis primaires dans un panier de stockage.

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 (cf. Figure 10), 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). S'agissant en particulier des conteneurs en béton, la solution technique retenue est l'utilisation d'éléments préfabriqués en béton armé constitués d'un corps et d'un couvercle. Des passages de fourches sont prévus sur la face inférieure pour assurer la manutention. Enfin, l'identification du conteneur est marquée à la peinture sur les quatre faces de côté [41].

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 et une masse maximale de 17 t.



CG-01-D-MGE-AMOA-CS0-7000-17-0010-A

Figure 10. Illustration des composants d'un conteneur de stockage MA-VL à couvercle vissé de type CS4.1 [40].

2.5. Procédés mis en œuvre dans Cigéo

Le présent chapitre décrit les principaux procédés nucléaires opérés sur les colis depuis leur arrivée à Cigéo jusqu'à leur mise en place à l'emplacement prévu pour leur stockage. Cet ensemble d'opérations (déplacements, contrôles, mise en conteneur de stockage, etc.) forme une chaîne dite cinématique, qui correspond à un temps moyen de l'ordre de 10 jours pour les colis MA-VL et de l'ordre de 50 jours pour les colis HA. Ces opérations nucléaires, qui se déroulent principalement au sein de l'installation de surface EP1, sont prioritairement commandées en salle de conduite centralisée (**SCC**) localisée dans cette installation. Un opérateur peut également, par exemple, piloter l'installation de façon semi-automatique depuis un poste de conduite local (**PCL**) dès lors que la salle de conduite centralisée lui en a donné l'autorisation, ce qui peut s'avérer nécessaire lors de phases de remise en service à la suite d'une intervention, notamment. À la fin de ce type d'opération, l'opérateur en local rend la main à la salle de conduite centralisée pour la reprise de l'exploitation courante. L'ensemble des PCL peut être suppléé par des pupitres mobiles raccordés localement pour créer une interface homme machine et ainsi obtenir un accès direct à un automate programmable industriel pour des cas de maintenance. Le Tableau

1 présente les différents modes d’exploitation rencontrés au sein de l’installation de surface, notamment pour les équipements mécaniques formant la chaîne cinématique.

Tableau 1. Modes d’exploitation de l’installation de surface [35].

Modes d'exploitation	Principe de conduite	Action	Lieu de conduite
Automatique	Les opérations du processus nucléaire s'exécutent par étapes prédéfinies de façon continue. Les transitions des étapes sont réalisées sans interruption si les conditions prédéfinies sont remplies.	Pilotage automatique L'opérateur peut marquer une pause dans la progression du processus, mais il ne peut pas contraindre les transitions.	Salle de conduite centralisée (SCC)
Semi-automatique	Les transitions des étapes sont réalisées par des validations opérateurs si les conditions prédéfinies sont remplies.	Pilotage enchaînement au pas à pas par opérateur. L'opérateur peut marquer une pause dans la progression du processus, mais il ne peut pas contraindre les transitions.	Salle de conduite centralisée (SCC) Poste de conduite local (PCL)
Manuel Asservi	L'équipement est piloté manuellement par l'opérateur (sécurités actives).	Pilotage manuel par opérateur	Salle de conduite centralisée (SCC) Poste de conduite local (PCL) ou pupitre mobile
Maintenance	L'équipement est piloté manuellement par le personnel de maintenance (sécurités peuvent être inhibées).	Pilotage manuel par personnel de maintenance	Poste de conduite local (PCL) ou pupitre mobile

2.5.1. Procédés nucléaires dans l’installation de surface

Généralités

Les opérations nucléaires dans l’installation de surface EP1 comprennent le déchargement des convois ferroviaires, la préparation des colis de stockage, leur fermeture (ou réouverture si besoin), leur mise en hotte et enfin les opérations de transfert de la hotte sur le funiculaire en tête de descenderie colis. Les principales zones opérationnelles sont illustrées sur la Figure 11 et sont appelées à chaque fois que nécessaire pour la description des procédés dans la suite de ce chapitre.



Figure 11. Illustration du bâtiment nucléaire de surface EP1 – Niveau +0 m (adapté de [35]).

La majorité des opérations nucléaires est abritée par le niveau +0 m du bâtiment EP1. À l’exception du transfert des emballages de transport (opérations à -11 m, cf. Figure 13 ci-après), ce niveau permet l’ensemble des transferts horizontaux des colis dans l’installation avec des chariots sur rail pouvant être associés à des

transbordeurs. De façon générale, un transbordeur et son chariot sont des équipements de manutention sur rails qui permettent de distribuer les ET, les colis primaires et les colis de stockage aux différents postes qu'ils desservent. La Figure 12 illustre les zones d'évolution des transbordeurs et chariots au sein de EP1 à +0 m. Le transbordeur de chariot a pour principale fonction de transférer latéralement le chariot au droit des différentes cellules (ou en zone tampon) du procédé nucléaire. Le chariot a pour principale fonction de transférer longitudinalement une palette à l'intérieur d'une cellule (ou en zone tampon), sans changement de direction. La palette maintient un à quatre colis de stockage suivant le type (HA ou MA-VL). Dans le cas des emballages de transport, le chariot maintient une rehausse¹⁰ sur laquelle est fixé un ET pour les opérations de transfert à -11 m.



Figure 12. Illustration de la zone d'évolution des transbordeurs/chariots à +0 m [35].

Ces opérations de transfert horizontaux au sein d'EP1 sont réalisées depuis un poste de commande distant en automatique depuis la SCC.

Une zone tampon ((4) de la Figure 11) est utilisée pour gérer les différences de durées des opérations nucléaires dans les cellules qui se succèdent. Chaque ligne de la zone tampon est dédiée à un type de colis de stockage suivant les campagnes, afin notamment de dissocier les différents types de flux (colis en attente de fermeture et colis prêts pour l'envoi vers la mise en hotte).

Opérations de déchargement des convois ferroviaires

Les convois ferroviaires arrivent par l'installation terminale embranchée (ITE) à l'entrée du terminal ferroviaire où ils font l'objet d'un contrôle administratif, avant d'être acheminés par un locotracteur au sein du terminal ferroviaire. Les wagons du convoi sont alors désolidarisés afin d'être déplacés unitairement dans le hall de déchargement de EP1 ((1) de la Figure 11). L'ET est ensuite déverrouillé du wagon et, après réalisation de contrôles (température externe, contamination surfacique, débit de dose et contrôle visuel) dans la zone de préparation des ET ((2) de la Figure 11), est basculé en position verticale puis transféré à l'aide d'un pont roulant en fosse (-11 m, cf. Figure 13), sur un chariot équipé d'une rehausse correspondant au type d'emballage reçu. Ces opérations de transfert sont réalisées en mode d'exploitation « manuel asservi » (cf. Tableau 1).

Une bride d'accostage est ensuite fixée sur l'emballage de transport puis, après réalisation d'un contrôle de l'atmosphère intérieure de l'emballage de transport, le chariot est déplacé par un transbordeur jusqu'à la zone d'accostage où l'emballage est accosté¹¹ par la trappe d'accostage à la cellule de déchargement (Figure 14). Les opérations de fixation de la bride et de contrôle sont réalisées en mode « manuel asservi » en PCL ; les opérations

¹⁰ Les rehausse, spécifiques à chaque type d'emballage, permettent de maintenir une altimétrie identique au niveau de l'interface d'accostage.

¹¹ L'opération d'accostage consiste à relier l'ET à la cellule supérieure de déchargement de façon étanche.

de transfert et d'accostage de l'emballage sont réalisées en automatique depuis la SCC après déconsignation de l'emballage (cf. Tableau 1).



Figure 13. Emballage de transport positionné sur la réhausse (-11 m) et accosté à la cellule supérieure de déchargement (+0 m) par la trappe d'accostage [35].

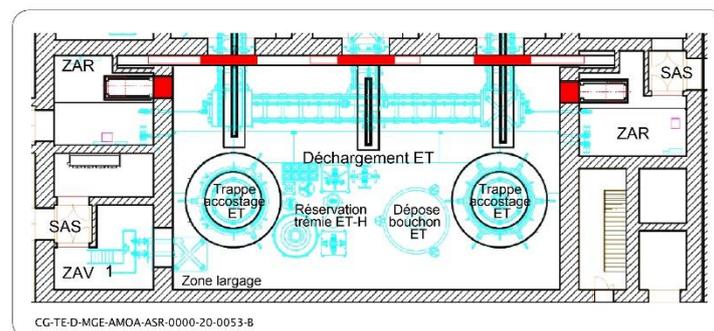


Figure 14. Illustration de la trappe d'accostage de la cellule de déchargement [35].

Opérations de préparation des colis de stockage

Chaque colis primaire MA-VL ou HA est extrait de son ET à l'aide d'un pont nucléarisé¹² et placé sur un réseau de convoyage¹³, au niveau +0 m, qui permet de diriger le colis vers la cellule de préparation des colis de stockage ((3) de la Figure 11 pour son emplacement dans EP1 et Figure 15 pour son architecture) en passant par une cellule de contrôles visuels à l'aide d'une caméra et de contrôles radiologiques réalisés par un bras robotisé. Une fois en cellule de préparation des colis, le colis primaire est déplacé par un pont nucléarisé de son chariot jusque dans un conteneur de stockage ou un panier de stockage (en cas de stockage direct) fixé sur une palette (1 colis par palette MA-VL, 4 colis par palette HA) reposant elle-même sur un chariot porteur. Le pont réalise alors plusieurs transferts successifs de colis primaires pour remplir le conteneur ou le panier. Lorsque le couvercle a été posé sur le conteneur de stockage ou sur le panier¹⁴, le colis de stockage est alors transféré par un transbordeur vers la cellule de fermeture du colis de stockage si celle-ci n'est pas occupée, ou en zone tampon des colis de stockage ((4) de la Figure 11) dans le cas contraire.

¹² Le pont de catégorie « nucléarisé » permet un déplacement automatique suivant la cartographie liée aux opérations à effectuer. Une corrélation entre le grappin connecté et le type de colis permet de gérer l'effort de levage et d'en assurer l'arrêt en cas de surcharge. Pendant la phase de levée, une mesure de la masse du colis primaire est effectuée par un peson. Il est compatible avec l'ambiance radiologique en cellule.

¹³ Ce réseau est constitué de cinq chariots et de quatre transbordeurs.

¹⁴ Son couvercle est en acier.

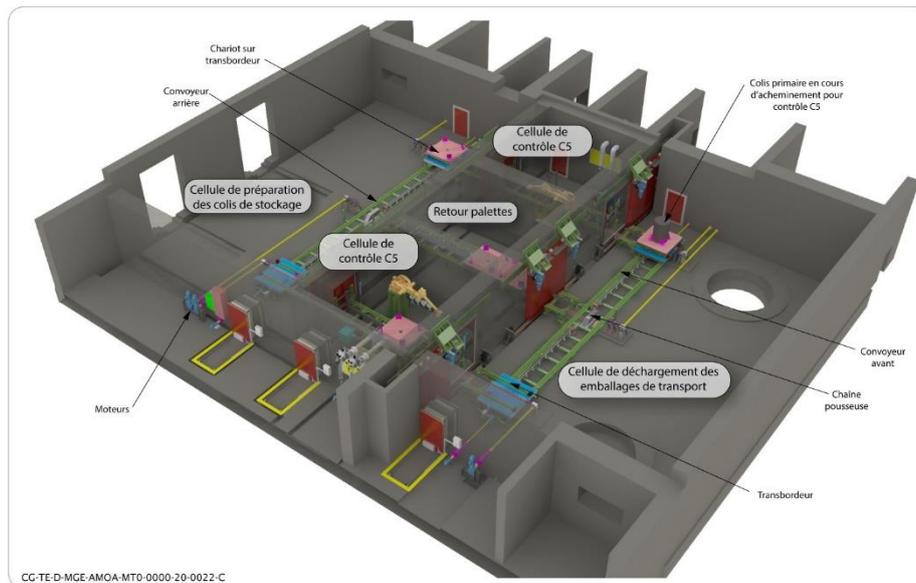


Figure 15. Illustration de la zone de préparation des colis de stockage (cellule de déchargement à droite, de contrôle au centre, de préparation à gauche) [35].

Opérations de fermeture des colis

Pour ce qui concerne la fermeture des colis, des cellules distinctes sont prévues pour le cas des colis ou panier de stockage MA-VL ((5) de la Figure 11) et celui des colis HA ((6) de la Figure 11).

S'agissant d'un colis de stockage ou d'un panier de stockage MA-VL, la palette sur laquelle est fixé le colis ou le panier de stockage est déposée par le chariot sur une table tournante au sein de la cellule de fermeture MA-VL. Les opérations de fermeture comprennent le vissage du couvercle ainsi que le possible clavage du couvercle avec un liant hydraulique dans le cas de la réalisation d'un conteneur renforcé, l'ensemble étant suivi d'un contrôle qualité final. Le chariot porteur récupère ensuite la palette puis le transbordeur transfère ce chariot vers la zone tampon précitée.

S'agissant d'un colis de stockage HA, la palette sur laquelle sont fixés 4 colis de stockage HA est déposée par un chariot (cf. Figure 16) dans la cellule de fermeture HA. Au sein de cette cellule, un pont nucléarisé permet la manutention des colis de stockage HA vers chaque poste de travail ou « casemates » pour la réalisation des opérations de fermeture suivantes : soudage du couvercle de conteneur sur le corps du conteneur¹⁵, usinage du bourrelet du cordon de soudure afin que l'état de surface soit compatible avec les méthodes de contrôle, contrôle d'usinage, détensionnement pour libérer les contraintes résiduelles dans les matériaux dues à l'opération de soudage et contrôle de l'intégrité des patins du colis et de la soudure (détection des défauts de surface et en profondeur). L'entrée dans ces casemates de travail se fait par l'intermédiaire de chariots-porte qui assurent une protection radiologique équivalente à celle du béton des casemates. En sortie de cellule de fermeture HA, les colis sont déposés sur une nouvelle palette afin de permettre leur transfert par un transbordeur vers la zone tampon ((4) de la Figure 11), une fois la palette complète (4 colis).

¹⁵ La virole et le fond du couvercle arrivent déjà soudés à Cigéo.

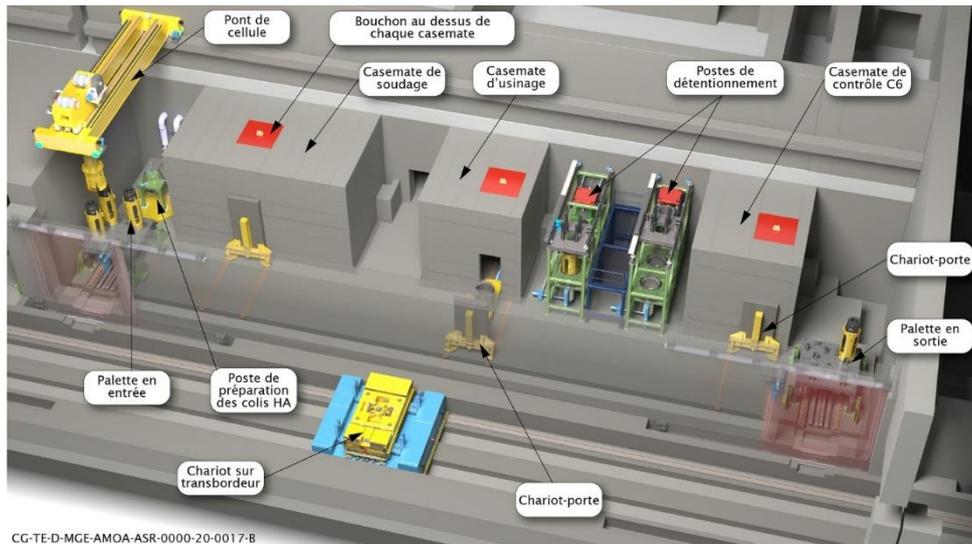


Figure 16. Illustration de la cellule de fermeture HA et des postes associés [35].

Opérations de mise en hotte des colis

Après passage dans la zone tampon ((4) de la Figure 11), la palette chargée de colis de stockage HA ou MA-VL est transférée par un transbordeur jusqu'à la cellule de mise en hotte HA ((8) de la Figure 11) ou MA-VL ((9) de la Figure 11).

S'agissant des colis de stockage MA-VL, le chariot dépose la palette sur une table tournante puis un robot procède au contrôle du colis (contamination surfacique, débit de dose, masse et contrôle visuel). Un pont roulant nucléaire transfère ensuite le colis de stockage de la palette jusqu'à un élévateur. Au sein d'un parc à hottes ((15) de la Figure 11) situé à proximité de la cellule de mise en hotte, la machine dite « à levage limité » (**MLL**) vient alors positionner une hotte MA-VL vide (cf. Figure 17) sur une table d'accostage au niveau d'une façade d'accostage située à l'interface entre la cellule de mise en hotte ((8) de la Figure 11) et le parc à hottes ((15) de la Figure 11). Après accostage de la hotte, la façade d'accostage et la porte de la hotte sont ouvertes simultanément, puis le colis de stockage déposé sur l'élévateur est récupéré par un système de chargement composé d'une table et d'un plateau de chargement permettant la dépose complète du colis dans la hotte. Après dépose, les portes de la hotte et de la façade se referment et sont verrouillées. La hotte est alors reculée par la table d'accostage pour être manutentionnée par la MLL au sein du parc à hottes.

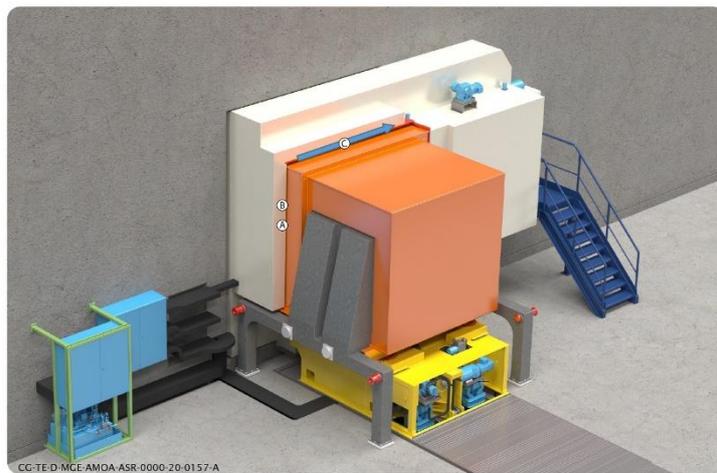


Figure 17. Hotte MA-VL accostée dans le parc à hottes au niveau de la façade d'accostage avec la cellule de mise en hotte. La table d'accostage est en jaune et la hotte en orange [35].

S'agissant des colis de stockage HA, la palette est transférée dans le sas d'entrée de la cellule de mise en hotte HA, au sein d'une casemate en acier qui contient une trappe d'extraction supérieure (cf. Figure 18). A la suite de l'ouverture de la trappe, un pont nucléarisé transfère un des colis de stockage jusqu'au poste de contrôle (contamination surfacique, débit de dose, masse et contrôle visuel). La trappe supérieure est refermée et les autres colis de stockage restent en attente. Depuis le poste de contrôle, le transfert du colis de stockage est réalisé vers le poste de mise à l'horizontale par le pont, puis le colis est orienté de telle sorte que sa mise en position horizontale assure que des patins de glissement soient en position basse pour sa mise en stockage. Le basculeur met à hauteur de hotte le colis de stockage HA avant de le basculer à l'horizontale en attente de sa préhension par la hotte. Après accostage de la hotte HA selon les mêmes principes que pour les hottes MA-VL, la mise en hotte du colis de stockage est réalisée à l'aide d'un grappin, qui amène le colis dans un fourreau, puis le fourreau amène le tout dans la hotte. La porte blindée de la hotte se referme devant le fourreau, puis la hotte est désaccostée de la façade de la cellule de mise en hotte HA, puis déplacée par la table d'accostage, afin d'être manutentionnée par la MLL.

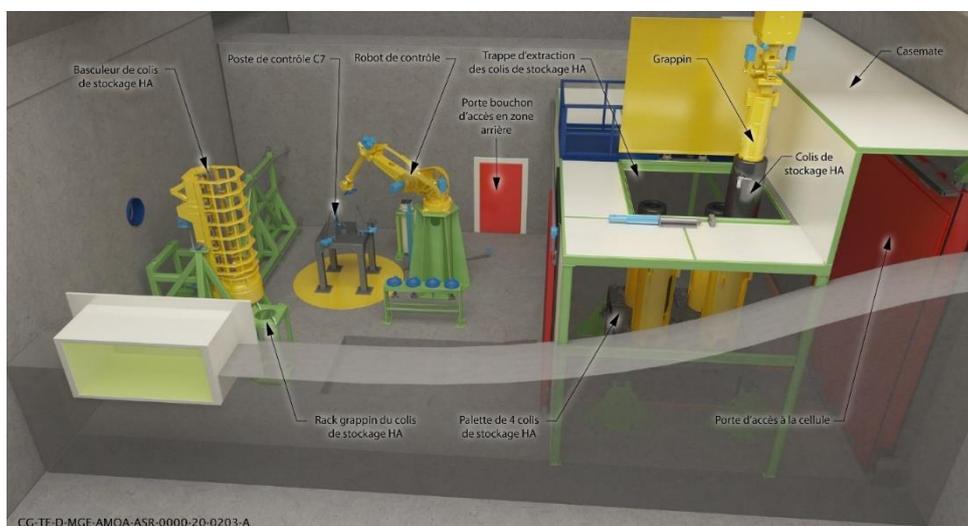


Figure 18. Illustration de la cellule de mise en hotte HA avec sur le mur de gauche en bleu la façade d'accostage [35].

Transfert de la hotte vers la tête de descenderie colis

La hotte désaccostée contenant le colis de stockage HA ou MA-VL est mise en place par la MLL sur une table tournante, puis une navette de surface assure le transfert individuel de la hotte jusqu'au funiculaire situé dans la tête de descenderie colis. La hotte est alors déposée sur le funiculaire, puis la navette se désolidarise de la hotte. La porte de la tête de descenderie est alors refermée permettant le départ du funiculaire.

2.5.2. Procédés nucléaires dans l'installation souterraine

Le funiculaire réalise le transfert des hottes depuis la tête de la descenderie jusqu'à sa gare basse. Les opérations de prise en charge d'une hotte pleine ou de dépôt d'une hotte vide (HA ou MA-VL) en gare basse sont réalisées à l'aide de deux chariots de transfert « fond » positionnés de part et d'autre de la gare basse.

L'orientation des chariots chargés d'une hotte pleine vers les GLI de l'installation souterraine est réalisée dans la ZSLE au niveau d'un carrousel (cf. Figure 19.a). Celui-ci est équipé de quatre tables tournantes, situées aux points nord-ouest, nord-est, sud-est et sud-ouest du carrousel, pour les changements de direction (cf. Figure 19.b). Le transfert des hottes dans les GLI peut se dérouler suivant deux configurations d'exploitation : l'exploitation d'une seule GLI¹⁶ ou l'exploitation de deux GLI à la fois¹⁷. La principale règle d'exploitation pour la gare basse et le

¹⁶ Exploitation uniquement des alvéoles situés au nord du quartier de stockage MA-VL, ou uniquement des alvéoles situés au sud du quartier de stockage MA-VL, ou uniquement du quartier pilote HA, ou uniquement du quartier de stockage HA.

¹⁷ Exploitation des alvéoles situés au nord ou au sud du quartier de stockage MA-VL et d'un des quartiers HA (quartier pilote HA ou quartier de stockage HA), ou exploitation des alvéoles situés au nord et au sud du quartier de stockage MA-VL.

carrousel à l'égard de la hotte est qu'un seul chariot avec une hotte pleine peut se déplacer dans l'installation souterraine.

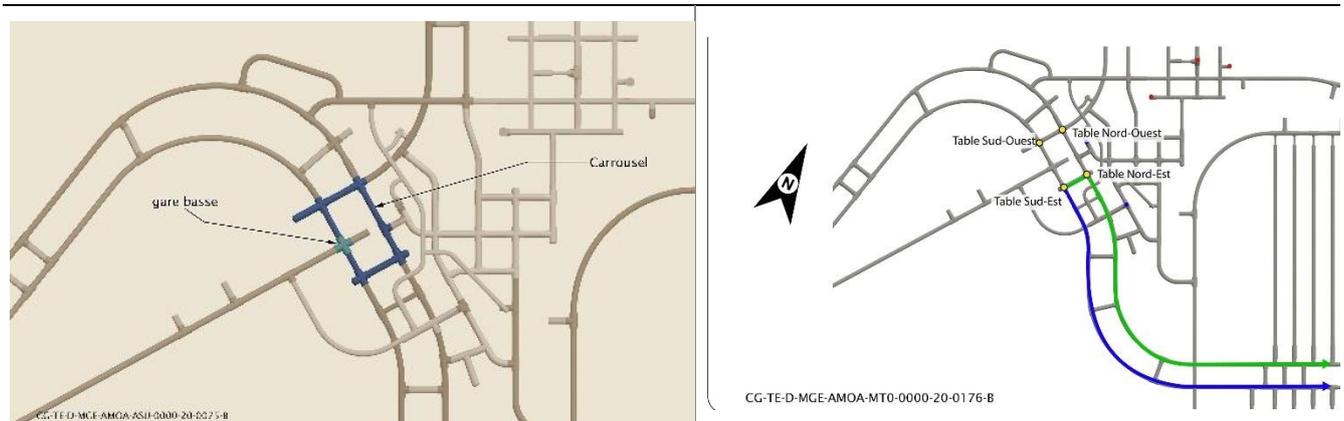


Figure 19. a) Illustration du carrousel de la ZSLE. b) Illustration du trajet des chariots chargés de hotte MA-VL (en vert trajet du chariot vers la galerie de liaison MA-VL nord et en bleu vers la galerie MA-VL sud) [35].

Le chariot de transfert achemine la hotte à l'intersection entre les GLI et les GA des quartiers MA-VL ou HA. Les chariots sont orientés soit vers :

- les deux GLI MA-VL parallèles sud ou nord pour desservir les GA du quartier de stockage MA-VL (cf. Figure 19.b) à partir des tables sud-est et nord-est ;
- la GLI HA, pour desservir les GA du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA, à partir de la table nord-ouest.

La table sud-ouest sert quant à elle au chargement de la hotte vide. Le cycle de descente et de montée du funiculaire dure environ 1h30, temps nécessaire pour assurer une rotation complète correspondant à la descente d'une hotte pleine, à son déchargement au fond et à la remontée en surface du funiculaire avec son chargement avant le cycle suivant.

Opérations de transfert des colis MA-VL vers l'alvéole de stockage

Pour les colis MA-VL, la hotte est déposée à l'intersection entre la GLI et la GA au niveau d'une table tournante de voie, permettant à la navette MA-VL de se positionner sous la hotte puis d'amener et de déposer la hotte sur la table d'accostage (cf. Figure 20), qui réalise le transfert de la hotte jusqu'à la façade d'accostage (cf. Figure 21 pour la configuration accostée). Les opérations de déchargement de la hotte peuvent être alors réalisées en cellule de manutention de l'alvéole.

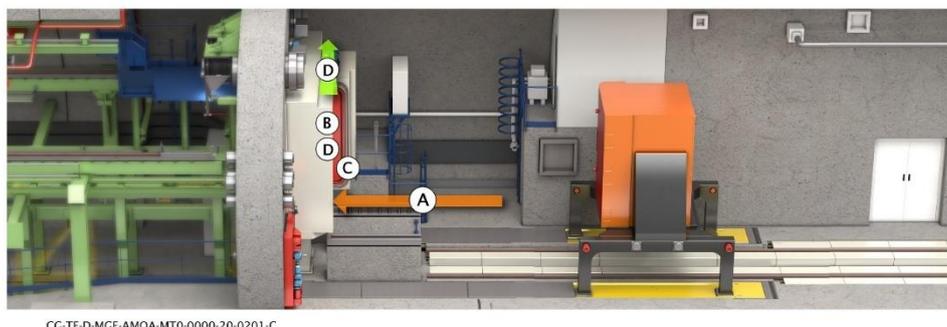


Figure 20. Hotte déposée sur la table d'accostage (en jaune sur le dessin) [35].

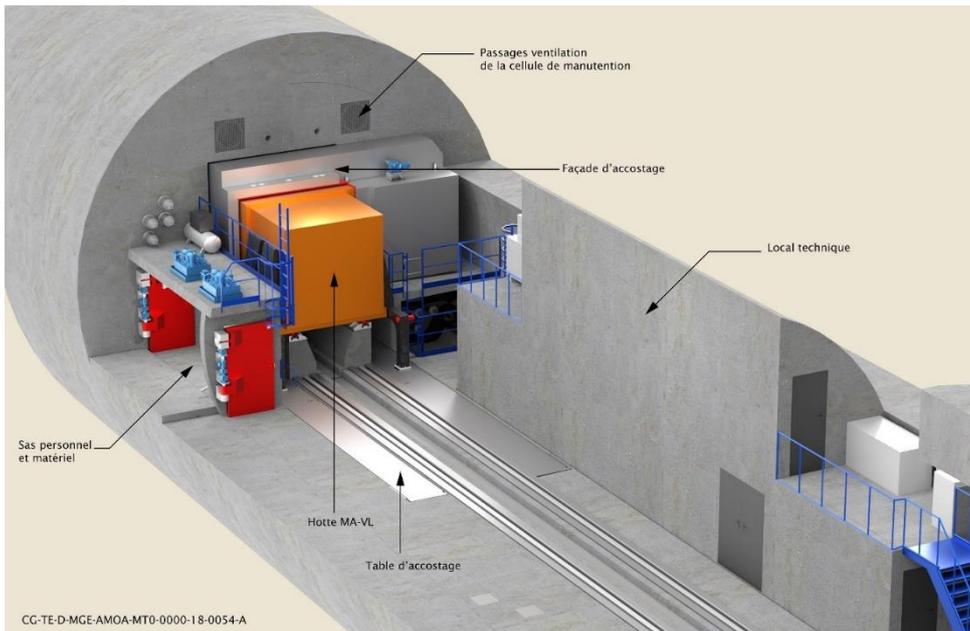


Figure 21. Hotte accostée à la façade d'accostage d'un alvéole MA-VL [35].

Le déchargement d'une hotte est réalisé avec la table de déchargement et le plateau de transfert de cette hotte, qui dépose le colis sur un élévateur, pour régler l'altitude du colis en fonction de sa destination dans l'alvéole. Le colis est ensuite déposé sur les fourches d'un pont stockeur (cf. Figure 22) par l'élévateur lors de son mouvement de descente. Le pont stockeur se déplace jusqu'à l'écran de radioprotection qui s'ouvre pour permettre le passage du pont stockeur chargé et se referme après son passage. Le pont stockeur positionne ensuite les colis de gauche à droite depuis le fond de la partie utile de l'alvéole jusqu'à son entrée en remplissant totalement le niveau correspondant (chargement par nappes, cf. Figure 22). Une fois la première nappe remplie, les blocs de radioprotection de cette nappe sont positionnés. Ces opérations sont répétées pour toutes les nappes de colis stockés.

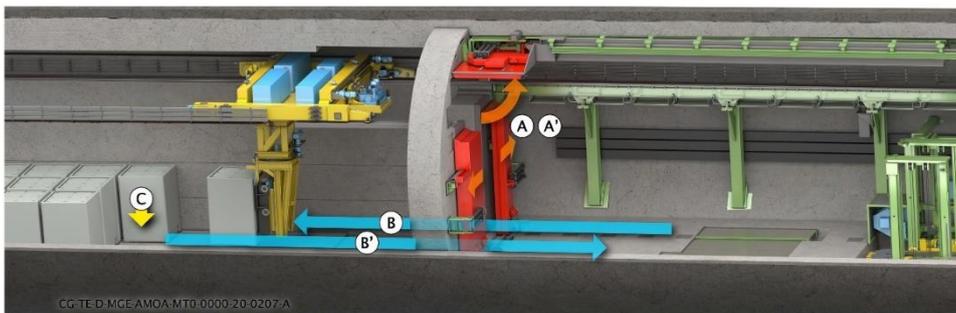


Figure 22. Illustration du chargement de la première nappe de colis de stockage MA-VL dans la partie utile de l'alvéole. En rouge, les portes de radioprotection ouvertes [35].

Opérations de transfert des colis HA vers l'alvéole de stockage

S'agissant d'un colis de stockage HA, la hotte est également déposée à l'intersection entre la GLI et la GA au niveau d'une table tournante de voie, où la hotte est récupérée par la navette HA. La navette transfère la hotte au niveau de l'alvéole de destination. Après que le robot bride et le robot pousseur aient respectivement retiré la bride en tête d'alvéole HA et placé le bouchon d'exploitation dans l'alvéole HA, l'alvéole peut recevoir un colis de stockage HA. Après retrait du bouchon d'exploitation par la hotte HA, cette dernière s'aligne sur le logement du colis (opération B de la Figure 23). La porte blindée est ouverte (opération B) puis le fourreau mobile avance dans la tête de l'alvéole de stockage (opération C). Le colis entraîné par le grappin est poussé à l'intérieur de la tête d'alvéole (opérations D et E) puis tous les équipements mobiles reviennent dans la hotte. La porte blindée

est ensuite refermée. Avant de pouvoir déplacer la hotte, celle-ci se désaligne afin qu'elle puisse obturer l'alvéole avec le bouchon d'exploitation.

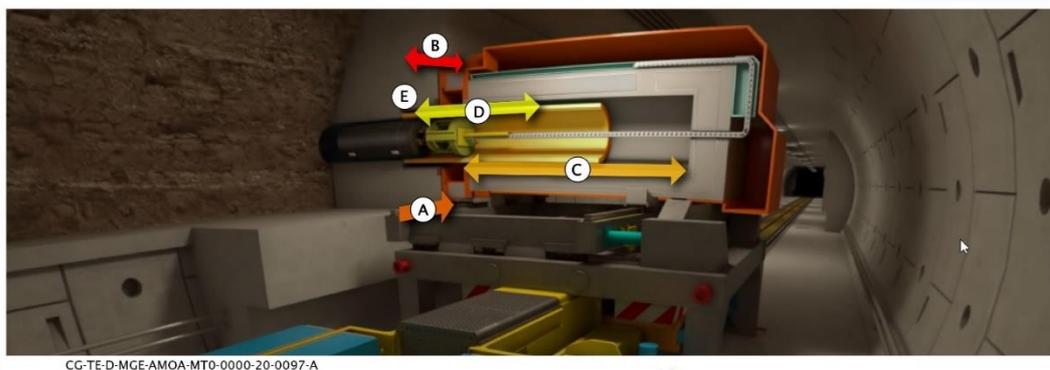


Figure 23. Opérations de transfert du colis de stockage HA en tête d'alvéole [35].

Après l'obturation de l'alvéole, la hotte se réaligne puis se désaccoste. La hotte est alors transférée par la navette vers la GLI, puis la même navette récupère le robot-pousseur positionné en fond de GA et le dépose sur les platines présentes au sol devant l'alvéole. L'alvéole étant alors refermée par le bouchon d'exploitation, le robot-pousseur va réaliser l'ouverture de l'alvéole, puis pousser le colis alors en tête d'alvéole jusqu'à son emplacement dans la partie utile de celle-ci. Le bouchon d'exploitation est ensuite remis en place par le robot, qui se désaccoste et est transféré par la navette vers la position de garage.

Tous les locaux du quartier pilote HA ont un classement de confinement de type C1. En dehors des phases de mise en place ou de retrait d'un colis de stockage, l'ensemble des galeries, des recoupes et des niches du quartier pilote HA sont en zone surveillée bleue. Lors d'une phase de mise en place ou de retrait d'un colis de stockage dans un alvéole, une zone de 2 m autour de la hotte est en zone contrôlée verte ; au-delà de ce périmètre, la galerie d'accès est en zone surveillée bleue. L'alvéole de stockage HA est en zone contrôlée rouge une fois chargée d'un colis de stockage.

2.6. Chronologie des phases de vie de Cigéo

L'Andra retient la chronologie prévisionnelle décrite ci-après, sous réserve de l'obtention de l'autorisation de création de Cigéo. Cette chronologie a fait l'objet de modifications en comparaison de celle présentée dans le DDAC, communiquées à l'IRSN lors de la réunion préparatoire au GP2 tenue le 7 octobre 2024.

Une phase dite de construction initiale débute après la publication du décret d'autorisation de création, envisagée vers 2028, avec la construction des ouvrages permettant la mise en service de l'installation nucléaire (bâtiments et ouvrages de surface liés à l'exploitation d'EP1, LSF, ouvrages souterrains permettant de stocker de premiers colis de déchets, cf. Figure 24). Le début des terrassements est dorénavant prévu vers 2029 (1^{ers} bétons EP1 vers le début des années 2040) et celui des creusements à l'horizon 2035 (1^{ers} alvéoles MA-VL à l'horizon début 2040, 1^{ers} alvéoles du quartier pilote HA à l'horizon 2045). Une fois les ouvrages construits et équipés, des essais « en inactif » sont prévus, c'est-à-dire sans colis de déchets radioactifs (fin des années 2040).

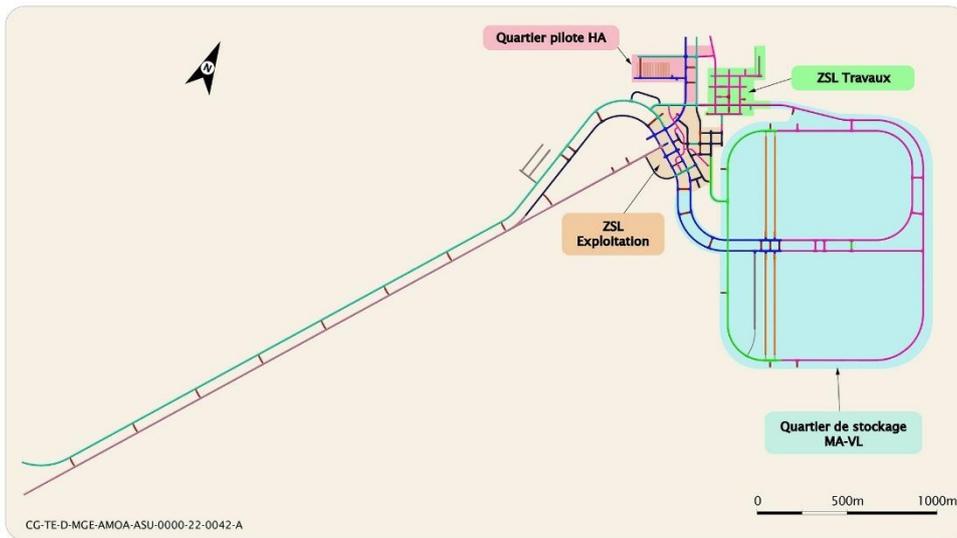


Figure 24. Illustration des ouvrages souterrains construits lors de la phase de construction initiale [42].

Après l’autorisation délivrée par l’ASN de mise en service limitée à la phase industrielle pilote (actuellement à l’horizon 2050), appelée « **mise en service lors de la phase pilote** » dans le présent rapport, démarre la phase de fonctionnement, qui correspond aux opérations de mise en stockage. Cette phase de fonctionnement commence par la réalisation d’essais de démarrage dits « en actif », c’est-à-dire avec des colis de déchets radioactifs. Cette mise en exploitation des premiers ouvrages est appelée « Tranche 1 » (**T1**) [36], par rapport aux « tranches ultérieures » (**TU**) de construction et de mise en exploitation. Les opérations de stockage envisagées sont les suivantes :

- stockage de colis de déchets MA-VL dans les alvéoles du quartier de stockage MA-VL construits en phase de construction initiale ;
- stockage de colis de déchets HA dans le quartier pilote HA.

La phase industrielle pilote couvre la phase de construction initiale et le début de la phase de fonctionnement. Au cours de l’instruction, l’Andra a précisé qu’elle envisage à ce stade une durée pour cette phase pilote de 25 à 30 ans. Après une loi adaptant les conditions d’exercice de la réversibilité du stockage, la phase industrielle pilote s’arrête lorsque l’ASN délivre, sur la base de cette loi, l’autorisation de « **mise en service complète** » de l’installation (Figure 25) (Article L. 542-10-1 du Code de l’environnement). D’autres rendez-vous de gouvernance, décisions et autorisations pourraient être définis ultérieurement.

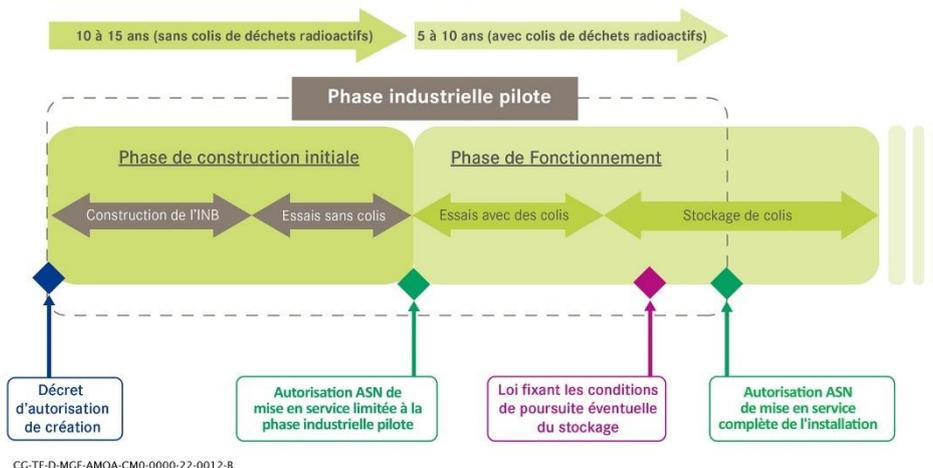


Figure 25. La phase industrielle pilote (à partir de [42], sans les durées car modifiées au cours de l’instruction).

La phase de fonctionnement se poursuit, jalonnée par des rendez-vous de gouvernance, décisions et autorisations, et se déroule sur une durée d'ordre séculaire. Durant cette phase et en parallèle des opérations de stockage, des ouvrages souterrains nécessaires au stockage sont creusés progressivement, par tranches successives, et des travaux de rénovation, de construction ou d'adaptation des bâtiments de surface sont menés. En particulier, la construction du bâtiment nucléaire EP2 en surface est programmée à l'horizon 2080, pour réceptionner, contrôler et préparer les colis de déchets stockés dans le quartier de stockage HA. La chronologie prévisionnelle des opérations de stockage envisagées après la phase industrielle pilote est la suivante :

- pendant environ 40 ans (jusqu'à l'horizon 2080), les colis de déchets MA-VL sont mis en place dans le quartier de stockage MA-VL, dans les alvéoles construits en phase de construction initiale qui continuent d'être remplis ainsi que dans de nouveaux alvéoles. Le quartier pilote HA est en attente de fermeture ;
- pendant environ 20 ans (jusqu'à l'horizon 2100) :
 - le stockage de colis de déchets MA-VL dans le quartier de stockage MA-VL se poursuit, le quartier pilote HA est fermé et le premier sous-quartier HA est construit ;
 - les colis de déchets HA et de déchets MA-VL vitrifiés sont mis en place dans les premiers alvéoles du quartier de stockage HA ; les autres sous-quartiers HA sont progressivement construits ;
- enfin, pendant une durée de l'ordre de 50 ans (jusqu'à l'horizon 2150), le quartier de stockage MA-VL est fermé et le stockage de colis de déchets HA et de déchets MA-VL vitrifiés se poursuit dans le quartier de stockage HA.

Dans la suite de ce rapport, la phase d'exploitation débute à la mise en service lors de la phase pilote et s'achève à la décision de déclassement. La phase de fonctionnement désigne quant à elle la période de l'exploitation pendant laquelle des colis de déchets sont reçus et stockés à Cigéo.

A l'horizon de 2150, après décret de démantèlement, la phase de démantèlement et de fermeture vise l'arrêt des opérations, la déconstruction des bâtiments nucléaires de surface et la mise en sécurité passive du stockage.

Après l'autorisation de passage en phase de surveillance, une phase de surveillance, puis une phase de « post-surveillance » démarrant à compter de la décision de déclassement de l'ASN constituent la période après fermeture.

2.7. Adaptabilité de Cigéo à l'inventaire de réserve

Conformément à l'article D. 542-91 du code de l'environnement, l'Andra présente dans le DDAC, en plus de l'inventaire de référence (cf. chapitre 2.4 *supra*), un inventaire de réserve sur la base duquel sont réalisées les études d'adaptabilité de Cigéo. L'inventaire de réserve (voir Annexe T4) intègre (i) des colis de stockage HA et MA-VL liés à l'augmentation de la durée de fonctionnement du parc actuel à 50 ans, (ii) des combustibles usés (**CU**), en cas d'arrêt du recyclage et (iii) des déchets de faible activité à vie longue (**FA-VL**) au titre des incertitudes liées à leur filière de gestion. De plus, à la demande de la 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**)). 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.

Les principes d'architecture de Cigéo retenus par l'Andra, les adaptations de conception prévues ou encore l'impact du stockage de l'inventaire de réserve sur la durée de fonctionnement font l'objet du chapitre 6.5.2 du présent rapport.

3. DEMARCHE DE SURETE

Ce chapitre présente l'examen par l'IRSN de la démarche de sûreté retenue par l'Andra au stade du DDAC de Cigéo pour la phase d'exploitation. Il porte d'abord sur la démarche générale (chapitre 3.1), les fonctions de sûreté (chapitre 3.2), les situations de fonctionnement (chapitre 3.3) et les EIP, AIP et exigences associées (chapitre 3.4). La stratégie de surveillance et les principes de gestion des situations accidentelles et post-accidentelles sont ensuite examinés (chapitres 3.5 et 3.6), ainsi que les objectifs de protection retenus par l'Andra (chapitre 3.7).

3.1. Démarche générale

L'Andra indique que l'objectif fondamental de sûreté, qui oriente la conception de l'installation de stockage, est la protection de la santé des personnes et de l'environnement envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques, conformément au guide de l'ASN relatif au stockage géologique [43]. Pour atteindre cet objectif, l'Andra adopte une démarche de sûreté en exploitation fondée sur l'identification de fonctions de sûreté (cf. chapitre 3.2) et la définition d'objectifs de protection pour le personnel et la population (cf. chapitre 3.7), dont les principes établis au stade du DOS sont reconduits dans le DDAC [44].

Dans une première étape, l'Andra analyse de manière déterministe chacun des risques internes d'origine nucléaire et des agressions internes ou externes mentionnées dans l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales applicables aux INB [45] (dit « arrêté INB » dans la suite du présent rapport), afin d'identifier les événements non souhaités¹⁸ (ENS) pouvant mener l'installation en dehors de son fonctionnement normal¹⁹ et remettre en cause une fonction de sûreté. Ces analyses de sûreté tiennent compte des spécificités de Cigéo pouvant affecter la démonstration de sûreté, telles que le caractère souterrain de l'installation, la coactivité entre zones nucléaires et zones de travaux, ou encore la durée de la phase d'exploitation. L'Andra définit alors les moyens techniques et organisationnels pour maîtriser ces risques et agressions, en appliquant le principe de défense en profondeur²⁰ (e.g., redondance, diversification, séparation physique, marges de dimensionnement...). Elle identifie, parmi ces moyens, ceux nécessaires à la réalisation des fonctions de sûreté, ou contrôlant la réalisation d'une fonction de sûreté, et les classe en tant qu'éléments et activités importants pour la protection des intérêts (EIP et AIP, cf. chapitre 3.4), en y associant des exigences de sûreté.

Dans un second temps, l'Andra identifie les ENS susceptibles de conduire à un risque radiologique, les classe par familles de situations dites « de fonctionnement » selon l'estimation de leur vraisemblance (cf. chapitre 3.3 ci-après), puis sélectionne parmi eux les scénarios²¹ qui mettent le plus à l'épreuve les dispositions retenues dans le cadre de la défense en profondeur, et enfin vérifie pour ces derniers que les dispositions retenues sont suffisantes au regard des objectifs de protection et qu'elles satisfont les exigences de sûreté. S'agissant des risques non radiologiques, l'Andra retient les situations accidentelles avec dispersion des toxiques chimiques contenus dans des colis de déchets, qu'elle examine au regard de valeurs de référence. Cet ensemble d'analyse des risques, de choix de conception et de vérifications est opéré de manière itérative pour démontrer la sûreté de l'installation.

La démarche de sûreté de l'Andra intègre en outre les relations entre sûreté en exploitation et sûreté après fermeture, par la vérification que les dispositions prises au stade de la conception et mises en œuvre pendant la phase d'exploitation permettent de s'assurer que les exigences de sûreté après fermeture restent satisfaites.

¹⁸ Par exemple, un départ de feu sur un pont de manutention d'emballage de transport.

¹⁹ Fonctionnement de l'installation qui comprend l'ensemble des états et des opérations courants de l'installation.

²⁰ Le principe de défense en profondeur se concrétise pour les installations nucléaires par la mise en place d'une série de niveaux de défense indépendants reposant sur les caractéristiques intrinsèques de l'installation, des dispositions matérielles, organisationnelles et humaines ainsi que des procédures destinées à prévenir les accidents puis, en cas d'échec de la prévention, à en limiter les conséquences.

²¹ L'Andra définit un scénario comme un événement ou une séquence d'événements (défaillance ou agression) qui, s'ils ne sont pas maîtrisés, s'enchaînent ou se combinent jusqu'à l'apparition de conséquences au niveau des cibles de sûreté. Un scénario est caractérisé par un événement initiateur, un événement non souhaité et une cible ; il est défini pour un risque donné et pour un élément de description donné (activité, fonction ou équipement).

L'IRSN considère, comme au stade du DOS, que la démarche générale de sûreté de l'Andra est cohérente avec l'arrêté INB [45], le guide de l'ASN relatif au stockage géologique précité [43] et les travaux d'instances internationales sur les standards applicables aux stockages géologiques, tels que les préconisations recensées dans le guide de sûreté SSG-14 de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) [46]. L'IRSN observe en outre que l'Andra ne se limite plus à l'étude des scénarios enveloppes en termes de conséquences radiologiques mais considère bien l'ensemble des scénarios identifiés pour vérifier le caractère suffisant des dispositions de sûreté. **Ceci est satisfaisant.**

La déclinaison de cette démarche est examinée dans les chapitres ci-dessous.

3.2. Fonctions de sûreté

L'Andra indique, comme au stade du DOS, que la protection des personnes et de l'environnement vis-à-vis des risques induits, pendant la phase d'exploitation, par la radioactivité des déchets est assurée par des fonctions de sûreté. Ces fonctions de sûreté doivent être maintenues dans toutes les situations incidentelles ou accidentelles, d'origine interne ou externe, ou *a minima* rétablies dans des délais définis par les analyses de sûreté compatibles avec les objectifs de protection.

Pour les risques radiologiques, les fonctions principales, identiques à celles retenues au stade du DOS, sont les suivantes :

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

Pour les risques non radiologiques, l'Andra retient deux fonctions de sûreté principales : confiner les substances dangereuses (substances chimiques toxiques notamment) et protéger les personnes et l'environnement à l'égard des phénomènes dangereux (déversement de carburant, explosion...).

L'Andra décline ces fonctions principales en « sous-fonctions de sûreté », nommées « fonctions de sûreté » au même titre que les fonctions principales dans la suite du présent rapport.

L'ensemble de ces éléments n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.



3.3. Situations de fonctionnement

3.3.1. Définition des familles de situations

Comme au stade du DOS, l'Andra définit des familles de situations dites « de fonctionnement » pour les ENS identifiés à l'issue de l'analyse de sûreté (cf. *supra*) : (i) les situations normales et dégradées du domaine de dimensionnement, (ii) les situations incidentelles et accidentelles du domaine de dimensionnement, (iii) les situations accidentelles du domaine d'extension du dimensionnement (appelées situations de dimensionnement du PUI au stade du DOS) et (iv) les situations exclues.

Les situations retenues dans le domaine de dimensionnement regroupent :

- les situations normales, qui décrivent respectivement les états de l'installation en situation courante et en situation de maintenance ou d'arrêt programmé ;
- les situations dégradées, qui décrivent les états de l'installation en dehors du fonctionnement normal dont l'acceptabilité est démontrée pour une durée limitée ;
- les situations incidentelles et accidentelles du domaine de dimensionnement, susceptibles de conduire à une dégradation de la protection des intérêts. Pour ces situations de sortie du domaine de

fonctionnement normal et dégradé, la conception de l'installation doit prévenir leur occurrence, permettre un retour au fonctionnement normal et minimiser leur impact.

L'Andra indique que des études de dimensionnement sont réalisées sur la base de ces situations pour définir les performances requises des systèmes, structures et composants, leurs caractéristiques et les contraintes liées aux actions prévues pour les exploiter.

L'IRSN considère que le cadre ainsi défini pour les situations du domaine de dimensionnement répond aux exigences de l'arrêté INB.

Les situations accidentelles du domaine d'extension du dimensionnement retenues par l'Andra regroupent les situations « *peu vraisemblables* » telles que les situations issues de l'évaluation complémentaire de sûreté (ECS)²² et les situations de cumuls d'événements indépendants. Ces situations sont susceptibles de conduire à des conséquences radiologiques plus importantes que les situations accidentelles de dimensionnement. Selon l'Andra [47], l'analyse de ces situations a pour objectifs de « *vérifier la robustesse de l'installation et de déterminer celles pour lesquelles des dispositions de prévention ou d'atténuation raisonnablement applicables peuvent être identifiées* ». A cet égard, l'IRSN souligne que cet objectif de vérification de la robustesse de l'installation sur la base de situations peu vraisemblables répond bien aux besoins de la démonstration de sûreté et considère que, au terme de la démarche de sûreté, les dispositions de prévention et d'atténuation raisonnablement applicables doivent avoir été intégrées à la conception, y compris pour les scénarios d'extension du dimensionnement (cf. chapitre 3.3.2 ci-après).

S'agissant de l'évaluation complémentaire de sûreté, l'Andra indique [48] qu'elle consiste à retenir l'occurrence de situations redoutées liées à des aléas naturels externes de niveaux très peu probables mais pouvant conduire à des rejets massifs, afin d'identifier des dispositions d'ordre technique et/ou organisationnelles permettant de prévenir leur apparition ou d'en limiter les conséquences, et d'assurer la gestion d'une crise éventuelle (constitution d'un « noyau dur » de composants et d'équipements de l'installation). **Ceci n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

S'agissant des situations de cumuls d'événements indépendants, l'IRSN constate que la démarche présentée par l'Andra dans le DDAC pour leur identification est similaire à celle retenue au stade du DOS. Sa mise en œuvre conduit l'Andra à identifier, sur la base des agressions internes et externes préconisées par l'arrêté INB [45], des cumuls qu'elle considère « *plausibles* » entre un scénario issu du domaine des situations incidentelles ou accidentelles de dimensionnement et une agression interne ou externe susceptibles d'aggraver les conséquences sur la sûreté de l'installation²³ (impact sur les lignes de défense assurant des fonctions de sûreté). L'Andra identifie aussi des cumuls plausibles entre un scénario issu du domaine des situations incidentelles ou accidentelles de dimensionnement et la défaillance la plus défavorable parmi les dispositions de limitation des conséquences d'un accident²⁴ (appelée « *aggravant* » par l'Andra). L'IRSN rappelle qu'il estimait au stade du DOS d'une part qu'un cumul identifié comme plausible devait être systématiquement pris en compte dans le domaine de dimensionnement de l'installation et d'autre part que la prise en compte d'un aggravant relève d'une règle de base pour l'étude des scénarios de ce domaine et non d'un cumul. **Aussi, l'IRSN considère, comme au stade du DOS, que les cumuls plausibles d'événements devraient être intégrés dans le domaine de dimensionnement.** L'IRSN regrette que l'engagement pris en ce sens par l'Andra à l'issue de l'expertise du DOS ne soit à ce stade pas concrétisé. Ce point est repris notamment au chapitre 4.3.1 du présent rapport relatif à l'évaluation des risques liés à l'incendie en phase d'exploitation.

²² Une évaluation complémentaire de sûreté a été prescrite par l'ASN à tous les exploitants nucléaires après l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi ; elle concerne l'évaluation du comportement des installations face à des aléas naturels extrêmes.

²³ Exemple de cumul avec une agression interne : cumul du déconfinement de colis primaires résultant d'une défaillance d'un pont et d'un incendie en cellule de déchargement des emballages de transport. Exemple de cumul avec une agression externe : cumul d'un séisme de dimensionnement avec une collision impliquant le véhicule de transport de fûts de déchets d'exploitation en galerie de l'installation souterraine ou en descenterie service avec incendie du véhicule.

²⁴ Par exemple, cumul de l'incendie d'un chariot de transfert des colis en zone tampon du bâtiment nucléaire de surface EP1 et de défaillance de la sectorisation incendie.

Enfin, l'Andra définit les situations exclues comme des situations physiquement impossibles ou « *extrêmement improbables avec un haut degré de confiance* », comme au stade du DOS. Dans ce dernier cas, l'Andra considère qu'il s'agit de situations accidentelles associées à la défaillance d'un nombre important de dispositions de prévention robustes. **Cette définition des situations exclues n'appelle pas de remarque.**

3.3.2. Classement des scénarios

Afin de classer les scénarios identifiés dans les familles de situations de fonctionnement précitées (deuxième étape de la démarche de sûreté, qui consiste à vérifier que les dispositions retenues sont suffisantes au regard des objectifs de protection, cf. chapitre 3.1 ci-avant), l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'elle évaluait, comme au stade du DOS, la vraisemblance d'un scénario en fonction du nombre et de la robustesse (F : forte ou M : modérée) des dispositions associées aux lignes de défense qui doivent être perdues pour qu'il se produise. Elle a toutefois précisé qu'elle ne retenait plus systématiquement cette catégorisation des dispositions, mais conservait une approche fondée sur la vraisemblance des scénarios, sans expliciter sur quelle base elle appréciait celle-ci pour le classement des situations dans le domaine « accidentel de dimensionnement » ou « extension du dimensionnement ».

L'IRSN convient que des scénarios postulés bien que peu vraisemblables, qui mobilisent un terme source conséquent et pour lesquels des dispositions complémentaires ne peuvent raisonnablement pas être mises en place, puissent conduire à des impacts au-delà des objectifs de protection retenus pour les situations de dimensionnement. **Toutefois, il est essentiel que le caractère peu vraisemblable de ces scénarios et l'absence de disposition complémentaire raisonnablement applicable pour chacun d'eux soient dûment objectivés.** La vraisemblance du scénario doit être justifiée au regard de celle des événements qui le définissent, qu'il s'agisse du niveau d'agression interne ou externe, ou si la défaillance de ligne(s) de défense est postulée, du niveau de robustesse des lignes de défense mises en cause fondé sur les exigences qui leurs sont associées (cf. *infra*) et non *stricto sensu* sur leur nombre et leur nature. A cet égard, l'IRSN relève, par exemple, que l'Andra classe un scénario d'exposition d'un travailleur qui passerait devant un alvéole HA dépourvu du bouchon de radioprotection, suite à une défaillance du procédé, dans les situations accidentelles du domaine d'extension du dimensionnement, sans que le caractère peu vraisemblable du passage du travailleur et de la défaillance du procédé ne soit à ce stade établi. La démarche d'identification de possibles dispositions raisonnablement applicables n'est pas non plus explicitée. Néanmoins, l'IRSN note que, à ce stade de développement du projet, l'Andra prévoit d'identifier des dispositions de prévention ou d'atténuation « *raisonnablement applicables* » pour les situations accidentelles du domaine d'extension du dimensionnement. Des scénarios actuellement classés en extension du dimensionnement, comme le scénario précité, pourraient donc à l'avenir relever du domaine de dimensionnement. Aussi, l'IRSN considère que la classification des scénarios n'est à stade pas aboutie et **qu'il appartient à l'Andra, pour la prochaine révision du rapport de sûreté, de poursuivre sa démarche afin de consolider la classification des scénarios dans les familles de fonctionnement de dimensionnement et d'extension du dimensionnement.**

Par ailleurs, l'IRSN relève que l'exclusion de scénarios par l'Andra n'est pas justifiée par des éléments objectifs. A titre d'exemple, l'IRSN constate que l'Andra exclut un incendie dans la descenderie colis dont la durée et/ou l'ampleur mettraient en jeu les performances de confinement de la hotte MA-VL, sans toutefois justifier le caractère suffisant des dispositions qu'elle retient pour l'exclure (« dimensionnement de la hotte coupe-feu deux heures EI120 », « limitation de la charge calorifique dans la descenderie colis »...). L'IRSN souligne à cet égard que les incendies survenant dans des galeries de forte pente, telles que la descenderie colis, peuvent présenter un développement particulier, notamment en termes de propagation, en lien avec le comportement des fumées (cf. chapitre 4.3.1 du présent rapport). Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra consolider la justification des dispositions retenues au regard des caractéristiques particulières d'un incendie dans la descenderie colis. Par ailleurs, l'IRSN constate que l'Andra exclut une situation d'« accumulation excessive d'oxygène en alvéole HA à la suite de la défaillance du dispositif de balayage à l'azote » sur la base de l'existence d'un « dispositif de balayage supplémentaire à l'azote » (bouteilles de gaz à raccorder manuellement à la bride de l'alvéole). Or, aucune exigence n'est associée à ce dispositif à ce stade [49]. **A cet égard, l'IRSN souligne [50] que l'exclusion de scénarios, outre ceux physiquement impossibles, doit être fondée sur des exigences de conception**

(redondance, diversification, séparation géographique, secours électrique, qualification, fiabilité...), de réalisation (contrôle de la qualité) et d'exploitation (suivi en exploitation, conduite à tenir en cas d'indisponibilité...) qui rendent ce scénario extrêmement improbable avec un haut degré de confiance. Aussi, malgré les efforts consentis par l'Andra pour dimensionner les systèmes, structures et composants à l'égard des diverses agressions, l'IRSN estime que l'application de la démarche d'exclusion des situations reste à consolider.

Ainsi, l'IRSN considère que l'Andra devra approfondir, dans la prochaine révision du rapport de sûreté de Cigéo, sa démarche d'exclusion de scénarios en fondant leur exclusion sur des exigences de conception, de réalisation et d'exploitation. Ce point fait l'objet de l'engagement 2024-E17 de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

En tout état de cause, afin d'assurer la complétude de la démarche de sûreté, l'IRSN considère que les grands types de sollicitations identifiées doivent être représentées dans les familles de situations retenues. L'IRSN constate que certains événements ne figurent pas dans ces familles, bien qu'ils fassent l'objet d'études par l'Andra, en particulier ceux relatifs à l'explosion en alvéole de stockage. Ce point est repris dans le chapitre 4.3.2 relatif à la maîtrise du risque d'explosion.

3.4. EIP, AIP et ED associées

3.4.1. Identification des EIP

L'Andra identifie comme EIP (cf. Annexe T5) les systèmes, structures et composants (i) qui participent directement à l'accomplissement d'une ou plusieurs fonctions de sûreté ou au maintien d'une fonction de sûreté, (ii) dont la défaillance est susceptible d'agresser un des EIP, (iii) qui assurent la détection des situations incidentelles et accidentelles et ceux (iv) qui permettent la mise en état sûr de l'installation, le maintien dans cet état ou la limitation des conséquences. La démarche d'identification des EIP n'a pas évolué depuis le DOS. Ces éléments sont identifiés par l'Andra sur la base de l'analyse de sûreté de l'installation et des études de dangers des installations présentes au sein du site pour les EIP liés aux risques non radiologiques. L'Andra précise que les dispositions matérielles du noyau dur (cf. chapitre 3.3.1) identifiées à l'issue des ECS [48] et celles valorisées pour justifier l'exclusion de scénarios sont également considérées comme des EIP. **Ces éléments n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

3.4.2. Qualification des EIP

L'Andra indique [51] que les exigences définies visent à garantir l'aptitude des EIP à accomplir leurs fonctions pour toutes les conditions d'ambiance et les situations de fonctionnement rencontrées, ainsi que leur fiabilité et leur robustesse vis-à-vis des sollicitations potentiellement subies par l'EIP (par exemple, vibrations sismiques, effets d'un incendie, etc.). Les exigences définies ainsi retenues [49] relèvent par exemple d'exigences relatives au dimensionnement retenu à la conception, à l'architecture des réseaux de l'installation, aux matériels ou encore au fonctionnement, à la surveillance ou encore à la maintenabilité. L'IRSN constate que les exigences définies associées aux EIP ont été précisées par rapport aux éléments présentés au stade du DOS, **ce qui est satisfaisant sur le principe.** L'IRSN note cependant que les critères permettant de justifier l'atteinte de certaines exigences ne sont pas identifiés par l'Andra à ce stade, telle que par exemple l'exigence de « stabilité du massif d'accostage et du massif d'amorce sous séisme SDD » ou encore celle de « sécuriser les systèmes de freinage pour le funiculaire ».

Afin de vérifier la capacité des EIP à assurer les fonctions qui leur sont assignées dans la démonstration de sûreté, l'Andra prévoit de qualifier les EIP dans toutes les situations potentiellement rencontrées (fonctionnement normal et dégradé, situations incidentelles et accidentelles). L'Andra précise que, pour les situations incidentelles et accidentelles, elle retient des « cas de charge » (agressions d'origine interne et externe) majorés vis-à-vis du fonctionnement normal, qui inclut notamment le vieillissement sur toute la durée d'exploitation de Cigéo. L'Andra indique que les méthodes permettant de justifier la qualification des EIP à leurs exigences définies (ED)

reposent sur des essais et/ou des simulations numériques, mises en œuvre progressivement afin que chacun des EIP soit qualifié en vue de sa mise en fonctionnement. A cet égard, elle précise que les essais sont à un stade avancé pour certains éléments, tels que les conteneurs de stockage MA-VL, alors que des étapes de qualification sont encore nécessaires pour les hottes MA-VL. L'IRSN attire l'attention sur le fait que les travaux de qualification des EIP nécessaires au fonctionnement de Cigéo seront réalisés principalement au cours de la phase pilote « inactive » (cf. chapitre 6.2 relatif à la phase pilote), qui fait directement suite à l'obtention du DAC. Aussi, **l'IRSN estime que l'Andra devra présenter, en cohérence avec la temporalité de réalisation des ouvrages concernés, les critères et méthodes permettant de justifier la qualification des EIP au regard du respect de leurs ED.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E22](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport.

S'agissant des EIP inaccessibles (tels que les colis de stockage en alvéole HA et MA-VL et le génie civil de ces alvéoles), qui ne peuvent par conséquent pas faire l'objet de dispositions de maintenance et de contrôle, l'IRSN constate que le maintien de leurs ED ne peut ainsi reposer que sur une conception robuste sur une durée séculaire, notamment au travers de la performance des matériaux retenus. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que l'élaboration de sa stratégie de qualification de ces EIP était toujours en cours et que, en ce qui concerne les EIP des alvéoles de stockage, la surveillance en alvéoles témoin ou le suivi des conditions environnementales permettra de garantir la maîtrise des processus d'évolution et de vieillissement des composants définis au moment de leur qualification. L'IRSN constate ainsi que dans le DDAC, l'Andra ne présente pas les dispositions retenues à la conception et souligne, comme indiqué au chapitre 3.5 du présent rapport relatif à la stratégie de surveillance, que la faisabilité d'une surveillance déportée n'est pas acquise. Aussi, **l'IRSN estime que l'Andra devra présenter, avant le début du creusement, sa stratégie de qualification des EIP inaccessibles.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E21](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport.

3.4.3. Identification des AIP

L'Andra indique que les AIP sont identifiées parmi l'ensemble des activités nécessaires à la démonstration de la protection des intérêts en fonctionnement normal et dégradé, pour prévenir les situations d'incident ou d'accident, les détecter, maîtriser les accidents n'ayant pu être évités et limiter leurs conséquences. Les activités pouvant avoir un impact sur les intérêts protégés à long terme (par exemple les activités en lien avec le creusement des ouvrages souterrains) sont également identifiées AIP. L'Andra précise que le retour d'expérience de ses centres de stockage et des pratiques des autres exploitants est intégré dans la démarche d'identification des AIP.

L'Andra retient les mêmes types d'AIP qu'au stade du DOS, à savoir :

- les AIP liées aux EIP, qui rassemblent les dispositions d'étude, de conception, de construction, d'essais, de suivi en service, d'exploitation, de contrôle et d'essai périodiques et de maintenance ;
- les AIP non liées à des EIP, participant à la démonstration de la protection des intérêts, telles que les activités de surveillance de l'environnement, de traitement des écarts et de gestion de modifications de l'installation ;
- les AIP permettant de préserver les exigences définies des composants importants pour la protection **(CIP)** identifiés dans la démonstration de sûreté après fermeture.

Au stade du DDAC, l'Andra a identifié trois AIP correspondant à la phase actuelle de conception de Cigéo :

- développer la conception avec une attention particulière sur les EIP ;
- gérer les écarts techniques, organisationnels ou réglementaires ;
- gérer les évolutions en cas de modification, dérogation, ou modification de la configuration.

Au cours de l'instruction, l'Andra a confirmé que, comme elle l'indiquait au stade du DOS, ces AIP seront complétées dans les phases ultérieures du projet avec notamment des AIP en lien avec (i) les aspects de fabrication et de construction des EIP, (ii) le conditionnement de déchets radioactif, (iii) la surveillance de ces

activités de conditionnement et (iv) le contrôle et la surveillance des paramètres clés. **Ces éléments n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

L'IRSN considère, comme au stade du DOS, que le suivi de l'inventaire des colis et la traçabilité du plan de leur stockage devraient figurer parmi les AIP. En outre, l'IRSN relève que l'Andra ne présente pas d'exigences associées aux AIP « conception » (cf. chapitre 6.1.3). De manière générale, l'IRSN estime qu'il conviendrait d'en décliner en fonction des AIP qui seront retenues pour les différentes phases de vie de l'installation, depuis la conception jusqu'à sa fermeture. **Aussi, l'IRSN encourage l'Andra à poursuivre sa démarche d'identification des AIP nécessaires à la sûreté nucléaire, notamment celles relatives à la construction d'une part et à l'exploitation en vue de la mise en service de l'installation d'autre part.**

3.5. Stratégie de surveillance

Le présent chapitre porte sur les objectifs et principes directeurs de la stratégie de surveillance de l'Andra (chapitre 3.5.1), l'identification des paramètres clés (chapitre 3.5.2), puis le rôle des alvéoles témoin dans cette surveillance (chapitre 3.5.3). Les dispositions de surveillance sont examinées au regard de la maîtrise des risques (chapitre 4).

3.5.1. Objectifs et principes directeurs de la surveillance

La stratégie de surveillance présentée par l'Andra au stade du DDAC a pour objectifs de s'assurer que l'installation reste dans le domaine de fonctionnement normal (cf. chapitre 3.3) pendant son exploitation et de vérifier que les perturbations liées à la construction et à l'exploitation n'impactent pas les fonctions de sûreté après fermeture. Elle vise également, au travers du retour d'expérience, à apporter des éléments en support aux décisions futures (optimisation, évolutions de conception...) et à permettre de réduire les incertitudes relatives à l'évaluation de sûreté après fermeture.

L'atteinte de ces objectifs est sous tendue par des principes directeurs, tels que la redondance et la complémentarité de différentes méthodologies de mesure pour l'acquisition des données, le suivi des colis de stockage de manière indirecte au travers de la surveillance de leurs conditions d'environnement, ainsi que la surveillance déportée *via* des ouvrages témoin (cf. *infra*) en cas d'impossibilité d'une surveillance directe d'un processus. Par ailleurs, l'Andra indique que la surveillance de Cigéo débute dès la phase de construction et se poursuit tout au long du déploiement de l'installation jusqu'à sa fermeture définitive. L'Andra prévoit ainsi que le programme de surveillance puisse être éventuellement adapté en termes de mise en œuvre, de paramètres à surveiller et de dispositifs de surveillance associés, en particulier sur la base du retour d'expérience du programme de démonstrateurs dont elle décrit les grands objectifs relatifs à la surveillance, puis des premiers alvéoles MA-VL et HA mis en œuvre dans le cadre de la phase pilote.

L'IRSN note qu'aux objectifs définis pour la stratégie de surveillance, globalement identiques à ceux présentés au stade du DOS, l'Andra associe à présent des principes directeurs, en particulier la surveillance indirecte ou déportée. En outre, l'IRSN considère que le démarrage de la surveillance dès la phase de construction permettra de consolider la connaissance des paramètres à surveiller à l'état « tel que construit » et de disposer des connaissances nécessaires pour les échéances-clé décisionnelles. L'IRSN estime que **ces éléments de stratégie sont globalement satisfaisants dans leur principe.**

3.5.2. Identification des paramètres-clés et des dispositions

Au stade du DOS, l'IRSN avait relevé que la stratégie de surveillance de l'Andra présentait des lacunes concernant l'identification des paramètres à surveiller. Dans le DDAC, l'Andra procède à cette identification de paramètres-clés, en s'appuyant sur l'identification des EIP (pour la phase d'exploitation) et des CIP (pour la phase après fermeture).

3.5.2.1. Surveillance pour la phase d'exploitation

Pour la phase d'exploitation, l'Andra retient des paramètres-clés à surveiller tels que, par exemple :

- la contamination surfacique labile des conteneurs de stockage à différentes étapes du procédé, en lien avec la fonction « maîtrise de la dissémination » ;
- le débit de ventilation en alvéole MA-VL en lien avec la fonction « maîtrise de la température » ;
- le taux d'hydrogène en sortie d'alvéole dans la gaine d'extraction en lien avec la fonction « maîtrise des risques liés aux gaz inflammables (formés par radiolyse) » ;
- la concentration en oxygène en alvéole HA en lien avec la fonction « maîtrise des risques liés aux gaz inflammables (formés par corrosion) ».

L'IRSN rappelle qu'au stade du DOS, il estimait que la détermination des paramètres à surveiller et du seuil au-delà duquel leur dérive induit une action spécifique participe à la définition du domaine de fonctionnement normal de l'installation. A cet égard, l'Andra prévoit [51] d'associer aux paramètres identifiés des valeurs seuils ou des plages de fonctionnement. L'IRSN estime, sur le principe, que ceci devrait permettre de délimiter le domaine de fonctionnement normal de l'installation dans la perspective de l'établissement des règles générales d'exploitation (**RGE**) de l'installation.

Au stade du DDAC, l'Andra décrit certaines dispositions de surveillance qu'elle prévoit de mettre en œuvre en lien avec les besoins de surveillance identifiés (par exemple, en alvéole MA-VL, surveillance de la contamination atmosphérique par des balises fixes, de la température par des sondes présentes au sein des gaines de ventilation d'extraction ou en paroi du génie civil, et de l'hygrométrie par des capteurs capacitifs situés en sas d'entrée et en gaine de sortie). Dans d'autres cas, l'Andra présente des éléments de surveillance assez généraux, telles que des méthodologies (par exemple, « *observation visuelle via un dispositif mobile* » pour la surveillance des fissures des colis en alvéole MA-VL). Ainsi, l'IRSN note que la stratégie de surveillance de l'Andra pour la sûreté en phase d'exploitation reste en cours de déclinaison en dispositions concrètes au stade du DDAC. Ces dispositions de surveillance lorsqu'elles sont déjà définies, et les éléments de surveillance retenus dans le cas contraire, sont examinés par l'IRSN notamment dans le chapitre 4 du présent rapport relatif à l'évaluation de sûreté. L'Andra précise à cet égard que le programme détaillé de la surveillance opérationnelle (dispositifs de surveillance, localisation, fréquence d'acquisition des mesures, gestion des données collectées) pendant le fonctionnement de Cigéo sera fourni avec les RGE en support à la demande de sa mise en service. A cet égard, l'IRSN estime que la définition précise des moyens de surveillance est dépendante de choix de conception et inversement, et convient que ces choix peuvent encore être modifiés avant la construction de certains ouvrages, par exemple au regard des résultats de démonstrateurs. En revanche, des retours sur conception de certains ouvrages afin de modifier des modalités de surveillance seront vraisemblablement impossibles après leur construction (génie civil des alvéoles et de certains puits par exemple). **Aussi, l'IRSN considère qu'il appartiendra à l'Andra de présenter une déclinaison précise des dispositions de surveillance prévues pour les premiers ouvrages avant leur construction.**

Enfin, l'IRSN s'interroge sur la faisabilité technique, comme indiqué dans son examen relatif à l'analyse des risques (cf. chapitre 4) notamment du suivi de l'état des colis MA-VL en alvéole basé sur des dispositifs mobiles (cf. chapitre 4.2.2), du suivi des jeux fonctionnels en alvéole MA-VL et HA (cf. chapitre 6.4), de la surveillance des équipements mécaniques (cf. chapitre 4.3.3) et de la surveillance de l'atmosphère interne des alvéoles HA (cf. chapitre 4.3.2).

3.5.2.2. Surveillance pour la sûreté à long terme

S'agissant de la surveillance pour la sûreté après fermeture, les CIP retenus par l'Andra au stade du DDAC sont la couche du Callovo-Oxfordien, les scellements des LSF, les scellements horizontaux en galeries, les conteneurs de stockage HA et la matrice vitreuse. Les paramètres-clés à surveiller sont sélectionnés sur la base des processus thermique, hydraulique, mécanique, chimique, radiologique et biologique qui régissent l'évolution de ces composants.

Pour ce qui concerne les paramètres-clés à surveiller, l'IRSN constate que leur identification reste à compléter et n'inclut pas à ce stade les composants qui seront mis en place tardivement tels que les ouvrages de scellements. A cet égard, l'IRSN convient que ces scellements ne seront pas mis en place avant plusieurs décennies et rappelle que l'Andra prévoit des démonstrateurs complets de ces ouvrages incluant des dispositifs d'auscultation, en vue du bilan de la phase pilote (cf. engagement 2024-E15 de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024), qui constitueront un retour d'expérience utile. En revanche, l'IRSN estime que les paramètres à surveiller concernant la couche du Callovo-Oxfordien, ainsi que les dispositions de surveillance associées, devraient être précisément définis en amont de la construction du stockage, afin notamment d'accéder à l'état initial puis à l'évolution locale de cette couche. Or, l'IRSN note par exemple que les paramètres-clés à suivre pour contrôler l'endommagement de la roche au niveau des emplacements prévus pour la mise en place des futurs scellements (galeries, LSF) ne sont pas encore définis au stade du DDAC. A cet égard, l'IRSN rappelle sa conclusion exprimée dans le cadre du GP1 [2], selon laquelle il serait opportun que l'Andra complète la reconnaissance qu'elle prévoit lors du creusement des ouvrages, par exemple par un forage en avant-trou des puits qui soit carotté *a minima* à l'emplacement des futurs scellements de LSF, à l'interface calcaires-argile de l'Oxfordien inférieur. Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devrait, avant le début des travaux de creusement, montrer que la mise en œuvre de sa stratégie de reconnaissance et de suivi de l'évolution du Callovo-Oxfordien est basée sur des méthodes permettant effectivement de collecter les données nécessaires, en particulier en lien avec les techniques de creusement envisagées pour Cigéo.

De manière générale, l'IRSN rappelle [26] que la conception de l'installation doit être compatible avec les moyens à mettre en œuvre pour exercer la surveillance. Dès lors, l'IRSN estime que les paramètres-clés associés aux CIP et les dispositions de surveillance *in fine* retenues devraient être définis au stade de la conception de ces CIP (hors Callovo-Oxfordien). Ainsi, **l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, avant le début des travaux de creusement :**

- **l'ensemble des paramètres clés associés à chaque CIP qu'elle prévoit de surveiller durant la phase d'exploitation, ainsi que les dispositions de surveillance associées ;**
- **les dispositions lui permettant de caractériser l'état initial avant et après creusement du CIP « Callovo-Oxfordien » et de suivre son évolution.**

Ces éléments font l'objet des **engagements 2024-E18** et **2024-E19** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que ces engagements sont globalement acceptables. L'IRSN attire toutefois l'attention sur la nécessité que les études de conception des CIP (hors Callovo-Oxfordien) intègrent celles des dispositions de surveillance.

3.5.3. Rôle des alvéoles témoin MA-VL et HA pour la surveillance

L'Andra prévoit [36] de réaliser, lors de la phase pilote, des alvéoles témoin MA-VL et HA (cf. chapitre 2.2). Aucun de ces ouvrages n'est destiné à recevoir des déchets radioactifs. L'Andra leur attribue un rôle particulier vis-à-vis de la surveillance de Cigéo en phase d'exploitation, qui est examiné ci-après.

Les alvéoles témoin sont de conception et ont des modalités de construction similaires aux alvéoles courants, et ont vocation à être représentatifs de leur comportement. Ils sont équipés de dispositifs de surveillance dont la mise en œuvre dans l'ensemble des ouvrages de même type ne paraît pas, selon l'Andra, pertinente au regard des contraintes d'exploitation en présence de rayonnement [52]. L'Andra prévoit de construire trois alvéoles témoins HA et un alvéole témoin MA-VL. L'Andra précise que cet alvéole témoin MA-VL pourrait résulter d'une évolution du statut du démonstrateur MA-VL (cf. chapitre 2), sans préciser ce qui sous-tend cette évolution.

Pour ce qui concerne l'alvéole témoin MA-VL, l'Andra indique [53] qu'il sera utilisé pour suivre l'évolution géomécanique (endommagement, propriétés hydromécaniques, comportement différé...) du Callovo-Oxfordien et des éléments de structure en béton ainsi que le vieillissement de ces éléments de structure et de colis factices de stockage (suivi de la carbonatation des bétons et de la corrosion des colis de stockage en acier en particulier). L'IRSN constate que l'Andra ne précise pas les paramètres-clés du domaine de fonctionnement normal dont elle souhaite déporter la surveillance en alvéole témoin MA-VL, ni les dispositions associées qu'elle prévoit dans cet

alvéole. Au regard de l'homogénéité des propriétés géologiques du Callovo-Oxfordien et des dispositions de construction similaires, et sous réserve de contrôles de l'état initial avant et après creusement de l'alvéole témoin et des alvéoles courants MA-VL, l'IRSN convient que l'évolution géomécanique de l'alvéole témoin devrait sur le principe être représentative de celle des alvéoles courants. En revanche, l'IRSN estime, au regard des caractéristiques variées des colis de déchets MA-VL (dimensions, température, dégagement de gaz...), que les conditions de température et d'hygrométrie des alvéoles courants, susceptibles d'influencer le vieillissement des matériaux, pourraient être différentes de celles de l'alvéole témoin. En outre, la représentativité de cet unique alvéole témoin pourrait être remise en cause si les méthodes de construction ou la conception des alvéoles courants venaient à être modifiées lors des tranches ultérieures. Sur ce dernier point, l'IRSN souligne que l'évolution du démonstrateur MA-VL en alvéole témoin induit une contrainte supplémentaire en termes de conception vis-à-vis des alvéoles courants et s'interroge sur les bénéfices qui pourront être tirés de ce démonstrateur s'agissant d'optimisation. **Ainsi, l'IRSN estime qu'il appartiendra à l'Andra de justifier la représentativité des mesures des conditions d'environnement qui prévaudront dans l'alvéole témoin vis-à-vis de celles d'alvéoles qui seraient construits ou conçus de manières différentes. En tout état de cause, l'IRSN estime que l'Andra devra préciser, avant le creusement du démonstrateur MA-VL, sa stratégie de surveillance déportée en alvéole témoin MA-VL en précisant les paramètres du domaine de fonctionnement normal qui seront effectivement suivis et les dispositions de surveillance (moyens, localisation, fréquence d'acquisition...) qui seront *in fine* retenues dans cet alvéole.** Ces éléments font l'objet de l'[engagement 2024-E20](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Pour ce qui concerne les alvéoles témoin HA, l'Andra prévoit de surveiller la déformation du chemisage par campagne de mesures tridimensionnelles (alvéole témoin 1), la déformation du chemisage par cannes de convergence (alvéole témoin 2) et la corrosion des aciers des colis et du chemisage (alvéole témoin 3). **Les objectifs de surveillance des alvéoles témoin 1 et 2 prévus par l'Andra n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN à ce stade.** Pour ce qui concerne l'alvéole témoin 3, l'Andra prévoit de surveiller les mêmes paramètres que pour les alvéoles courants (température, composition de l'eau d'exhaure drainée et atmosphère interne [53]) et d'effectuer en plus des prélèvements à des intervalles de temps non encore définis, *via* des coupons d'aciers de colis factices et du chemisage disposés dans des porte-échantillons pour mesurer la perte de masse par corrosion. L'Andra considère que ces moyens de surveillance permettent de vérifier de manière déportée que les phénomènes de corrosion sur les conteneurs de stockage et le chemisage correspondent à ceux attendus en phase de fonctionnement dans les alvéoles courants (corrosion généralisée avec une vitesse de référence de 10 µm/an [2]). La surveillance de la température et de la composition de l'eau d'exhaure n'appelle pas de remarque sur le principe à son stade de développement ; celle de l'atmosphère interne est examinée au chapitre 4.3.2 relatif aux risques liés à l'explosion. S'agissant des mesures de perte de masse, l'IRSN rappelle [2] que la nature des processus de corrosion (localisée ou généralisée) observés est fortement influencée par les conditions d'environnement des composants métalliques, en particulier la formulation du MREA et la présence d'oxygène ; les conditions d'environnement rencontrées au sein de l'alvéole de stockage au cours de la phase d'exploitation (milieu aéré/désaéré, pH, présence de sulfures) pourraient conduire à des phénomènes de corrosion localisée. Or, compte tenu du caractère localisé de ces phénomènes, l'IRSN estime que la mesure de la perte de masse d'un échantillon, qui est une mesure globale sur l'échantillon prélevé, pourrait ne pas être représentative de ces phénomènes locaux. **Ainsi, l'IRSN estime que la stratégie de surveillance de la corrosion retenue par l'Andra en alvéole HA témoin n°3 ne permet pas, *a priori*, la détection ni la surveillance de phénomènes de corrosion localisée**, par nature très dépendants des conditions d'environnement locales qui seront rencontrées dans les alvéoles courants. Toutefois, l'IRSN rappelle [2] que l'Andra prévoit un programme de recherche en phase pilote sur la corrosion des composants métalliques en vue de consolider le dimensionnement des composants de l'alvéole HA, qui pourra apporter des éléments de démonstration sur ce point. **Ainsi, il appartiendra à l'Andra de justifier la représentativité des mesures de corrosion des aciers réalisées en alvéole témoin au regard des conditions d'environnement différentes susceptibles d'y prévaloir, au même titre que pour l'alvéole témoin MA-VL.**

3.6. Gestion des situations accidentelles et post-accidentelles

L'Andra définit la gestion accidentelle comme « toutes les actions effectuées depuis la survenue d'une situation venant sortir l'installation de ses conditions de fonctionnement nominales et dégradées jusqu'à la justification du maintien à l'état sûr²⁵ de l'installation » et la gestion post-accidentelle comme « les actions de retour à l'exploitation de l'installation nucléaire à la suite de la justification du maintien à l'état sûr de l'installation ». Ces modalités de gestion sont analysées ci-dessous (chapitre 3.6.2), après l'examen des scénarios retenus pour définir ces actions (chapitre 3.6.1). Le présent chapitre porte ensuite sur l'étude de dimensionnement du Plan d'urgence interne (**PUI**) de l'installation, sur lequel l'Andra s'appuie pour les situations accidentelles nécessitant des dispositions spécifiques de gestion de crise (chapitre 3.6.3).

3.6.1. Scénarios retenus pour définir les actions de gestion

Dans le but d'identifier les modalités de gestion accidentelle et post-accidentelle, l'Andra retient au stade du DDAC, parmi les scénarios issus du domaine des situations accidentelles de dimensionnement, ceux représentatifs des opérations courantes du procédé nucléaire (manutention et transfert de colis ou d'emballage de transport) et ceux les plus contraignants en termes d'opérations, de procédures et d'équipements (par exemple l'utilisation de moyens téléopérés) pour la maîtrise de la gestion accidentelle ou post-accidentelle.

En complément, l'Andra tient compte des scénarios suivants pour l'étude de la gestion accidentelle et post-accidentelle :

- défaillance du 1^{er} système de confinement²⁶ d'un colis de stockage en alvéole MA-VL (situation d'extension du dimensionnement) ;
- retrait d'un colis de stockage HA manutentionnable contaminé à la suite d'une altération localisée ou d'une perte d'intégrité d'un conteneur voisin (situation hypothétique étudiée au titre de la récupérabilité, cf. chapitre 6.4) ;
- effondrement en partie utile d'un alvéole MA-VL (situation étudiée à titre conventionnel).

Enfin, l'Andra retient les deux scénarios suivants, impliquant des opérations de décontamination de cellule, de reconfinement de colis ou encore de changement de filtres, qu'elle estime pénalisants à l'égard de l'impact radiologique aux travailleurs :

- chute d'emballage de transport avec déconfinement de l'emballage et des colis primaires en tenant compte de la défaillance du système d'amortissement placé sous l'emballage (scénario du domaine des situations accidentelles d'extension du dimensionnement) ;
- déconfinement d'un colis primaire en zone tampon (scénario du domaine des situations accidentelles de dimensionnement).

L'IRSN constate que la démarche engagée par l'Andra en vue de disposer de scénarios permettant l'identification des opérations de gestion accidentelle et post-accidentelle est nouvelle par rapport au DOS et note que celle-ci ne se limite pas à retenir des situations accidentelles de dimensionnement, mais inclut des situations complémentaires susceptibles de conduire à des opérations de gestion particulières, telles que des situations conduisant à un impact aux travailleurs ou des situations étudiées à titre hypothétique. **Ceci est satisfaisant sur le principe.**

En revanche, l'IRSN constate que les scénarios retenus par l'Andra n'incluent pas un éventuel accident ayant conduit à une contamination de galeries souterraines. Bien que l'IRSN estime satisfaisant que la conception de Cigéo vise à exclure de telles situations, il estime nécessaire, au titre de la défense en profondeur, de postuler un scénario de dissémination de substances radioactives au sein de l'installation au même titre que les autres

²⁵ Le maintien à l'état sûr correspond à des conditions stables et contrôlées de l'installation pouvant être maintenues indéfiniment avec la garantie de la maîtrise des fonctions de sûreté.

²⁶ Le premier système de confinement est composé du colis primaire dans le cas du stockage direct (sans conteneur de stockage) et du colis de stockage dans les autres cas.

situations complémentaires considérées par l'Andra, afin de présenter les dispositions de gestion accidentelle et post-accidentelle nécessaires et ainsi de s'assurer qu'un tel scénario ne conduirait pas à une impossibilité de reprise de l'exploitation ou à un éventuel abandon du stockage sans que des dispositions visant *a minima* à assurer la sûreté à long terme n'aient pu être prises. L'IRSN estimait ainsi au stade du DOS que « *l'analyse des situations d'extension de dimensionnement devait comporter un volet relatif aux dispositions concrètes à mettre en œuvre pour reprendre l'exploitation de Cigéo, en ne se limitant pas au retrait éventuel du (ou des) colis touché(s) par le sinistre mais en élargissant l'analyse aux différents composants de Cigéo nécessaires à cette reprise (par exemple la ventilation, l'accès aux galeries, l'état des radiers, les capacités d'entreposage, etc.)* ». En outre, le retour d'expérience des accidents du Waste Isolation Pilot Plan (**WIPP**) met en évidence les difficultés à mettre en œuvre une intervention humaine en milieu souterrain contaminé, lorsque celles-ci n'ont pas été anticipées dès la conception. En effet, plusieurs années ont été nécessaires à l'exploitant du WIPP pour établir le diagnostic de la situation, évaluer ses implications pour la sûreté, définir et mettre en œuvre les modifications nécessaires et aboutissant à un nouveau domaine de fonctionnement normal, avant la reprise des opérations de stockage des déchets. Aussi :

Recommandation N°1

L'IRSN recommande que l'Andra présente, dans la prochaine révision du rapport de sûreté de Cigéo, les opérations de gestion accidentelle et post-accidentelle à la suite d'une situation conduisant à une contamination notable de l'installation souterraine, ainsi que les moyens associés.

En tout état de cause, l'exclusion de certaines situations de dissémination de substances radioactives n'étant à ce stade pas acquise, l'IRSN considère que ces situations doivent être retenues pour identifier les modalités de gestion accidentelles et post-accidentelles, en complément des autres dispositions prises pour réduire les conséquences, tant que leur exclusion n'est pas dûment justifiée. Il s'agit par exemple du scénario de collision de véhicules et d'incendie (cf. chapitre 4.3.1 du présent rapport).

3.6.2. Modalités de gestion accidentelle et post-accidentelle

L'Andra présente [51] les opérations de gestion accidentelle visant à mettre l'installation dans un état sûr et à la maintenir dans cet état (arrêt du procédé, affalage des emballages de transport et/ou des colis, extinction de l'incendie, pilotage de la ventilation pour assurer la gestion de la contamination et/ou des fumées...), ainsi que les moyens matériels et opérations nécessaires à la reprise d'exploitation de Cigéo après une situation accidentelle (cf. *infra*). **Ces éléments sont examinés au chapitre 4 du présent rapport relatif à l'évaluation de sûreté.**

L'Andra indique [51], s'agissant des situations post-accidentelles, qu'à la suite de la survenue d'une situation accidentelle puis du retour à l'état sûr de l'installation et du maintien de cet état, une analyse multicritère *ad hoc* serait menée afin de définir la solution de gestion post-accidentelle la plus adaptée en vue de redémarrer l'exploitation de la zone impactée. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que l'atteinte du maintien de l'état sûr lui laisserait le temps de réaliser cette analyse et de mettre en œuvre une solution adaptée au regard des enjeux de sûreté et de l'objectif de reprise d'exploitation. Les critères sous tendant cette analyse, qui n'étaient pas encore présentés au stade du DOS, concernent notamment l'état et le caractère manutentionnable des colis accidentés, l'état des équipements et du génie civil de l'alvéole impacté le cas échéant, la présence éventuelle de colis contaminés, l'impact des options retenues pour la gestion post-accidentelle sur la sûreté en exploitation et à long terme (incluant les risques associés aux opérations de reprise des colis, en particulier du point de vue de la radioprotection des travailleurs et du public), ainsi que leur complexité de mise en œuvre et la protection des personnes et de l'environnement. **L'IRSN estime que ces critères apparaissent adaptés pour orienter la gestion de la situation post-accidentelle et favoriser *in fine* une reprise de l'exploitation dans les conditions qui prévalaient avant la survenue de l'accident.** En revanche, l'IRSN rappelle, comme indiqué au stade du DOS, que les temps nécessaires aux analyses multicritères envisagées par l'Andra peuvent être longs (plusieurs années dans le cas du WIPP) et associés à des difficultés de maintien de l'installation dans un état sûr. Il importe donc que la gestion post-accidentelle soit anticipée afin de minimiser ces temps, en vue de favoriser une reprise de

l'exploitation sûre de l'installation et d'assurer la disponibilité des filières d'évacuation de déchets dont Cigéo serait l'unique exutoire.

A cet égard, pour les scénarios accidentels en alvéole de stockage MA-VL²⁷, l'Andra envisage les trois options de gestion post-accidentelle suivantes :

- le maintien en l'état du colis accidenté et la reprise des opérations de stockage dans l'alvéole ;
- le retrait du ou des colis impactés par la situation accidentelle de l'alvéole, avec retrait éventuel de colis non contaminés, pour entreposage en zone tampon d'EP1 ou dans un autre alvéole ;
- la mise en place d'opérations en vue de la fermeture anticipée de l'alvéole.

L'IRSN constate que ces trois options répondent dans leur principe à la demande de l'ASN de présenter les options de gestion post-accidentelle en distinguant « *la possibilité de poursuivre les opérations de stockage, la possibilité de retirer des colis, impliqués ou non dans la situation accidentelle [et] la possibilité de mise en œuvre des opérations de fermeture du stockage* » [28], **ce qui est satisfaisant**. L'Andra identifie plus précisément qu'au stade du DOS les opérations qu'elle envisage pour gérer des situations post-accidentelles (utilisation d'outils téléopérés de cartographie 3D du terme source, réalisation de contrôle de non-contamination et d'opérations de décontamination, constitution de sas de décontamination, comblement par injection de matériau de remplissage ou mise en place de blocs de comblement, réalisation de contrôles du génie civil). S'agissant des moyens mis en œuvre pour réaliser ces opérations, l'IRSN note qu'ils reposent principalement sur les moyens retenus par l'Andra pour l'exploitation courante, notamment concernant les opérations de retrait de colis (équipements mécaniques de l'installation souterraine, équipements de contrôle et de manutention de EP1). Toutefois, l'IRSN relève que certaines de ces opérations (cartographie 3D radiologique, mise en place de sas temporaires, injection de matériau de remplissage, reconfiguration de la ventilation...) reposent sur des équipements et outils encore peu détaillés à ce stade et dont l'Andra prévoit d'engager le développement après la survenue d'une situation et la justification du retour à l'état sûr de l'installation. L'IRSN ne peut se prononcer à ce stade sur la faisabilité de l'intégration des équipements précités. **Aussi, l'IRSN encourage l'Andra à poursuivre sa démarche de définition et de développement de moyens de gestion de situations post-accidentelles et estime qu'il lui appartiendra de préciser ces éléments préalablement à la mise en service de la phase pilote.**

Pour ce qui concerne en particulier les opérations de gestion impliquant le retrait de colis de déchets contaminés, l'IRSN note que certaines opérations pourraient impliquer des enjeux liés aux facteurs organisationnels et humains, tels que l'identification du ou des colis contaminés, le montage et le démontage d'un sas provisoire de décontamination des hottes et la mise en place et le retrait de vinylage de protection. **Aussi, l'IRSN estime que l'Andra pourrait programmer des essais portant sur les opérations de gestion post accidentelle au cours de la phase pilote, par exemple des essais simulant le retrait d'un colis contaminé dans le cadre du programme de tests de récupérabilité.** Ce point est repris au chapitre 6.4 du présent rapport relatif à la récupérabilité.

3.6.3. Etude de dimensionnement du PUI

L'Andra présente au stade du DDAC une étude de dimensionnement du PUI décrivant les situations accidentelles retenues ainsi que ses principes de déclenchement et d'organisation. Elle prévoit de définir dans le PUI au stade de la demande de mise en service de l'installation les dispositions techniques, organisationnelles et humaines nécessaires à la gestion de crise et à la limitation des conséquences dans le cas de l'occurrence de situations accidentelles qu'elle considère comme graves.

L'Andra identifie, parmi les situations accidentelles étudiées dans le rapport préliminaire de sûreté, une dizaine de scénarios qu'elle choisit pour dimensionner le PUI (cf. Annexe T6). Il s'agit de situations (i) susceptibles de nuire gravement à la protection des intérêts et nécessitant une intervention immédiate de la part de l'exploitant, (ii) nécessitant des mesures de protection à l'extérieur du site ou (iii) nécessitant l'information des autorités et

²⁷ Chute d'un colis de stockage en alvéole MA-VL lors de sa manutention par le pont ou le chariot stockeur ; incendie d'un moyen de manutention de colis de stockage MA-VL lors de leur transfert depuis la cellule de manutention jusqu'à leur position de stockage en alvéole et défaillance du 1^{er} système de confinement d'un colis de stockage en alvéole MA-VL.

la production d'éléments de communication externe. Les impacts de différentes natures générés par ces scénarios (« rejets de substances radioactives à l'extérieur de l'installation », « accident grave de personnes », « impact médiatique »...) sont considérés pour justifier ce choix.

L'IRSN constate que les scénarios retenus par l'Andra, parmi lesquels le scénario de déconfinement d'un emballage de transport et des colis primaires qu'il contient dans la fosse du hall de déchargement, des scénarios d'incendie, la chute d'un aéronef, un acte de malveillance, la détection d'anomalie significative des rejets aux émissaires ou encore un séisme, sont variés et estime qu'ils sont représentatifs des principaux dangers induits par l'exploitation du stockage auxquels le site est soumis. L'IRSN constate par ailleurs que les familles de situations retenues pour le dimensionnement du PUI au stade du DDAC ont évolué par rapport à celles que l'Andra retenait au stade du DOS. Par exemple, l'Andra ne retient plus pour le dimensionnement du PUI les situations « extrêmes » étudiées dans le cadre des ECS, bien que ces situations ne soient pas pour autant intégrées dans le dimensionnement de l'installation, comme l'Andra le prévoyait au stade du DOS. L'Andra a néanmoins indiqué au cours de l'instruction que la démarche associée aux ECS appliquée à Cigéo visait à « *définir les dispositions permettant [...] d'assurer la gestion d'une crise* ». **L'IRSN estime que la démarche de l'Andra visant à (i) dimensionner le PUI aux situations nécessitant des mesures d'urgence, des mesures de protection à l'extérieur du site et la mise en place de canaux de communication externes et à (ii) assurer la gestion de crise en cas de situation extrême est satisfaisante sur le principe.** Toutefois, l'IRSN relève que l'étude de dimensionnement du PUI présentée par l'Andra au stade du DDAC n'indique pas les zones où les niveaux d'intervention²⁸ pourraient être dépassés. **Il appartiendra à l'Andra, conformément à l'article 4.8.2 de la décision relative au contenu des rapports de sûreté des INB [54], de les préciser à l'échéance de la mise en service de Cigéo.**

Les principes de déclenchement du PUI présentés par l'Andra sont en lien avec des dispositions de détection (« *détection par deux balises de mesures radiologiques distinctes à l'intérieur de l'installation* », « *alerte météorologique* » d'une tornade, « *détection de surpression* » liée à l'inflammation d'un nuage de gaz induit par la circulation d'engins...) ou reposent sur la vigilance des travailleurs (« *constatation humaine* » d'anomalies, « *non maîtrise de l'incendie par les équipiers de 1^{ère} intervention* »...). L'IRSN estime que les critères de déclenchement du PUI, qu'il appartiendra à l'Andra de définir au stade de la mise en service de l'installation, doivent être définis de manière à favoriser la rapidité de la décision de déclencher ou non le PUI, en s'affranchissant de l'interprétation individuelle des travailleurs. Ces critères doivent ainsi reposer autant que possible sur des données quantifiables sans pour autant nécessiter d'analyse au moment de la survenue d'un accident. **Au regard de ces éléments, l'IRSN estime que les principes de déclenchement présentés par l'Andra au stade du DDAC devraient lui permettre d'identifier des critères de déclenchement satisfaisants. L'IRSN estime néanmoins que l'Andra pourrait veiller à associer aux éventuels critères relevant de la vigilance d'un travailleur un ou plusieurs critères objectifs et qu'elle pourrait retenir des critères filet, décorrélés des scénarios accidentels retenus, pour le déclenchement du PUI.**

En matière d'organisation, l'Andra prévoit des postes de commandement dédiés respectivement à la zone exploitation nucléaire et à la zone travaux. Ainsi, en zone exploitation, un poste de commandement et de coordination (PCC) et un poste central de sécurité (PCS) sont situés en surface, un poste de commandement avancé (PCA) est situé au plus près de la situation accidentelle. En zone travaux, l'Andra prévoit un PCC travaux, un poste central travaux, dont le positionnement dans un bâtiment dédié reste à confirmer, ainsi qu'un poste de commandement avancé. Elle précise qu'une interface de communication est prévue entre les postes de la zone exploitation et de la zone travaux. L'IRSN constate que l'organisation retenue à ce stade par l'Andra repose sur (i) une interface PCC travaux/PCC exploitation, (ii) la répartition non centralisée des postes de commandement et (iii) la duplication des postes par zone (PCC travaux et PCC exploitation par exemple), et estime que la multiplication des interfaces entre les postes pourrait complexifier la réalisation des missions qui leur incombera, en particulier au regard des objectifs qu'elle retient de communication avec les autorités et d'information des parties prenantes et des médias, nécessitant des canaux de communication externes en sus de ces interfaces

²⁸ Niveaux d'intervention en situation d'urgence radiologique ou les seuils d'effets des phénomènes dangereux.

internes. Aussi, l'IRSN estime que l'Andra pourrait examiner, en vue de la demande de mise en service, de quelle manière les interfaces que l'organisation de la gestion de crise doit assurer pourront être simplifiées.

3.7. Objectifs de protection contre les rayonnements ionisants

Les objectifs de protection des travailleurs et du public à l'égard des rayonnements ionisants retenus par l'Andra [44] sont résumés dans le Tableau 2 ci-dessous. L'Andra indique que ces objectifs lui permettent non seulement de vérifier le caractère suffisant des dispositions retenues pour la conception de l'installation mais aussi de guider son optimisation.

Tableau 2. Objectifs de protection à l'égard des risques radiologiques [44].

	Personnel classé en zone délimitée ⁸	Public-groupe de référence « habitants » /travailleurs non classés
Situations normale et en mode dégradé	Dose ⁹ inférieure à 5 mSv/an avec l'objectif d'optimiser à moins de 2 mSv/an pour l'essentiel des postes de travail ALARA	Dose ⁹ inférieure ou égale à 0,25 mSv/an Absence de rejets non concertés Rejets concertés suivant autorisations de rejets
Dimensionnement		
Situations incidentelles de dimensionnement	Dose ⁹ inférieure à 10 mSv/incident ALARA	Court terme (24 h) * : Dose ⁹ inférieure ou égale à 0,1 mSv Moyen terme (1 an) ** : Dose ⁹ inférieure ou égale à 0,25 mSv
Situations accidentelles de dimensionnement	Dose ⁹ inférieure à 20 mSv/accident ALARA	Court terme (24 h) * : Dose ⁹ de l'ordre du mSv Moyen terme (1 an) ** : Dose ⁹ inférieure à 1 mSv Long terme (durée vie entière) *** : Dose ⁹ inférieure à 10 mSv
Extension du dimensionnement		
Situations accidentelles d'extension du dimensionnement	ALARA	Court terme (24 h) * : Dose ⁹ inférieure à 10 mSv

* La dose efficace est calculée sur la base des expositions externes (dues au panache et au dépôt) et par inhalation (uniquement due au panache).

** La dose efficace est calculée sur la base des expositions (exposition externe et ingestion) uniquement dues aux dépôts, pendant une durée d'exposition de 1 an (déduction faite de la phase court terme).

*** La dose efficace est calculée sur la base des expositions (exposition externe et ingestion) uniquement dues aux dépôts (déduction faite de la phase moyen terme) pour une durée de vie entière (50 ans pour l'adulte et 70 ans pour les enfants).

3.7.1. Protection des travailleurs

Pour les situations normale et dégradées, l'Andra retient au stade du DDAC un objectif de dose individuelle de 5 mSv/an pour les travailleurs (cf. Tableau 2), comme au stade du DOS, et se fixe désormais comme objectif d'optimiser le niveau d'exposition externe à moins de 2 mSv/an pour l'essentiel des postes de travail [44][51]. L'IRSN constate que l'Andra a mis à jour ses objectifs de protection en cohérence avec l'optimisation de la conception, **ce qui est satisfaisant sur le principe**.

S'agissant de l'optimisation des doses collectives, l'IRSN constate que l'Andra ne fixe pas d'objectif associé [51], bien que des estimations dosimétriques collectives aient été réalisées (cf. chapitre 4.2.1 du présent rapport), et

rappelle à cet égard que la définition d'un objectif de dose collective était un attendu du DOS pour le DDAC. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de définir un objectif de dose collective associé à la protection des travailleurs en situations normale et dégradées.**

Pour les situations incidentelles et accidentelles de dimensionnement, l'Andra retient les mêmes objectifs de protection qu'au stade du DOS, à savoir 10 mSv par incident et 20 mSv par accident. Les objectifs de protection des travailleurs retenus par l'Andra en situations incidentelles et accidentelles de dimensionnement **n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.**

3.7.2. Protection du public

Les objectifs de protection retenus par l'Andra pour le public sont inchangés par rapport au DOS pour ce qui concerne les situations de fonctionnement normal et dégradé, l'Andra se fixant des objectifs de protection inférieurs à la valeur limite réglementaire de 1 mSv/an. Pour les situations incidentelles, ces objectifs ont été précisés par rapport au DOS à court et moyen termes, et, pour les situations accidentelles de dimensionnement, ces objectifs ont été précisés à court, moyen et long termes (cf. Tableau 2). **L'IRSN constate que les valeurs retenues par l'Andra sont inférieures au niveau de référence de 20 mSv d'exposition²⁹ résultant d'une situation d'urgence radiologique fixé par le code de la santé publique.**

L'IRSN observe que l'Andra se fixe un objectif de protection pour le public seulement à court terme pour les situations d'extension du dimensionnement. **L'IRSN considère que l'Andra pourrait se fixer des objectifs à moyen et long termes pour les situations accidentelles d'extension du dimensionnement.**

En ce qui concerne l'impact des toxiques chimiques au public en situations accidentelles de dimensionnement, l'Andra retient les valeurs de référence préconisées par l'arrêté INB. **Cela n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

²⁹ En dose efficace pour une personne au cours de l'année qui suit la fin de la situation d'urgence radiologique.

4. EVALUATION DE SURETE EN PHASE D'EXPLOITATION

Ce chapitre présente l'analyse de l'IRSN des principes de conception et de dimensionnement du génie civil, des dispositions de maîtrise des risques internes d'origine nucléaire, ainsi que de maîtrise des agressions d'origine interne et externe retenus par l'Andra. Enfin, ce chapitre présente l'analyse de l'IRSN de l'impact radiologique et chimique du projet Cigéo sur l'homme et l'environnement. Les éléments relatifs au vieillissement des ouvrages et équipements sont examinés au chapitre 6.5.2 relatif à l'adaptabilité de Cigéo.

4.1. Principes de conception et de dimensionnement du génie civil

Les ouvrages constitutifs du « génie civil » examinés dans le cadre de l'expertise du DDAC de Cigéo sont :

- les bâtiments nucléaires de surface, comprenant le bâtiment EP1, la tête de la descendrière colis, la tête de la descendrière service ainsi que les installations de surface des puits de ventilation d'exploitation nucléaire VFE et VVE³⁰, qui regroupent notamment les usines de ventilation d'air frais et d'air vicié et les émergences des puits ;
- les installations souterraines, incluant les liaisons surface-fond (descendrières et puits).

Les principes de conception retenus par l'Andra sont détaillés en annexe T7.

4.1.1. Ouvrages de surface

4.1.1.1. Principes de conception et dispositions retenues

L'Andra retient [55] pour les ouvrages de surface des principes de conception visant à les protéger de divers types d'agressions, telles que le séisme, la chute d'avion et la chute de charges et à assurer leur durabilité sur les périodes d'utilisation visées (de l'ordre de 85 ans pour le bâtiment EP1, 150 ans pour la tête de descendrière colis et 125 ans pour les autres ouvrages de surface). Elle retient notamment :

- des dispositions parasismiques consistant, pour l'ensemble des bâtiments nucléaires de surface à l'exception du puits VFE, en la mise en œuvre de structures simples et régulières en béton armé fondées sur radier et généralement semi-enterrées, faiblement élancées et séparées par des joints de dilatation, ou encore en la mise en place de voiles de contreventement³¹. Pour le bâtiment VFE, de structure plus élancée, l'Andra retient notamment la mise en place de fondations profondes ;
- des dispositions relatives à la durabilité des bétons, en particulier leur formulation, la limitation de leur retrait et la maîtrise de leur fissuration ainsi que la mise en œuvre des armatures (quantité et dispositions de ferrailage appropriées) ;
- des dispositions complémentaires visant à réduire les effets de la déformation thermique des bétons (joints de dilatation), à protéger les bâtiments contre la chute d'avion (mise en place d'une « coque avion » pour protéger les colis, reposant sur le principe d'une « double-dalle »³² ou d'une « dalle-liner »³³, mise en œuvre d'une coiffe en tête du puits VVE) et contre la chute de charges (ferrailage et épaisseur de béton des dalles adaptés).

L'IRSN estime, d'une part, que les dispositions parasismiques retenues par l'Andra sont globalement conformes aux prescriptions de l'Eurocode 8 [56] et du guide ASN 2/01 relatif à la prise en compte du risque sismique à la conception des ouvrages de génie civil des INB [57] et, d'autre part, que les dispositions constructives de ferrailage retenues par l'Andra (enrobage des aciers, longueurs d'ancrage et de recouvrement, épingleage, mandrin de cintrage et façonnage, chaînage, trémies, etc.) sont conformes aux guides du Commissariat à

³⁰ Seuls ces puits sont en lien avec l'exploitation nucléaire. Les puits VFT, VVT et MMT sont utilisés dans la zone travaux pour transférer des flux de matériaux ou de personnel.

³¹ Les voiles de contreventement permettent la reprise des efforts latéraux du séisme et leur transfert aux fondations.

³² Le principe repose sur l'interposition de deux dalles au minimum entre les locaux contenant des colis primaires ou des colis de stockage et le point d'impact potentiel d'un avion. La dalle interne est appelée par la suite dalle de second rang.

³³ Un liner métallique est utilisé en sous-face des dalles potentiellement impactées par la chute d'avion (dites « dalle-liner »).

l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) relatifs à la conception du génie civil des INB et des bâtiments en béton [58][59], **ce qui est satisfaisant**. Concernant les dispositions mises en œuvre à l'égard de la chute de charges, **l'IRSN considère que ceci n'appelle pas de remarque** sur le plan des principes compte tenu de l'épaisseur des planchers et du ferrailage envisagés.

S'agissant des dispositions retenues contre la chute d'avion, l'IRSN observe que la mise en place d'une coque avion à double-dalle est un principe de conception relativement commun **qui est jugé satisfaisant** compte tenu de l'éloignement des EIP, dont les colis, des zones directement impactées. Le principe de dalle-liner est plus rarement mis en œuvre. L'Andra le retient pour le hall de déchargement des emballages de transport ou encore pour certains locaux contenant des EIP (ventilation notamment), pour lesquels seule la dalle de toiture équipée de liner est interposée entre l'extérieur et les colis ou équipements sensibles. Ce concept vise, selon l'Andra, à éviter l'écaillage de béton sur les équipements sensibles ou EIP, à se prémunir du risque d'agression des emballages de transport dans le hall de déchargement, à empêcher l'infiltration de kérosène ainsi qu'à assurer le confinement³⁴. **L'IRSN estime que la mise en place d'un liner pour assurer le confinement et empêcher l'infiltration de kérosène et l'écaillage de ces dalles est acceptable sur le principe**. La mise en place d'une coiffe en tête du puits VVE n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.

S'agissant des dispositions générales présentées par l'Andra pour garantir la durabilité des ouvrages de surface sur les durées d'exploitation visées (cf. Annexe T8), l'IRSN estime que celles-ci **sont globalement satisfaisantes au regard de leur conformité à la réglementation et du retour d'expérience**, notamment concernant la maîtrise des risques de gonflement du béton lié au développement de pathologies de type réaction alcali-granat (RAG)/réaction sulfatique interne (RSI) et la mise en œuvre de dispositifs destinés à éviter la présence d'eau sur les parements en béton et à limiter l'humidité relative (membrane d'étanchéité, joint hydrofuge inter-blocs de type waterstop, etc.). L'Andra n'a néanmoins pas envisagé la mise en œuvre d'un compartimentage des dispositifs d'étanchéité sur les parties enterrées des ouvrages, ce qui ne permet pas selon l'IRSN de détecter et de traiter de manière optimale une fuite résultant d'un défaut d'étanchéité. Or, l'IRSN estime que le confinement et la localisation des entrées d'eau potentielles dans les zones délimitées par des bandes d'arrêt d'eau et la possibilité de réparer les joints hydrofuges pourraient présenter un gain pour la durabilité des ouvrages de surface. Ainsi, **l'IRSN considère que l'Andra pourrait mettre en place un compartimentage sur les parties enterrées des bâtiments afin de détecter et de traiter de manière optimale une fuite résultant d'un défaut d'étanchéité**.

Enfin, l'Andra n'a pas détaillé les dispositions constructives visant à maîtriser les mécanismes induits par les déformations du béton au jeune âge, en particulier pour les pièces massives comme le radier des blocs du bâtiment EP1 (méthodes de cure du béton, phasage de construction, dimension des plots, durée de coulage), **ce qui reste acceptable au stade de la DAC. Il appartiendra à l'Andra de porter une attention particulière aux dispositions constructives de maîtrise de ces mécanismes préalablement au démarrage des travaux**.

4.1.1.2. Démarche de dimensionnement et exigences de comportement retenues

Les bâtiments sont dimensionnés au séisme, à l'incendie, aux conditions climatiques extrêmes (neige, vent et tornade) et, selon leur typologie et les enjeux de sûreté qui y sont liés, à la chute d'avion et à la chute de charge. Leur dimensionnement à l'égard de ces agressions est détaillé aux chapitres 4.4.1, 4.3.1, 4.4.3, 4.4.4 et 4.3.3.

Les exigences de comportement liées au génie civil des bâtiments nucléaires de surface et les critères de sûreté associés à l'égard du séisme, de la chute d'avion, des chutes de charges et des conditions climatiques, présentées dans [55] et détaillées dans l'Annexe T9, **n'appellent globalement pas de remarques de l'IRSN**. Les exigences de comportement à l'égard de l'incendie sont quant à elles examinées dans le chapitre 4.3.1.6. Les deux points ci-dessous relatifs au bâtiment EP1 et le dernier point relatif à l'ensemble des ouvrages en béton armé portent sur des spécificités par rapport aux exigences usuelles.

En premier lieu, l'IRSN souligne qu'à l'exigence de participation au confinement amélioré des éléments de structure du bâtiment EP1 délimitant des cellules contenant des colis de déchets est associé un critère de

³⁴ Un critère d'absence de perforation du liner est associé à celui-ci.

limitation de la contrainte de traction dans les armatures en situation accidentelle, dans l'objectif de maîtrise de la fissuration. Ce critère, conformément au guide CEA de conception génie civil [58], permet d'assurer la réversibilité de la fissuration du fait du maintien des déformations des armatures en acier dans le domaine élastique, et ainsi le confinement post-séisme du fait de la refermeture quasi-complète des fissures, **ce qui est satisfaisant**.

En second lieu, l'IRSN estime que les exigences de comportement (cf. Annexe T9) attribuées aux éléments impactés en cas de chutes de charges tels que les radiers ou les planchers du bâtiment EP1 sont **globalement satisfaisantes**. En revanche, l'IRSN note que l'Andra n'a pas identifié au stade du DDAC les éléments structuraux et les équipements pour lesquels des exigences de supportage à l'égard des chutes de charge doivent être retenus compte tenu du fait qu'ils pourraient impacter un EIP dans leur chute. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de les identifier avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface.**

Enfin, l'Andra applique une exigence à l'égard de durabilité à l'ensemble des ouvrages en béton armé par l'exigence de participation au confinement standard. Elle se traduit, selon la classe d'exposition des parois, par la mise en œuvre d'enrobages appropriés et par la limitation de l'ouverture des fissures selon les critères de l'Eurocode 2 [56]. Le retrait est pris en compte par l'Andra en considérant une limitation des contraintes admissibles dans les armatures (méthode dite « en déformation »). **Ceci n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

4.1.2. Ouvrages souterrains

4.1.2.1. Principes de conception et dispositions retenues

Le génie civil des installations souterraines, incluant les liaisons surface-fond, comprend des structures en béton non armé (section courante de revêtement coulée en place en cas de creusement par la méthode conventionnelle ou constituée de voussoirs préfabriqués, ferrailés, mais séparés par des joints secs en cas de creusement avec un tunnelier) ainsi que des structures en béton armé (génie civil intérieur et revêtements des galeries de section singulière). Pour ces ouvrages souterrains, l'Andra retient [55] des principes de conception et des dispositions, notamment de surveillance, visant à favoriser leur stabilité structurelle sur une période séculaire, en particulier au regard du risque sismique et du comportement mécanique différé du Callovo-Oxfordien, et à garantir la durabilité des bétons sur une période de 100 à 150 ans selon les ouvrages avec un minimum de jouvence afin de ne pas entraver l'exploitation du stockage souterrain. L'Andra retient ainsi un principe de conception souple en prévoyant lors du creusement la mise en place, pour la majorité des ouvrages souterrains à l'exception des alvéoles HA, d'une couche de matériau compressible, testée au LSMHM. L'IRSN convient que ce principe permet à la fois de réduire les épaisseurs et/ou l'éventuel ferrailage du revêtement et d'accroître la durée de vie de l'ouvrage, en limitant l'accroissement des efforts mécaniques sur le revêtement induit par la convergence de la roche. S'agissant des dispositions générales de surveillance pour garantir la durabilité des ouvrages souterrains, en complément de dispositions constructives adaptées et d'un niveau élevé de qualité d'exécution des opérations de bétonnage, l'Andra retient tout particulièrement le suivi de la carbonatation des bétons, principal agent corrosif des armatures, le suivi de l'évolution de la fissuration, la surveillance de la tenue mécanique du génie civil, notamment des ouvrages non accessibles sans jouvence possible comme la partie utile des alvéoles MA-VL au moyen d'un alvéole témoin MA-VL (cf. chapitre 3.5), ainsi que des mesures de température, de pression et de déformation dans les structures et dans la roche. Ces dispositions sont présentées en Annexe T8. Au regard des éléments précédents, **l'IRSN estime que les principaux éléments de conception retenus pour les ouvrages souterrains et les dispositions de surveillance pour en garantir la durabilité sont satisfaisants dans leur principe. L'IRSN rappelle toutefois ses doutes quant à la représentativité de la surveillance de l'alvéole témoin MA-VL et (cf. chapitre 3.5.3) que l'Andra devra préciser sa stratégie de surveillance déportée au sein de cet alvéole témoin (cf. engagement 2024-E20).**

Pour ce qui concerne la formulation des bétons, qui fait partie des dispositions de garantie de la durabilité du génie civil (cf. Annexe T8), l'Andra indique qu'elle prévoit d'appliquer une approche performancielle (cf. chapitre 6.5.2) et prédictive de la durabilité des structures en béton armé, fondée sur la notion d'indicateurs pour quantifier les phénomènes de dégradation potentielle identifiés. L'Andra précise qu'un guide méthodologique, développé à cet usage par l'Association Française de Génie Civil et repris dans les Techniques de l'Ingénieur,

présente des spécifications précises relatives aux indicateurs (par exemple, porosité, rapport eau-ciment, résistance, etc.) en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée pour l'ouvrage, en vue de sélectionner ou de qualifier des formules de béton. Au stade actuel, l'Andra retient une approche purement prescriptive [56] qui ne permet pas *a priori*, selon l'Andra, de formuler avec un haut niveau de confiance des bétons de durée de vie au-delà d'un ordre séculaire. **L'IRSN considère qu'il appartiendra à l'Andra de décliner la démarche performancielle et prédictive envisagée, en précisant notamment les indicateurs de durabilité et les essais prévus (vieillesse accéléré, etc.).**

4.1.2.2. Démarche de dimensionnement et exigences de comportement retenues

L'Andra retient pour les ouvrages souterrains un dimensionnement à la poussée des terrains, aux effets de la température, à l'incendie interne, ainsi qu'au spectre de dimensionnement de 2016 (SDD-2016) pour la phase d'exploitation et au séisme maximum physiquement plausible (SMPP) pour la phase post-fermeture. Le dimensionnement du génie civil aux effets de la poussée des terrains, de la température, d'un incendie et du séisme est détaillé dans les chapitres 4.4.3, 4.3.1 et 4.4.1.

Dans ces différentes situations, les exigences de comportement sont la stabilité d'ensemble, la résistance structurelle et le supportage d'équipements. S'agissant de l'exigence de durabilité, l'Andra ne retient, contrairement aux ouvrages de surface, aucun critère d'ouverture des fissures pour le dimensionnement des revêtements en béton non armé et coulé en place des sections courantes de galeries, car ces éléments sont entièrement comprimés du fait de la pression appliquée par le terrain. Les critères associés à cette exigence sont détaillés en Annexe T10 pour les éléments de génie civil en béton armé (génie civil intérieur et revêtement des sections singulières de galerie) ; l'exigence de durabilité se traduit par la mise en œuvre d'enrobages appropriés et par la limitation de l'ouverture des fissures selon les critères de l'Eurocode 2 [56] spécifiés dans le guide CEA de conception génie civil [57].

Les exigences de comportement et de durabilité, ainsi que les critères associés sont conformes au guide CEA [57] et **n'appellent pas de remarques particulières de l'IRSN**. En outre, l'IRSN note que, pour les alvéoles MA-VL dont les revêtements de galerie sont toujours comprimés, l'Andra a indiqué en cours d'instruction retenir pour le génie civil intérieur en béton armé de la cellule de manutention et de la galerie d'accès des alvéoles MA-VL une exigence de confinement qui se traduit par un objectif de maîtrise de la fissuration et la prise en compte d'un critère de type participation au confinement amélioré [57], **ce qui est satisfaisant**.

4.2. Risques internes d'origine nucléaire

4.2.1. Exposition des travailleurs

L'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants provenant des substances radioactives peut être externe, lorsque le travailleur se trouve exposé par des rayonnements ionisants émis par une source radioactive située dans son voisinage ou au contact direct avec la peau, ou interne, quand des éléments radioactifs ont pénétré à l'intérieur de l'organisme, par inhalation, ingestion, par voie transcutanée ou par une plaie. Les objectifs de dose individuelle pour les travailleurs retenus par l'Andra font l'objet du chapitre 3.7.1 du présent rapport. Le présent chapitre porte sur l'exposition des travailleurs pour les situations normale et dégradées d'exploitation de Cigéo. Les conséquences radiologiques des situations incidentelles et accidentelles sur les travailleurs sont examinées au chapitre 4.5.2.

Les opérations ayant lieu à Cigéo, susceptibles d'entraîner une exposition des travailleurs, sont par exemple les opérations de réception et de déchargement des emballages de transport ou encore certaines opérations de contrôle, surveillance et maintenance dans les installations de surface et de fond. A ce titre, l'IRSN rappelle (cf. chapitre 2.5) que les travailleurs sont généralement positionnés dans la SCC ou à un PCL.

L'Andra estime que, en situation normale ou dégradée, l'exposition interne des travailleurs est négligeable. En effet, l'Andra indique par exemple qu'au moins deux barrières de confinement statique sont présentes entre les travailleurs et les substances radioactives contenues dans les colis primaires, que le niveau de contamination surfacique des divers matériels est faible, que des équipements individuels de protection sont présents à certains

postes de travail en cas de défaillance d'une barrière (notamment, lors d'opérations devant être réalisées à proximité des emballages de transport ou des fûts de déchets d'exploitation) ou pour certaines opérations de maintenance spécifiques (changement de filtres), et que la ventilation permet d'évacuer notamment le radon d'origine naturelle. **L'IRSN convient de ce point.** Aussi, la suite de ce chapitre examine plus particulièrement la maîtrise du risque d'exposition externe.

S'agissant de la phase de réception des emballages de transport, l'IRSN retient que les enjeux de radioprotection des travailleurs sont faibles car les producteurs des colis ont prévu de mettre en œuvre, en se conformant à la réglementation des transports de matières radioactives, des moyens visant à maîtriser le risque d'exposition des travailleurs. S'agissant des phases ultérieures du procédé nucléaire, l'étude menée par l'Andra pour évaluer le risque d'exposition externe des travailleurs se base sur l'estimation des débits d'équivalent de dose (DED) des colis de déchets de l'inventaire de référence. Afin de s'assurer de la pertinence des valeurs des composantes neutrons et gamma au DED présentées par l'Andra, l'IRSN a réalisé une modélisation simplifiée des colis primaires et des colis de stockage à l'aide des codes MicroShield [60] et MCNP [61], à partir des géométries et des matériaux précisés par l'Andra [62]. Ces calculs confirment les estimations de l'Andra, qui indique en outre que les DED totaux au voisinage des colis HA et MA-VL pénalisants relèvent de zones contrôlées rouges³⁵. L'Andra indique que l'interdiction d'accès des travailleurs aux zones contrôlées rouges est prévue par conception (présence de mur, porte, etc.) et par l'intermédiaire de consignations électriques ou mécaniques [51]. **L'IRSN considère que ces dispositions de contrôle d'accès prévues par l'Andra sont acceptables.**

Par ailleurs, l'IRSN note que des locaux en zone contrôlée rouge sont susceptibles d'être adjacents à d'autres locaux accessibles en zone surveillée bleue³⁶. Pour les locaux adjacents aux zones contrôlées rouges du bâtiment de surface EP1, les épaisseurs théoriques requises de béton pour les structures de génie civil, faisant office de protection radiologique, ont été déterminées par l'Andra à l'aide d'abaques. L'IRSN a vérifié, par calcul, dans deux configurations simples de murs (géométrie plane, sans discontinuités) que les épaisseurs retenues par l'Andra permettent de respecter l'ordre de grandeur des DED cibles pour les travailleurs avec les colis primaires pénalisants MA-VL et HA de l'inventaire de référence. L'IRSN considère que, si l'utilisation d'abaques est adaptée pour des configurations simples telles que citées précédemment, elle peut s'avérer insuffisante pour estimer toutes les composantes du DED aux postes de travail dans des configurations plus complexes, notamment celles présentant des discontinuités telles que des traversées, des hublots et des platines d'ancrage³⁷. La présence de discontinuités concerne en particulier les voiles du niveau +0,00 m des zones de circulation et des locaux dédiés au contrôle des colis. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé qu'en complément, des modélisations ont été réalisées pour le dimensionnement des équipements complexes (portes, batardeaux, accostages) présentant des recouvrements importants avec le génie civil et que d'autres études plus détaillées seront menées dans les phases ultérieures du projet. **Ainsi, il appartiendra à l'Andra, dans le cadre de la demande de mise en service de Cigéo, de s'assurer que les traversées, les hublots et les platines d'ancrage portés par les voiles (configurations précises, épaisseurs, matériaux) n'impactent pas les DED visés aux postes de travail et dans les zones de circulation du bâtiment EP1.**

En cohérence avec les calculs de dimensionnement, un zonage radiologique du bâtiment EP1 a été défini par l'Andra [51][62]. Ce zonage résulte, d'une part de l'évaluation par calcul des DED à chaque poste de travail en fonction de la localisation des colis pénalisants, d'autre part de « contraintes de dose » (exprimées en $\mu\text{Sv/h}$) pour les locaux concernés ou adjacents, accessibles par des travailleurs de façon permanente (sas d'accès, couloirs de circulation...) ou occasionnelle (locaux de filtration ou de gestion de déchets d'exploitation, maintenance préventive ou corrective). En premier lieu, l'IRSN relève que la formulation de « contrainte de dose » n'est pas appropriée. En effet, l'article R. 4451-33 du code du travail précise que la contrainte de dose s'exprime en termes de dose individuelle efficace pour une activité donnée. Ainsi, il ne peut s'agir d'un objectif de dimensionnement des protections biologiques issu de résultats de calculs réalisés à l'aide de codes de calcul

³⁵ Dans une zone contrôlée rouge, la dose efficace intégrée sur une heure est supérieure ou égale à 100 mSv (article R. 4451-23 du code du travail).

³⁶ Dans une zone surveillée bleue, la dose efficace intégrée sur un mois est inférieure à 1,25 mSv (article R. 4451-23 du code du travail).

³⁷ Platines métalliques ancrées dans le béton pour le supportage d'éléments lourds.

de radioprotection, exprimé à l'aide d'une valeur opérationnelle en débit horaire d'équivalent de dose, tel que retenu par l'Andra. Outre cette remarque formelle, l'IRSN estime que le zonage radiologique doit être un moyen de prévenir les expositions dans un local potentiellement accessible par un travailleur. Ainsi, il devrait, en toute rigueur, être défini en considérant uniquement la durée de présence des sources de rayonnement³⁸ dans les locaux sur une période d'une heure ou d'un mois ainsi que le débit de dose correspondant. Les différentes zones sont alors définies par des doses susceptibles d'être reçues en une heure ou en un mois en présence de sources de rayonnement. **En conséquence, il appartiendra à l'Andra de vérifier, pour la prochaine révision du rapport de sûreté, la cohérence du zonage radiologique des locaux (bâtiment de surface, descenderie, galeries souterraines) avec cette définition, indépendamment de la durée et de la fréquence des interventions prévues dans ces locaux.**

Enfin, l'IRSN relève que le zonage radiologique du bâtiment EP1 contient plusieurs locaux dans lesquels sont prévues plusieurs délimitations de zones sans séparation physique. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué qu'elle prévoyait de matérialiser les changements de zone ou les sauts de zone, entre zone surveillée et zone contrôlée, par une signalisation spécifique à l'aide de marquages au sol et de panneaux. L'IRSN s'interroge sur l'efficacité de la matérialisation envisagée par l'Andra et rappelle que tout travailleur entrant en zone contrôlée doit être équipé d'un dosimètre opérationnel. L'IRSN considère que les modalités de délimitation et de franchissement de sauts de zone doivent être mentionnées dans les RGE afin de garantir une pratique uniforme sur l'ensemble de l'installation et de limiter la survenue d'événements. **Sur l'ensemble de ces sujets, l'IRSN renvoie à l'engagement 2024-E54 relatif à la prise en compte des exigences de la radioprotection lors de la conception détaillée de Cigéo pour sa construction** (cf. chapitre 6.1 du présent rapport).

S'agissant des postes de travail dans l'installation souterraine, les DED dans les zones à 1 m des têtes d'alvéoles HA en cours de remplissage, localement majoritairement dus aux neutrons, sont estimés par l'Andra sur la base de calculs. L'IRSN relève qu'ils pourraient dépasser un critère de dimensionnement de l'épaisseur du matériau neutrophage des bouchons provisoires (25 µSv/h) avec la plus faible des épaisseurs pour le moment envisagées par l'Andra (entre 50 et 250 mm) [62]. Par ailleurs, le classement en zone surveillée bleue tel que proposé par l'Andra pour les galeries de liaison HA fait apparaître de petites zones contrôlées verte³⁹ à proximité immédiate de la tête des alvéoles, ce qui pourrait rendre la déclinaison opérationnelle du zonage radiologique difficile pour la gestion au quotidien de la circulation des travailleurs et des sauts de zone (cf. *supra*). Pour ce qui concerne les galeries MA-VL, des zones surveillées bleues et contrôlées vertes peuvent cohabiter au niveau de discontinuités entre les parties mobiles des protections biologiques de l'entrée des alvéoles MA-VL, ou avec le génie civil. **Compte tenu de ces éléments, il appartiendra à l'Andra, dans le cadre de la demande de mise en service de l'installation, d'une part de préciser l'épaisseur nécessaire de matériau neutrophage dans les bouchons provisoires des alvéoles HA, d'autre part de vérifier l'applicabilité opérationnelle de la délimitation des zones surveillées et contrôlées envisagée dans les galeries de liaison HA et MA-VL.**

Dans le DDAC, l'Andra présente l'estimation dosimétrique prévisionnelle collective initiale, ainsi qu'une valeur plus basse résultant d'une optimisation. L'estimation dosimétrique prévisionnelle optimisée s'élève ainsi au maximum à 587 H.mSv/an et sa valeur moyenne est de 372 H.mSv/an. Il convient de noter un abaissement de 15 % à 20 % entre les estimations initiales et optimisées. Les doses individuelles moyennes optimisées sont comprises entre 1 mSv et 2 mSv sur un an, également en baisse de la même proportion par rapport aux valeurs initiales. **L'IRSN considère que ces informations, complétées depuis le DOS, sont suffisantes au stade du DDAC, en termes d'estimation dosimétrique prévisionnelle collective et individuelle.** La valeur de 2 mSv/an pour la dose individuelle n'appelle pas de remarque. L'IRSN rappelle à cet égard que le processus d'optimisation est un processus continu au cours du développement et de l'exploitation d'une INB.

Enfin, la surveillance radiologique des locaux repose sur un réseau (i) de balises fixes de surveillance du débit de dose gamma, implantées dans les zones de travail soumises à des variations du débit de dose ambiant, (ii) de

³⁸ Dans le DDAC, l'Andra distingue des sources fixes, présentes de manière prolongée dans une zone (par exemple, colis entreposés ou stockés), et des sources mobiles, se déplaçant dans une zone et pouvant y marquer un arrêt (par exemple, hotte de transfert).

³⁹ Dans une zone contrôlée verte, la dose efficace intégrée sur un mois est inférieure à 4 mSv (article R. 4451-23 du code du travail).

balises neutrons, (iii) de sondes gamma à haut flux (locaux de contrôle des colis), ainsi que (iv) de balises de surveillance de la contamination atmosphérique (aérosols) avec signalisation intégrée. L'Andra indique que les équipements de surveillance radiologique effectuant des mesures en temps réel surveillent *a minima* deux seuils [51] : le premier dont le dépassement génère une alerte fixée légèrement au-dessus du niveau de DED attendu aux postes pour les colis dimensionnants et le second dont le dépassement génère une alarme fixée à la limite haute du zonage radiologique du local ou de la zone. S'agissant de la surveillance de la contamination atmosphérique des locaux, l'Andra ne précise toutefois pas dans le DDAC les radionucléides de référence retenus pour le réglage des seuils. **Il appartiendra à l'Andra de préciser, dans le cadre de la demande de mise en service de l'installation, les choix retenus pour les radionucléides de référence et les réglages de seuils associés pour les balises de surveillance, en cohérence avec (i) les DED cibles pour la conception, vis-à-vis de la radioprotection, des voiles en béton, des portes en acier et des bouchons d'alvéoles HA, (ii) la configuration géométrique détaillée des postes de travail à surveiller et (iii) la délimitation radiologique des locaux concernés.**

Concernant la surveillance des travailleurs, l'IRSN note que l'Andra ne précise pas la nature des rayonnements à suivre par les dosimètres travailleurs à lecture différée ou opérationnels (rayonnement gamma et émissions neutrons). En outre, l'IRSN attire l'attention sur le fait que le spectre énergétique des neutrons évolue au cours de l'exploitation de Cigéo selon les colis et la durée de leur stockage. **Du fait de la sensibilité des coefficients de dose des neutrons en fonction de leur énergie, l'Andra pourrait réaliser des mesures du spectre énergétique des neutrons, notamment pendant la phase de remplissage des alvéoles HA, afin d'améliorer en continu l'estimation dosimétrique. En tout état de cause, l'IRSN rappelle qu'il appartiendra à l'Andra de s'assurer que ses travailleurs disposent d'une surveillance individuelle de l'exposition externe adaptée aux conditions d'exercice de leurs activités.**

4.2.2. Dissémination des substances radioactives

Pour éviter une dissémination des substances radioactives, l'Andra indique mettre en place, sauf exception justifiée, deux systèmes de confinement entre les substances radioactives et l'environnement, pour les situations normales et dégradées, et maintenir au moins un de ces systèmes en situations incidentelles et accidentelles [51][63]. A ce titre, les dispositifs associés aux deux systèmes de confinement sont classés EIP et disposent d'exigences au regard du maintien du confinement des substances radioactives en situations normale, incidentelles et accidentelles [49]. Le premier système de confinement est constitué d'une ou plusieurs barrières de confinement statique au plus proche du déchet. Le second système de confinement, palliant une éventuelle défaillance du premier système de confinement, est constitué d'un confinement statique comportant une ou plusieurs barrières, matérialisées notamment par les parois des locaux, des équipements (par exemple, emballages de transport et hottes) ou des caissons de filtres, complété par un confinement dynamique pour les locaux.

Le présent chapitre porte sur l'examen de chacun de ces deux systèmes de confinement statique, du confinement dynamique puis de la surveillance de ces systèmes.

4.2.2.1. Premier système de confinement statique

Comme présenté au stade du DOS, le premier système de confinement des déchets HA est assuré par le colis primaire⁴⁰ seul avant sa mise en conteneur de stockage dans l'installation de surface. Après la confection du colis de stockage (colis primaire mis en conteneur de stockage) et le contrôle des soudures du conteneur, le premier système est alors constitué de deux barrières statiques de confinement : le colis primaire et le conteneur de stockage, qui sont classés EIP.

Afin de vérifier la capacité de l'EIP « conteneur de stockage » à assurer la fonction de confinement qui lui est assignée, l'Andra a étudié la tenue des conteneurs de stockage HA à l'incendie et à la chute, pour s'assurer du maintien du confinement des substances radioactives dans ces situations, et également de leur caractère

⁴⁰ Matrice et conteneur primaire.

manutentionnable [39]. Les éléments relatifs à la tenue à l'incendie sont examinés au chapitre 4.3.1.4 du présent rapport. Pour la tenue à la chute, des essais ont été réalisés pour diverses hauteurs de chute et dans différentes configurations, sur des maquettes correspondant à d'anciens modèles de conteneurs de stockage. L'Andra prévoit de ce fait de nouveaux essais avec des conteneurs de stockage tels que retenus au stade du DDAC (notamment, épaisseur passant de 70 mm à 65 mm ou 32,5 mm selon les types de conteneurs, masse du colis de stockage passant de 3,4 t à 1,3 t ou 2,3 t). Au vu des éléments présentés par l'Andra à ce stade, à savoir les résultats des essais précités et les évolutions de conception, l'IRSN considère que la démonstration du maintien du confinement des conteneurs de stockage HA et de leur caractère manutentionnable en cas de chute devrait pouvoir être atteinte pour la demande de mise en service. **Pour cela, il appartiendra à l'Andra de confirmer ces premiers éléments lors de la qualification des EIP (cf. chapitre 3.4.2), qui devra notamment intégrer les essais de tenue à la chute prévus, dans les configurations retenues pour la mise en stockage, avec les nouveaux modèles de conteneur de stockage HA.**

Par ailleurs, s'agissant de la tenue à la corrosion, l'IRSN note que le dimensionnement du conteneur de stockage HA vise au maintien de son étanchéité pendant la période thermique de ces déchets, d'ordre pluriséculaire. Ce dimensionnement se base sur le processus de corrosion généralisée et une vitesse de corrosion constante de 10 µm/an. A cet égard, l'IRSN rappelle ses conclusions formulées à l'issue de l'expertise GP1, relatives à la corrosion des composants métalliques des alvéoles HA, selon lesquelles les processus et vitesses de corrosion font l'objet d'incertitudes significatives de nature à remettre en cause le caractère enveloppe du dimensionnement retenu. Des compléments sur ce point ont été transmis par l'Andra en vue de leur expertise au GP3. En outre, l'IRSN convient (cf. chapitre 4.3.2.2 relatif à la maîtrise du risque d'explosion) que les dispositions de conception retenues à ce stade pour l'alvéole HA (bride métallique équipée d'un joint, membrane étanche en paroi de galerie, MREA, etc.) devraient, sur le principe, contribuer à la maîtrise de la teneur en oxygène dans les alvéoles HA et donc à la limitation des phénomènes de corrosion du conteneur de stockage. Toutefois, l'IRSN note qu'à ce stade leur faisabilité technique n'est pas démontrée. **Ainsi, l'IRSN considère que les performances du premier système de confinement des déchets HA placés en alvéole de stockage ne sont pas démontrées au stade du DDAC.** De plus, l'Andra considère, comme au stade du DOS, qu'un second système de confinement des déchets HA n'est pas requis dès lors que le colis primaire est dans son conteneur de stockage, compte tenu du maintien pendant la durée d'exploitation de ces deux barrières statiques (colis primaire et conteneur de stockage) constituant le premier système de confinement. L'IRSN n'a pas d'opposition de principe à ce qu'un seul système de confinement soit retenu pour les déchets HA. Toutefois, la démonstration de la suffisance d'un seul système de confinement pour ces déchets repose notamment sur la tenue de ce système à la corrosion, or celle-ci n'est pas acquise en alvéole de stockage. **Il appartiendra donc à l'Andra de justifier, avant le creusement du premier alvéole HA du quartier pilote, la performance et la suffisance du système de confinement des déchets HA en alvéole, sur la base notamment de données probantes relatives aux phénomènes de corrosion. En tout état de cause, l'IRSN estime qu'un effort important doit être porté par l'Andra sur le dimensionnement des composants de l'alvéole HA en vue de cette échéance.** Ce point est repris au chapitre 4.3.2.2 du présent rapport.

S'agissant de la zone de soudure des conteneurs de stockage HA, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que l'assemblage du corps et du couvercle était réalisé par soudage au faisceau d'électrons, permettant notamment de réaliser une soudure en pleine pénétration, en une passe, sans métal d'apport. Selon l'Andra, cela confère à la zone soudée des propriétés mécaniques équivalentes à celles du corps et du couvercle du conteneur, afin que celle-ci ne constitue pas une zone potentielle de faiblesse mécanique. L'Andra a en outre réalisé des essais de traction sur des échantillons d'acier soudés. Toutefois, l'IRSN note que l'Andra n'a pas réalisé de tels essais sur des échantillons corrodés, alors que ceux-ci permettraient de vérifier que l'acier soudé et corrodé conserve les mêmes propriétés que l'acier de base corrodé. **Ainsi, il appartiendra à l'Andra de vérifier, par exemple dans le cadre des démonstrateurs HA prévus au LSMHM, que la zone soudée corrodée présente des propriétés mécaniques équivalentes à celles de l'acier de base corrodé.**

S'agissant du premier système de confinement des déchets MA-VL, celui-ci est assuré, comme au stade du DOS, par le colis primaire seul, puis après mise en conteneur de stockage le cas échéant, par le colis de stockage (colis

primaire et conteneur de stockage). L'IRSN note que les conteneurs de stockage en acier et en béton standards (couvercle vissé) ne constituent pas une barrière de confinement, contrairement aux conteneurs en béton renforcés vis-à-vis du confinement (couvercle vissé et clavé⁴¹), prévus par l'Andra lorsque la démonstration du maintien du confinement du colis primaire durant la phase d'exploitation n'est pas apportée par le producteur (cf. chapitre 5.1.2). L'IRSN relève que l'Andra n'a pas précisé à ce stade le facteur de rétention attribué, en situation normale, aux conteneurs de stockage renforcés vis-à-vis du confinement. En outre, l'Andra retient à ce stade pour les conteneurs de stockage, renforcés ou non vis-à-vis du confinement, un facteur de rétention de 10^{-2} en situation accidentelle de chute et de 10^{-1} en situation d'incendie. Pour la situation de chute, ce facteur résulte toutefois d'un essai préliminaire réalisé sur un prototype. Des essais statiques et dynamiques (chute d'un conteneur) sont par conséquent prévus par l'Andra en 2025 afin de s'assurer des performances de confinement de ces conteneurs en situations normale incidente et accidentelle en fonction des diverses géométries et situations pouvant être rencontrées dans Cigéo [36][52]. L'Andra précise que l'absence de dégradation du liant de clavage des conteneurs renforcés sera également vérifiée dans les tests. **L'IRSN estime que les éléments présentés à ce stade ne permettent pas de s'assurer du caractère enveloppe des facteurs de rétention retenus. Dans le cas où ces facteurs ne seraient pas confirmés par les essais prévus, il appartiendra à l'Andra de mettre à jour sa démonstration de sûreté, sur la base des facteurs de rétention obtenus lors de ces essais.** En outre, s'agissant de la tenue à la chute des conteneurs de stockage, l'Andra a réalisé des essais sur des prototypes de conteneurs en béton sans liant de clavage ainsi que des simulations, et a également réalisé des essais sur des conteneurs en acier. Par comparaison entre les essais et les simulations, l'Andra conclut au caractère enveloppe des simulations et à la tenue à la chute des conteneurs de stockage MA-VL en béton. Des déformations ou écaillages ont pu être observés sur les conteneurs suite aux essais de chute, sans perte de leur caractère manutentionnable. Sur cette base, l'Andra conclut à la tenue à la chute des conteneurs de stockage MA-VL en béton et en acier. Au stade du DDAC, l'IRSN estime que les simulations et essais de chute réalisés (choix des hauteurs de chute, diversité des types de conteneurs de stockage, etc.) sont effectivement de nature à montrer la tenue à la chute des conteneurs de stockage MA-VL. **Il appartiendra à l'Andra de confirmer ce point lors de la qualification formelle de ces conteneurs.**

De manière générale, s'agissant des conteneurs de stockage HA et MA-VL assurant une fonction de confinement, l'IRSN attire l'attention sur l'importance des essais que l'Andra prévoit de réaliser dans le cadre de leur qualification afin de démontrer l'atteinte et le maintien des performances visées. Concernant les colis MA-VL en stockage direct, l'IRSN rappelle que l'atteinte et le maintien de leur fonction de confinement repose sur le respect d'une spécification d'acceptation (voir chapitre 5.1.2).

4.2.2.2. Second système de confinement statique

Lors du transport des colis primaires jusqu'au hall de réception et de déchargement de l'installation EP1 et lors des activités de réception puis de préparation du déchargement, le second système de confinement des déchets est constitué de l'emballage de transport (ET) jusqu'au retrait de son couvercle en cellule de déchargement. Le dispositif d'accostage des ET à la cellule de déchargement assure la continuité du second système de confinement lors de l'ouverture de l'ET. Après déchargement de l'ET et jusqu'à la mise en conteneur de stockage (déchets HA), ou jusqu'à la mise en hotte (déchets MA-VL), les parois de génie civil des locaux dans lesquels les colis circulent, y compris les traversées et les équipements passifs du réseau de ventilation, constituent le second système de confinement statique. L'IRSN note en particulier que les dispositifs d'accostage des ET et des hottes MA-VL sont classés EIP avec une exigence d'étanchéité en fonctionnement normal (exigence de limite de taux de fuite compatible avec les cascades de dépression des locaux de classes différentes) et en cas de chute. Ensuite, le second système de confinement est assuré par la hotte de transfert MA-VL jusqu'à son accostage à l'alvéole. Une fois que les colis de stockage MA-VL sont mis en alvéole, les parois de génie civil des alvéoles MA-VL, y compris les traversées et les équipements passifs du réseau de ventilation, constituent le second système de confinement statique. Pour rappel (cf. *supra*), l'Andra ne retient pas de deuxième système de confinement pour les déchets HA lorsque le colis de stockage a été confectionné (colis primaire mis en conteneur, couvercle soudé).

⁴¹ Les conteneurs de stockage renforcés disposent d'un liant de clavage injecté à l'interface entre le corps du conteneur et son couvercle.

Dispositifs d'accostage

Plusieurs dispositifs d'accostage assurent la continuité du second système de confinement :

- le dispositif d'accostage des ET dans la cellule de déchargement ;
- le dispositif d'accostage des hottes de transfert MA-VL dans la cellule de mise en hotte MA-VL ;
- le dispositif d'accostage des hottes de transfert MA-VL dans la cellule de manutention (alvéole MA-VL).

Le dispositif d'accostage des ET, situé entre la cellule d'accostage des ET (classe de confinement C2 au sens de la norme NF ISO 17873) et la cellule de déchargement (classe de confinement C4**), comprend notamment une bride d'accostage munie de joints statiques, qui permet d'assurer la continuité du second système de confinement. Des contrôles d'étanchéité en configuration repliée (dispositif d'accostage des ET fermé) et non repliée (dispositif d'accostage ouvert avec un emballage fictif accosté) sont prévus par l'Andra à la mise en service de l'installation afin de s'assurer que le taux de fuite de la façade d'accostage est inférieur à 10^{-1} h^{-1} (classe 4 suivant la norme NF ISO 10648-2), puis des contrôles réguliers seront réalisés suivant une périodicité à définir, afin notamment d'observer l'état des joints. De plus, un éventuel défaut de l'étanchéité de l'accostage sera signalé par des capteurs détectant un défaut de positionnement, et par la surveillance des cascades de dépression entre la cellule d'accostage et la cellule de déchargement (cf. chapitre 4.2.2.3 ci-après). Après le déchargement de l'ET, les bouchons des cellules, équipés de joints garantissant la continuité du confinement statique de la cellule, sont remis en place. **L'IRSN considère que, dans leurs principes, les dispositions d'accostage des ET permettent le maintien du second système de confinement statique. Il appartiendra toutefois à l'Andra de préciser les contrôles prévus permettant de s'assurer du maintien de l'étanchéité des cellules à la suite de la remise en place des bouchons.**

Deux dispositifs d'accostage des hottes MA-VL identiques sont situés, d'une part dans le bâtiment EP1 (entre la cellule de mise en hotte et le parc à hottes), d'autre part dans les ouvrages souterrains (entre la galerie d'accès et la cellule de manutention de l'alvéole). La continuité du confinement lors de l'accostage et du désaccostage des hottes est garantie par la présence de joints gonflables entre la hotte et la façade d'accostage. Afin d'estimer les performances d'étanchéité requises par les joints pour garantir l'absence de contamination hors des alvéoles (notamment dans la galerie d'accès) en cas de surpression dans ceux-ci, l'Andra a étudié le cas d'un incendie dans ces alvéoles. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué retenir pour la paroi d'accostage⁴² un débit de fuite vers la galerie d'accès de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ en situation d'incendie dans l'alvéole de stockage⁴³. L'Andra précise par ailleurs que les performances d'étanchéité de la paroi d'accostage, liées au respect de critères d'étanchéité⁴⁴ et au débit de fuite en situation d'incendie ($50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), permettront de limiter le taux de transfert d'activité vers la galerie d'accès à 10 % en situation d'incendie. L'Andra prévoit des essais de qualification pour confirmer ces performances. L'IRSN souligne que la démonstration de l'atteinte de ces performances (notamment, taux de transfert de 10 % en situation d'incendie dans l'alvéole MA-VL) est d'autant plus importante que le respect de la classe de confinement de la galerie d'accès MA-VL (C1, sans filtration avant rejet à l'environnement) repose principalement sur ce taux de transfert. La surveillance de l'étanchéité des parois d'accostage est réalisée par la mesure en continu de la pression du réseau d'air comprimé qui maintient en pression les joints gonflables. En cas de perte de l'alimentation en air comprimé, l'Andra prévoit de mettre en place un système portatif, dimensionné pour réalimenter et assurer un maintien en pression des joints pendant six heures. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué prévoir également une maintenance et un changement périodique des joints gonflables avec contrôles visuels et tests des joints sous pression. **Ces dispositions n'appellent pas de commentaire particulier de la part de l'IRSN.**

⁴² La paroi d'accostage (cf. chapitre 2.3.2) est composée d'un voile en béton, de la façade d'accostage, des traversées (de ventilation, de câbles, d'utilités fluides) et du sas d'accès personnel à la cellule de manutention.

⁴³ Cette valeur de débit de fuite est associée à une surpression de 1 500 Pa dans l'alvéole.

⁴⁴ Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que la façade d'accostage respecte les critères d'étanchéité de la classe D (au sens de la norme EN 12207) et les traversées de ventilation respectent les critères d'étanchéité de la classe 4 (au sens de la norme EN 1751).

Emballage de transport

En tant que second système de confinement, l'ET doit répondre à des critères d'étanchéité pour s'assurer de son intégrité en toute situation de fonctionnement. L'IRSN note que les ET sont qualifiés à une chute d'une hauteur de 9 m en configuration transport (i.e. avec capots amortisseurs), mais ne le sont plus après retrait des capots amortisseurs. A cet égard, l'Andra prévoit des amortisseurs, classés EIP, aux endroits du hall de déchargement des ET où la hauteur de manutention est supérieure à 1,2 m (hauteur de qualification à la chute des colis primaires), dimensionnés pour réduire l'énergie de chute à une hauteur équivalente de 1,2 m. L'IRSN souligne que cette exigence de dimensionnement est d'autant plus importante que le hall de déchargement des ET est de classe de confinement C1, sans filtration avant rejet. Aussi, **il appartiendra à l'Andra, en vue de la demande de mise en service de Cigéo, de mettre en œuvre un programme de qualification des amortisseurs du hall de déchargement des emballages de transport, afin de s'assurer de leur dimensionnement pour réduire l'énergie de chute à une hauteur équivalente de 1,2 m.**

Hottes MA-VL

La hotte de transfert MA-VL constitue le second système de confinement pendant le transfert des colis MA-VL du bâtiment EP1 à la façade d'accostage de chaque alvéole. Plus précisément, elle assure, dans toutes les situations, une étanchéité aux aérosols radioactifs susceptibles d'être relâchés par le colis et préserve le colis des agressions mécaniques ou thermiques pouvant conduire à la dégradation de son confinement. A cet égard, la hotte de transfert MA-VL dispose d'une enceinte de confinement, classée EIP, dont le taux de fuite est inférieur à 10^{-1} h^{-1} (classe 4 suivant la norme NF ISO 10648-2). L'Andra prévoit de réaliser des essais de qualification du système d'étanchéité de ces hottes afin de s'assurer des performances de confinement, en situations normale, incidentelles et accidentelles (risques d'incendie et de chute) [36]. En outre, l'Andra prévoit la mise en place de deux orifices, protégés par des bouchons étanches, permettant de balayer l'atmosphère de la hotte pour évacuer l'hydrogène de radiolyse potentiellement accumulé en cas d'immobilisation prolongée de la hotte pendant son transfert (voir chapitre 4.3.2). L'IRSN relève que ces orifices constituent des points faibles du confinement. A cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que les essais de qualification des hottes MA-VL, notamment vis-à-vis du confinement, seront réalisés sur un prototype représentatif du concept définitif, muni des orifices. Enfin, concernant la surveillance, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que l'étanchéité des hottes serait contrôlée par des essais, à la réception et périodiquement durant l'exploitation. **L'IRSN considère que, vis-à-vis du confinement, les essais de qualification prévus sur la hotte MA-VL et les contrôles périodiques de son étanchéité durant sa période d'utilisation constituent des éléments favorables quant à l'atteinte des objectifs que s'est fixés l'Andra en termes de maintien de l'étanchéité de la hotte de transfert MA-VL.**

Alvéoles MA-VL

Lorsque le colis MA-VL est en cellule de manutention puis dans la partie utile de l'alvéole, le second système de confinement statique est assuré par l'alvéole (façade d'accostage, génie civil, traversées de parois et équipements passifs de la ventilation). L'ensemble des éléments du second système sont classés EIP au titre de la fonction de confinement des substances radioactives, dont l'exigence définie est de limiter le taux de fuite à l'air des traversées et des ouvrants entre locaux de classes de confinement différentes. **Les dispositions retenues par l'Andra vis-à-vis du confinement statique des alvéoles MA-VL n'appellent pas de remarque de l'IRSN au stade du DDAC.**

4.2.2.3. Confinement dynamique

Le confinement dynamique, assuré par les systèmes de ventilation, complète le second système de confinement statique. Les systèmes de ventilation, distincts et indépendants entre le bâtiment EP1 et l'installation souterraine, sont présentés dans l'Annexe T12.

Dimensionnement des systèmes de ventilation

En application de la norme NF ISO 17873, l'Andra a défini les classes de confinement de l'ensemble des locaux des bâtiments de surface et des ouvrages souterrains, hormis les alvéoles MA-VL, par l'évaluation du niveau de

contamination de chaque local (en nombre de **LDCA**⁴⁵) associé à des scénarios enveloppes de dissémination de substances radioactives d'une part en fonctionnement normal et dégradé, et d'autre part en situations incidentelles/accidentelles. **Cette méthodologie, inchangée depuis le DOS, n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.** Pour les alvéoles MA-VL, l'Andra se fixe un objectif prédéfini à 0,9 LDCA, soit une marge de 10 % par rapport à la limite haute de la classe C2, et fixe les débits de ventilation nécessaires afin d'assurer un taux de renouvellement suffisant pour respecter cet objectif. L'Andra réalise par ailleurs l'évaluation de la classe de confinement des alvéoles en fonctionnement accidentel, confortant le classement C2 fixé en fonctionnement normal. Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.

Concernant les caractéristiques des colis de déchets de l'inventaire de référence retenues pour dimensionner la ventilation, l'Andra retient deux types de spectres radiologiques, selon le scénario de dissémination retenu. En situation normale (léchage de la contamination surfacique par la ventilation) ou en situation incidentelle ne conduisant pas à la perte du confinement du colis, le spectre externe, correspondant au niveau de contamination labile des colis⁴⁶, est retenu. Lorsque le colis considéré perd son confinement, le spectre interne du colis est retenu avec une LDCA équivalente propre à chaque type de colis, en fonction de son inventaire radiologique. L'IRSN note que les LDCA équivalentes des spectres ont été calculées en utilisant les doses efficaces par unité d'incorporation (**DPUI**⁴⁷) issues de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 [64]. L'arrêté du 16 novembre 2023 [65], entré en vigueur au 1^{er} janvier 2024, définit de nouvelles DPUI, qui peuvent être plus pénalisantes pour certains radionucléides. **Il appartiendra à l'Andra d'évaluer l'impact des nouvelles DPUI en vigueur sur les niveaux de contamination de l'ensemble des locaux de l'installation Cigéo et *in fine* sur le dimensionnement de la ventilation.**

Les scénarios enveloppes de dissémination de matières retenus par l'Andra en fonctionnement normal et accidentel (cf. Annexe T13) reposent sur des hypothèses qui appellent les commentaires suivants. En premier lieu, l'IRSN note que, pour l'évaluation du nombre de LDCA dans certains locaux du bâtiment EP1 classés C1 sur cette base, les volumes des locaux considérés sont très élevés (par exemple, de l'ordre de 41 700 m³ pour le hall de déchargement des ET). L'IRSN souligne que l'utilisation de volumes importants entraîne une forte dilution de la contamination et peut donc conduire à la sous-estimer. Toutefois, dans le cas présent, des volumes nettement plus faibles ne remettraient pas en cause le classement de ces locaux. Concernant les ouvrages souterrains classés C1, l'IRSN note que l'évaluation des niveaux de contamination en situation accidentelle considère des volumes restreints par rapport à la taille réelle des galeries, ce qui est bien pénalisant. En outre, pour l'évaluation du nombre de LDCA en situation d'incendie dans la descenderie colis et dans la ZSLE, ainsi que pour la situation accidentelle de collision du véhicule transportant des fûts contenant des filtres très haute efficacité (**THE**) usagés dans la descenderie service et dans la galerie de retour d'air MA-VL, l'Andra retient un coefficient de rétention, pour la hotte ou pour le caisson du véhicule de transport des filtres, de 10⁻¹. L'IRSN relève que l'Andra n'a pas justifié ce coefficient de rétention mais estime qu'un coefficient plus élevé ne remettrait pas en cause le classement des locaux. Aussi, bien que les hypothèses sous-jacentes méritent d'être consolidées, **l'IRSN considère que le classement retenu est acceptable.**

Ventilation du bâtiment EP1

S'agissant de l'architecture de la ventilation du bâtiment EP1 (cf. Annexe T12), l'ensemble des équipements des centrales de traitement d'air et des extracteurs de tous les réseaux (C1, C2 et C4**) sont doublés, permettant ainsi d'assurer leur maintenance sans arrêt de la ventilation. Les extracteurs, classés EIP, sont alimentés par des voies électriques redondantes et sont ségrégués au sein d'un même local (paroi séparative coupe-feu entre les ventilateurs), de sorte qu'un ventilateur défaillant ne puisse porter atteinte à un autre [51][55]. Par ailleurs, les

⁴⁵ La limite dérivée de contamination atmosphérique (LDCA) correspond à la concentration dans l'air d'un radionucléide (ou groupe de radionucléides) en Bq/m³ qui, si elle est inhalée pendant une année (2 000 h à raison de 1,2 m³/h), conduit à l'atteinte d'une dose par inhalation de 20 mSv. Le nombre de LDCA correspond au ratio entre une contamination atmosphérique calculée ou mesurée et la LDCA du radionucléide (ou groupe de radionucléides).

⁴⁶ 4 Bq/cm² en β/γ assimilé à du ⁹⁰Sr et 0,4 Bq/cm² en α assimilé à du ²³⁹Pu, soit une LDCA équivalente de 2,84 Bq/m³.

⁴⁷ DPUI : doses efficaces engagées par unité d'incorporation par ingestion et par inhalation, selon le radionucléide, sa forme chimique (incidence sur la clairance pulmonaire et le facteur d'absorption gastro-intestinale), la granulométrie des particules et la cible (travailleur, public avec différentes classes d'âge).

réseaux d'extraction C2 et C4**, classés EIP, assurent une capacité fonctionnelle pendant et après séisme, au même titre que les caissons de filtration du premier niveau de filtration (PNF) et du dernier niveau de filtration (DNF). L'architecture globale de la ventilation nucléaire du bâtiment EP1 et son niveau de redondance, assurant la permanence de la ventilation et de la filtration, **n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Les plages de dépression par rapport à la pression atmosphérique sont comprises entre -40 Pa et -60 Pa pour les locaux classés C1, entre -70 Pa et -110 Pa pour les locaux C2 et entre -120 Pa et -160 Pa pour les locaux C4**. L'IRSN relève que la dépression des locaux C4** est inférieure aux préconisations de la norme NF ISO 17873 (-220 Pa à -300 Pa). Toutefois, étant donné, d'une part qu'aucune contamination n'est attendue en situation normale⁴⁸, d'autre part qu'un écart de pression d'au moins 40 Pa est maintenu entre des zones adjacentes de classification différentes, tel que recommandé par la norme, permettant ainsi de maintenir le sens d'air préférentiel des zones exemptes de contamination (C1) vers les zones présentant un fort potentiel de contamination (C4**), **l'IRSN considère que ces valeurs de dépression sont acceptables.**

Les filtres THE du DNF des réseaux C2 et C4** du bâtiment EP1 sont classés EIP et font l'objet d'un test d'efficacité, dont la périodicité reste à définir. Le coefficient d'épuration⁴⁹ obtenu doit être supérieur ou égal à 1 000 [49]. L'IRSN rappelle la nécessité de vérifier, pour les tests d'efficacité des filtres THE, l'homogénéité de la concentration en uranine⁵⁰ sur l'ensemble de la section de prélèvement en gaine, afin de s'assurer de la représentativité de ces tests. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de réaliser, en amont des tests d'efficacité des filtres THE du DNF du bâtiment EP1, des essais de caractérisation visant à s'assurer de la bonne représentativité des prélèvements effectués en gaine lors de ces tests.** Par ailleurs, l'Andra prévoit le remplacement des filtres THE soit de façon périodique, soit sur l'atteinte d'un critère de perte de charge, ce qui est conforme aux bonnes pratiques.

En situation d'incendie, le pilotage de la ventilation (décrit dans l'Annexe T14) appelle les remarques suivantes. Dans les locaux C1 et C2 non sectorisés vis-à-vis de l'incendie, l'Andra prévoit le maintien du soufflage et de l'extraction ; pour la classe C2, ils sont arrêtés lorsque les seuils de protection des filtres (température, colmatage, fumée) sont atteints. L'IRSN relève que l'Andra n'a à ce stade pas justifié ces choix et considère que le maintien du soufflage, peu courant en INB, est de nature à attiser le feu. A cet égard, **il appartiendra à l'Andra de justifier, pour la demande de mise en service de Cigéo, la conduite de ventilation en situation d'incendie dans les locaux non sectorisés du bâtiment EP1.** En situation d'incendie dans les locaux C2 sectorisés (secteurs de feu ou zones de feu), l'Andra indique que l'extraction est arrêtée par la fermeture automatique des clapets coupe-feu (lorsque présents) sur l'atteinte des seuils limites de protection des filtres du DNF (température, colmatage ou fumées), et les éventuelles fuites sont alors reprises par la ventilation des locaux adjacents du secteur de confinement. Néanmoins, si le DNF impacté par l'incendie est le même que celui du secteur de confinement (par exemple, couloirs de circulation autour du local C2 concerné, appartenant au même secteur de confinement et associés au même DNF), les fuites ne sont plus filtrées. **Pour l'IRSN, le mode commun présenté par le DNF n'est pas acceptable. Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra, au plus tard pour la demande de mise en service de Cigéo, démontrer que le dernier niveau de filtration du bâtiment EP1 conserve les performances requises en cas d'incendie dans les locaux secteurs de feu ou zones de feu de classe de confinement C2, après fermeture des clapets coupe-feu lorsque présents, pour permettre la filtration des fumées reprises par les locaux du secteur de confinement adjacents classés C2.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E23](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

En outre, concernant les situations de dysfonctionnement de la ventilation, l'IRSN relève que l'Andra n'a pas précisé de stratégie de pilotage en cas de perte de la ventilation du réseau C4** uniquement. **L'IRSN considère**

⁴⁸ Le classement C4** est lié à des situations accidentelles de chutes de colis primaires à des hauteurs supérieures à leurs hauteurs de qualification.

⁴⁹ Rapport des concentrations en aérosols en amont et en aval du filtre.

⁵⁰ En France, pour la mesure du coefficient d'épuration des filtres THE, l'aérosol d'essai utilisé est à base d'uranine, conformément à la méthode de mesure décrite dans la norme NF EN ISO 16170.

que l'Andra pourrait détailler, en vue de la demande de mise en service de Cigéo, la conduite de la ventilation en cas de perte totale de la ventilation du réseau C4**.

Ventilation de l'installation souterraine et des liaisons surface-fond

S'agissant de l'architecture de la ventilation de l'installation souterraine et des LSF (cf. Annexe T12), l'IRSN note que l'architecture de la ventilation nucléaire est amenée à évoluer du fait du déploiement progressif de l'installation souterraine (cf. chapitre 2.6). En particulier, les débits de ventilation de soufflage et d'extraction des ouvrages souterrains (hors descenderie) évoluent en fonction du déploiement de l'installation, les usines de soufflage et d'extraction étant conçues pour accueillir les ventilateurs qui seront nécessaires pour assurer le débit le plus important (i.e. période de fonctionnement simultané des quartiers de stockage HA et MA-VL). **L'IRSN convient des débits de ventilation maximaux retenus par l'Andra et estime que les dispositions retenues par l'Andra devraient permettre d'atteindre ces débits maximaux.** Toutefois, l'IRSN souligne la difficulté associée à l'adaptation de ces débits pour retrouver les dépressions nominales à chaque évolution de l'installation, ainsi que l'absence de retour d'expérience relatif à une ventilation nucléaire dans une installation souterraine d'une telle dimension. Dans ce cadre, le basculement de la ventilation associé à l'ouverture⁵¹ d'une nouvelle tranche⁵² est de nature à entraîner des perturbations aérauliques transitoires. L'IRSN note que l'Andra prévoit des essais de maintien des débits de ventilation et des cascades de dépression de la totalité de l'installation après l'ouverture d'une nouvelle tranche, afin de s'assurer des performances aérauliques de la nouvelle tranche et de l'absence d'impact sur le fonctionnement aéraulique de la totalité de l'installation. Toutefois, l'Andra n'a pas détaillé les essais prévus (mise en œuvre et critères de réussite) ou les modélisations en support à la démonstration de sûreté. **Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra, au plus tard pour la demande de mise en service de Cigéo, présenter sa stratégie d'adaptation du dimensionnement de la ventilation d'extraction et de soufflage de l'installation souterraine (dimensionnement des ventilateurs, suffisance des débits, gestion des phases transitoires, etc.), à chaque phase de développement de l'installation souterraine, dans l'objectif de maintenir les plages de dépressions et les taux de renouvellement, ainsi que les essais prévus pour démontrer l'atteinte des performances aérauliques de la totalité de l'installation.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E24](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

En outre, lors de l'ouverture d'une nouvelle tranche, la ventilation des alvéoles MA-VL en exploitation serait coupée le temps de la déconstruction des sas à l'interface zone d'exploitation/zone travaux. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué estimer à deux mois au plus la durée de déconstruction. En cas de dépassement de cette durée, l'Andra prévoit l'arrêt des travaux de déconstruction pour permettre de remettre en fonctionnement la ventilation des alvéoles en exploitation, en lien avec les risques liés aux gaz de radiolyse. L'IRSN observe que ce délai est inférieur au délai d'atteinte d'un taux d'hydrogène de 3 % en fonctionnement accidentel de perte de ventilation (155 jours, cf. chapitre 4.3.2.1 du présent rapport), ce qui est cohérent.

Concernant la redondance des équipements de ventilation, la filtration THE des alvéoles MA-VL est redondée avec deux caissons de filtration complémentaires [66]. Les quatre ventilateurs de soufflage et d'extraction communs aux réseaux C1 et C2 de l'installation souterraine (hors descenderies), dimensionnés avec une marge leur permettant d'assurer l'ensemble du besoin d'exploitation en cas de perte simultanée de deux ventilateurs, disposent d'un ventilateur de secours et sont ségrégués au sein d'un même local (parois séparatives coupe-feu). Pour la ventilation des descenderies, les ventilateurs sont tous redondés et ségrégués au sein d'un même local (parois séparatives coupe-feu). Par ailleurs, les réseaux d'extraction des locaux C2 de l'installation souterraine (hors descenderies), classés EIP, assurent une capacité fonctionnelle après séisme, au même titre que les caissons de filtration DNF. En outre, en cas de perte de la ventilation, l'Andra a prévu de mettre en œuvre les moyens nécessaires afin de prévenir (redondance et ségrégation physique, alimentation électrique secourue, dimensionnement au séisme et à la chute d'avion, etc.) et le cas échéant de rétablir les performances de la

⁵¹ Réalisation d'essais sur une nouvelle tranche construite et équipée, avant sa mise en exploitation [36].

⁵² Une tranche d'ouvrage est un ensemble de bâtiments de surface et/ou d'ouvrages souterrains, construits dans une même séquence de contrats de travaux. À ce stade, le déploiement du quartier de stockage MA-VL est illustré par trois tranches successives de construction et d'exploitation d'alvéoles MA-VL, sans préjuger des décisions ultérieures qui pourraient être prises [36].

ventilation de l'installation souterraine, en particulier des alvéoles MA-VL, sous un délai maximal de 90 jours en cas de défaillance soit intrinsèque, soit liée à une agression interne ou externe. **Ces éléments n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.** En revanche, l'IRSN note l'absence du classement EIP de l'usine de ventilation d'air frais d'exploitation (soufflage), qui n'est de plus pas dimensionnée à la chute d'avion (cf. chapitre 4.4.4.2 du présent rapport), ce qui pourrait conduire à un délai de remise en service de la ventilation supérieur à 90 jours. A cet égard, l'Andra prévoit des solutions palliatives telles que l'entrée d'air *via* les portes de maintenance du chevalement du puits de soufflage d'air frais d'exploitation ou la tête de descenderie. A ce stade, l'Andra a évalué l'efficacité de ces mesures sur le maintien des débits de ventilation, en particulier vis-à-vis du risque lié aux gaz de radiolyse dans les alvéoles MA-VL (cf. chapitre 4.3.2.1), sur la base de modélisations. **Etant donné le caractère particulier de cette situation, l'IRSN estime que l'Andra devra confirmer, dans un premier temps lors des essais de mise en service puis après chaque ouverture de tranche, l'efficacité des solutions présentées pour pallier la perte de la ventilation de soufflage au regard notamment des débits de ventilation minimaux à maintenir.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E25](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Les alvéoles MA-VL et les cellules de manutention associées, classées C2, présentent une plage de dépression de -40 Pa à -80 Pa par rapport à la pression de la galerie d'accès MA-VL, classée C1 [66]. Les locaux filtration des alvéoles MA-VL, également classés C2, présentent quant à eux une plage de dépression de -60 Pa à -100 Pa par rapport à la pression de la galerie de retour d'air, classée C1. L'IRSN relève que l'Andra compare les plages de dépression des locaux C2 par rapport à des locaux C1 différents ; **il appartiendra à l'Andra de s'assurer que ceci n'engendre pas de risque d'inversion des cascades de dépression.** Bien que le niveau de dépression des alvéoles et des cellules de manutention soit inférieur à la valeur de dépression préconisée par la norme NF ISO 17873 (-80 Pa à -100 Pa pour les locaux C2), l'IRSN convient que les plages de dépression précitées permettent le maintien du sens d'air préférentiel des galeries exemptes de contamination (C1) vers les zones présentant un potentiel de contamination modéré (C2). Aussi, l'IRSN considère que **les valeurs de dépression visées pour ces locaux C2 sont acceptables.** Les autres locaux de l'installation souterraine sont tous classés C1 avec une pression égale à +0 Pa pour les galeries d'accès et de liaisons, les zones d'accostage MA-VL, les sas d'accès aux cellules de manutention et les descenderies, ou en surpression (+20 à +80 Pa) pour les recoupes techniques, les cheminements protégés, les galeries de transbordement et de secours et les refuges. L'IRSN note que les locaux en surpression répondent à une fonction de sécurité des conditions d'ambiance pour la gestion des fumées en cas d'incendie. La plupart des locaux C1 dont la pression est égale à la pression atmosphérique sont adjacents à des locaux C2 ; ainsi, bien que la pression de ces locaux C1 soit inférieure à la valeur préconisée par la norme NF ISO 17873 (dépression de l'ordre de -60 Pa pour la classe C1), le sens d'air préférentiel reste maintenu, d'autant plus que ces locaux en souterrain ne sont pas soumis aux effets du vent⁵³. **Aussi l'IRSN considère ces valeurs de dépression acceptables.**

Les filtres THE du DNF du réseau C2 de l'installation souterraine sont classés EIP avec l'exigence de maintenir l'efficacité de la filtration THE. L'IRSN note que le coefficient d'épuration visé du filtre n'est pas mentionné par l'Andra. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de compléter l'exigence définie associée aux filtres THE du DNF des alvéoles MA-VL en précisant le coefficient d'épuration à atteindre.** De plus, l'IRSN rappelle, comme pour les filtres THE du DNF des réseaux C2 et C4** du bâtiment EP1, l'importance de s'assurer de la représentativité des tests d'efficacité. **Aussi, comme pour le bâtiment EP1, il appartiendra à l'Andra de réaliser, en amont des tests d'efficacité des filtres THE du DNF de l'installation souterraine, des essais de caractérisation visant à s'assurer de la bonne représentativité des prélèvements effectués en gaine lors de ces tests.**

Le pilotage de la ventilation en situation d'incendie dans les ouvrages souterrains ou en cas de dysfonctionnement de la ventilation est décrit dans l'Annexe T14. Le pilotage en situation de dysfonctionnement n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN. S'agissant du pilotage de la ventilation en situation d'incendie, l'Andra indique les actions de pilotage mises en œuvre dans chaque local, sans pour autant préciser les objectifs assignés à ces actions. Par exemple, l'Andra prévoit, dans les descenderies, de mettre les ventilateurs dans un

⁵³ Les valeurs de dépressions préconisées par la norme NF ISO 17873 prennent en compte les effets de la charge au vent.

régime « mode incendie » afin de maintenir la ventilation pour la gestion des fumées. Eu égard aux enjeux de sûreté présentés par le pilotage de la ventilation dans les installations souterraines, en particulier en lien avec la gestion des fumées pour permettre l'intervention (cf. chapitre 4.3.1.4), **l'IRSN considère qu'il appartiendra à l'Andra de préciser les objectifs assignés aux actions de pilotage en situation d'incendie en vue de la demande de mise en service de l'installation.** De manière générale, l'IRSN souligne l'importance de la maîtrise du confinement des colis de stockage en cas d'incendie extérieur à la hotte afin de conserver un niveau de contamination atmosphérique aussi faible que possible, et en tout état de cause inférieur à 1 LDCA, dans les ouvrages souterrains hors alvéoles (descenderies, ZSLE et galeries de liaison et d'accès), classés C1.

4.2.2.4. Surveillance

Les éléments relatifs à la surveillance du second système de confinement statique, en particulier les dispositifs d'accostage, ont été examinés dans le chapitre 4.2.2.2 ci-avant. Le présent chapitre porte en premier lieu sur la surveillance du premier système de confinement statique qui repose, comme au stade du DOS, sur celle de la contamination des colis de stockage et de la contamination atmosphérique des locaux, puis en second lieu sur la surveillance du confinement dynamique de l'installation.

La surveillance des colis est opérée en premier lieu par les contrôles de contamination surfacique réalisés à réception sur les colis primaires HA et MA-VL, puis sur les colis de stockages après confection (cf. chapitre 5.2). Au sein des alvéoles HA, qui ne disposent pas d'exigence de confinement mais contribuent à préserver les colis de stockage HA en les maintenant dans des conditions d'environnement favorables à la maîtrise de la corrosion, l'Andra prévoit de surveiller les conditions d'environnement. Par exemple, dans tous les alvéoles, la température est surveillée en permanence par une fibre optique (cf. chapitre 2.3.1) et la teneur en oxygène ou hydrogène périodiquement par un dispositif de prélèvement dédié. S'agissant de la surveillance de l'atmosphère interne des alvéoles HA (cf. chapitre 4.3.2), l'IRSN souligne toutefois que l'efficacité de tels dispositifs⁵⁴ en conditions d'exploitation (présence de colis entravant la circulation des gaz, dispositif unique situé dans le tube guide, exothermicité des colis, etc.) reste à démontrer à ce stade. Outre l'efficacité de ce dispositif, l'IRSN considère que sa constructibilité et son opérationnalité durant la phase d'exploitation reste également à démontrer pour un alvéole HA de 150 m chargé de colis. Par ailleurs, l'Andra prévoit de surveiller la corrosion des aciers des colis dans un alvéole témoin. Sur ce point, l'IRSN rappelle, comme exprimé au chapitre 3.5.3, que des compléments sont attendus sur la stratégie de surveillance en alvéole témoin. Pour les alvéoles MA-VL, l'Andra prévoit d'assurer un suivi de la température (sondes positionnées dans les gaines de ventilation et fibres optiques en paroi du génie civil) et de l'hygrométrie (capteurs capacitifs situés en sas d'entrée des alvéoles et en gaine d'extraction [38]), et de mettre en œuvre des moyens d'observation de l'état des colis de stockage (dispositif d'inspection mobile en alvéole et suivi de l'état physico-chimique de colis fictifs placés dans l'alvéole témoin (cf. chapitre 3.5.3). L'Andra précise que ce suivi lui permettra d'identifier les premiers symptômes de pathologies pouvant affecter directement le béton et l'acier des colis de stockage MA-VL. L'IRSN convient que la surveillance de la température et de l'hygrométrie dans les alvéoles MA-VL est adaptée au suivi des principaux phénomènes susceptibles de dégrader le premier système de confinement des colis MA-VL (corrosion des aciers et carbonatation des bétons principalement), mais rappelle toutefois (cf. chapitre 3.5.3) que l'Andra s'est engagée au cours de la présente instruction à préciser sa stratégie de surveillance déportée en alvéole témoin MA-VL (engagement 2024-E20, cf. chapitre 3.5.3). A ce titre, l'IRSN souligne l'importance que les colis fictifs placés en alvéole témoins soient représentatifs de l'ensemble des colis de stockage MA-VL (conteneurs de stockage en béton ou en acier, panier de stockage en acier, colis primaire en béton ou en acier mis en stockage direct). En outre, l'IRSN note que des robots d'inspections mobiles en alvéole de stockage sont en cours de développement mais relève que l'Andra n'apporte pas d'élément quant à la faisabilité technique de l'observation de l'état des colis de stockage avec un dispositif mobile, ni sur les paramètres surveillés (par exemple, largeur de fissures dans les colis de stockage en béton ou épaisseur de corrosion pour les colis métalliques). Aussi, **l'IRSN considère qu'au**

⁵⁴ Les prélèvements sont réalisés au moyen d'un tube métallique introduit au travers de la bride et guidé jusqu'au fond de l'alvéole par un fourreau percé et fixé par soudage à chacune des tronçons du chemisage, à l'intrados supérieur.

stade du DDAC, la faisabilité technique du suivi de l'état d'un colis de stockage MA-VL avec un dispositif mobile n'est pas démontrée.

La surveillance de la contamination atmosphérique des locaux est assurée par l'implantation de balises dans les locaux à risques, où peuvent circuler des colis contenant des substances radioactives, ou dans les gaines d'extraction de ces locaux. Ces dispositifs de mesures, classés EIP pour ceux surveillant les locaux classés C2 et C4**, réalisent une surveillance de la contamination atmosphérique en temps réel ou en différé (système d'aspiration sur un filtre ou une cartouche). En particulier, la surveillance de la contamination atmosphérique des cellules du bâtiment EP1 classées C4** et des parties utiles des alvéoles MA-VL classées C2 est assurée par des balises fixes implantées dans les gaines d'extraction de la ventilation en amont des filtres THE du PNF. A ce titre, l'IRSN souligne que les volumes libres importants (de l'ordre de 6 000 m³) des alvéoles MA-VL remplis de colis de stockage contribuent à la dilution de la contamination et que la surveillance mise en place dans les gaines d'extraction pourrait ne pas suffire, selon les seuils d'alarme retenus, à détecter une éventuelle dégradation des colis. **Aussi, il appartiendra à l'Andra, en vue de la demande de mise en service, d'imposer un seuil d'alarme de balise suffisamment bas, et en tout état de cause adapté au volume des alvéoles MA-VL, afin de détecter une éventuelle contamination.** En outre, l'IRSN avait estimé, à l'issue de l'instruction du DOS, qu'en cas de perte de la ventilation, une éventuelle contamination atmosphérique ne pourrait pas être détectée. En réponse, l'Andra précise que les dispositions de surveillance du confinement dynamique des locaux et alvéoles concernés (voir ci-après) permettent de détecter rapidement une éventuelle perte de ventilation et de mettre à l'état sûr l'installation (arrêt des opérations à risque de déconfinement et mise en confinement statique). L'IRSN souligne que, pour ce faire, la surveillance du fonctionnement de la ventilation des locaux concernés doit être réalisée en continu.

Comme au stade du DOS, l'Andra prévoit de réaliser une surveillance du confinement dynamique de l'installation (débits de ventilation et dépression des locaux et ouvrages souterrains). Les équipements constitutifs de la ventilation (filtres, ventilateurs, etc.) sont également surveillés. En particulier, l'état des ventilateurs est surveillé par la présence de capteurs permettant d'identifier une éventuelle défaillance (mesure de la vitesse de rotation, sonde débit et pression, sonde de température, état de marche). Au stade du DDAC, ces éléments n'appellent pas de remarque. **Il appartiendra toutefois à l'Andra, en vue de la demande de mise en service de l'installation, de détailler la surveillance du confinement dynamique, en précisant notamment si la surveillance des paramètres aérauliques est réalisée en continu, ainsi que les seuils d'alarme associés aux divers paramètres (colmatage des filtres, dépression, etc.).** S'agissant des filtres, l'Andra précise que le suivi du colmatage des filtres THE du DNF des alvéoles MA-VL est d'autant plus important que ces filtres sont soumis à un empoussièrement cimentaire. Afin de diminuer cet empoussièrement, un filtre haute activité, pour lequel le suivi du colmatage est également réalisé, est ajouté en amont du filtre THE. Une mesure de température en amont des DNF et un détecteur de fumée en aval sont également prévus. L'IRSN observe que ces dispositions sont similaires à celles mises en œuvre dans d'autres INB et les considère appropriées.

Eu égard à la durée de fonctionnement de Cigéo, l'IRSN souligne qu'il existe un risque lié à la maintenabilité des équipements composant les systèmes de ventilation (gaines, filtres, ventilateurs, etc.). En effet, le vieillissement des équipements, mais aussi les possibles besoins d'adaptation à de nouvelles technologies, pourraient nécessiter le remplacement régulier de certaines pièces. L'IRSN considère ainsi que leur disponibilité et leur possible obsolescence doivent être des points de vigilance pour l'Andra. **Aussi, il appartiendra à l'Andra, en vue de la demande de mise en service de Cigéo, de présenter sa stratégie de maintenabilité, sur toute la période d'exploitation de Cigéo, des équipements de ventilation classés EIP, afin de s'assurer que ces derniers pourront être maintenus ou remplacés, dans l'objectif de prévenir leur vieillissement ou le besoin éventuel de les adapter à de nouvelles technologies.**

Enfin, l'installation Cigéo dispose de deux émissaires situés respectivement en zone descenderie (rejet de l'air des réseaux C2 et C4** du bâtiment EP1) et en zone puits (rejet de l'air du réseau C2 des alvéoles MA-VL). La surveillance des rejets (aérosols et gaz) est réalisée en continu par des dispositifs redondés et secourus électriquement, classés EIP. Au cours de l'expertise, l'Andra a précisé s'assurer de la représentativité des prélèvements en cheminée conformément à la norme NF ISO 2889. A ce titre, l'IRSN rappelle que le déploiement

progressif de l'installation est de nature à entraîner une perturbation des écoulements aérauliques (cf. engagement 2024-E24), y compris ceux rejetés en cheminée. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de s'assurer, lors de changements notables des conditions aérauliques, du caractère représentatif des prélèvements en cheminée.**

4.2.3. Criticité

Le présent chapitre porte sur la prévention du risque de criticité lié aux matières fissiles (**MF**) présentes dans les colis de déchets de l'inventaire de référence. Les éléments relatifs à l'inventaire de réserve (notamment CU) sont traités au chapitre 6.5.2. Les MF présentes dans les colis de déchets de l'inventaire de référence sont de type uranium, plutonium ou mélange uranium/plutonium, principalement sous forme de poudre, de métal ou d'oxydes. Les quantités de MF par colis de l'inventaire de référence sont de l'ordre de quelques grammes à quelques centaines de grammes.

4.2.3.1. Démarche de prévention du risque de criticité

Dans le DDAC [67], l'Andra présente une analyse du risque de criticité pendant la phase d'exploitation, pour les installations de surface et les alvéoles de stockage. Cette analyse vise à démontrer l'absence de risque de criticité et à vérifier que les dispositions de conception et d'exploitation de l'installation sont suffisantes au regard des critères d'admissibilité, représentés par des « facteurs de multiplication effectifs »⁵⁵ (k_{eff}). Un facteur inférieur à 1 traduit une configuration sous-critique (état sûr recherché pour les installations nucléaires hors réacteurs), égal à 1 une configuration critique (état d'équilibre dans un réacteur nucléaire) et supérieur à 1 une configuration sur-critique (accident de criticité). Comme au stade du DOS, ces critères, fixés à 0,95 en situation normale et 0,97 en situation anormale⁵⁶, sont inférieurs à 1 avec une marge suffisante selon l'Andra, toutes incertitudes de calcul comprises, **ce dont l'IRSN convient.**

L'Andra retient généralement, comme au stade du DOS, un mode de contrôle de la criticité par la limitation de la masse de MF associée à la géométrie des colis et/ou à leur disposition dans les locaux de surface et les alvéoles⁵⁷. L'Andra présente dans le DDAC des études de criticité, sur lesquelles s'appuie son analyse, afin de déterminer, pour diverses configurations de colis dans les installations de surface ou en alvéole, les masses de MF conduisant aux critères d'admissibilité susmentionnés, appelées « masses admissibles »⁵⁸ (cf. Annexe T15). Les masses admissibles sont ensuite reprises dans les spécifications préliminaires d'acceptation (cf. chapitre 5.1 du présent rapport), pour la configuration la plus pénalisante pour chaque type de colis primaire. **Cette démarche est satisfaisante sur le principe.**

L'Andra identifie également dans le DDAC les EIP participant à la prévention du risque de criticité et les ED associées [49]. Il s'agit par exemple des amortisseurs des emballages de transport permettant de maintenir les colis primaires en place dans l'emballage en cas de chute, ou des conteneurs de stockage MA-VL et HA dont les dimensions géométriques participent à la démonstration de la prévention du risque de criticité. **L'IRSN observe que la présentation détaillée des EIP et ED associées, qui paraissent exhaustifs concernant la sûreté-criticité, est plus aboutie que ce qui est généralement attendu au stade d'un DDAC.**

4.2.3.2. Hypothèses retenues pour les études de criticité

L'Andra présente dans le DDAC des études de criticité pour la majorité des colis primaires de l'inventaire de référence, qu'ils soient prévus pour un stockage en conteneur ou pour un stockage direct. Pour réaliser ses calculs, l'Andra a regroupé, dans la mesure du possible, les colis primaires et colis de stockage sous des configurations de colis dites « enveloppes », dont la modélisation couvre en principe les caractéristiques

⁵⁵ Le facteur de multiplication effectif correspond, pour une configuration donnée (géométrie, modération, etc.), au ratio entre le nombre de neutrons produits par fission et le nombre de neutrons disparus par absorption ou fuite.

⁵⁶ Terme propre à l'analyse de criticité, équivalent aux situations incidentelles et accidentelles.

⁵⁷ A l'exception des coques et embouts cimentés, pour lesquels les études de criticité considèrent un milieu hétérogène de dimensions infinies constitué d'une matrice de béton renfermant des tubes en zirconium (Zr) dont les parois intérieures sont tapissées d'une épaisseur variable d' UO_2 (non modéré intrinsèquement).

⁵⁸ Pour le cas particulier des coques et embouts cimentés, il s'agit de teneurs en oxyde résiduelles maximales admissibles.

géométriques des différents types de colis. L'Andra exempte d'études de criticité les colis contenant de l'uranium enrichi en ^{235}U à moins de 1 % ou des masses de MF inférieures à 5 g, ce que l'IRSN considère acceptable. En effet, l'uranium enrichi en ^{235}U à moins de 1 % est sous-critique en milieu infini et l'Andra a déterminé le seuil de 5 g sur la base d'une étude considérant des dimensions inférieures ou égales à celles des différents types de conteneurs concernés, afin de favoriser les interactions neutroniques. En tout état de cause, peu de familles de colis primaires sont concernées par ce seuil, et leur masse de MF est de l'ordre de 1 g à 2 g.

Dans ses études de criticité, l'Andra retient les mêmes milieux fissiles de référence (**MFR**) qu'au stade du DOS (majoritairement un mélange homogène ^{239}Pu et CH_2 à l'optimum de modération et, pour quelques colis primaires dont les coques et embouts cimentés, des MFR plus spécifiques, cohérents avec ceux considérés dans les référentiels de sûreté des installations productrices d'Orano La Hague). Les études réalisées par l'Andra couvrent diverses configurations, par exemple un colis primaire isolé ou des réseaux de colis primaires ou de stockage, dans diverses localisations de l'installation (entrepôts tampons dans le bâtiment EP1, alvéoles de stockage, etc.). Dans le cas général, l'IRSN note que la répartition hétérogène de la MF est prise en compte par la modélisation de sphères fissiles décentrées dans les colis et entourées, le cas échéant, de la matrice des colis (béton, verre), qui s'avère plus pénalisante qu'un brouillard d'eau ou qu'une épaisseur d'eau. Pour les colis dans lesquels la MF est supposée répartie de manière homogène (boues, galettes compactées...), les sphères sont modélisées centrées et entourées d'eau (brouillard ou lames d'eau), l'Andra ayant montré au cours de l'instruction que la prise en compte d'eau est enveloppe des matrices réelles (par exemple, de type SEPC-D4⁵⁹). En outre, l'IRSN constate que l'Andra a étudié plusieurs situations anormales, telles que l'incendie (diminution de la teneur en eau dans le béton constituant certaines matrices et conteneurs de stockage, vérification du maintien de la géométrie des conteneurs), la présence de colis chuté ou gerbé dans les zones d'entreposage tampon dans le bâtiment EP1, et la survenue d'un séisme. **Aussi, dans la mesure où les études de criticité réalisées par l'Andra tiennent compte des différentes répartitions possibles de MF, des matrices les plus pénalisantes selon les configurations retenues, et où elles couvrent les situations anormales susceptibles de conduire à une nouvelle répartition des MF, l'IRSN considère que celles-ci sont globalement satisfaisantes.**

Toutefois, l'IRSN relève des incohérences et imprécisions, ainsi que des manques dans les hypothèses retenues par l'Andra, vis-à-vis notamment des données relatives aux masses de MF estimées par les producteurs de déchets, à celles admissibles et aux configurations et hypothèses de calculs associées. Celles-ci concernent notamment :

- des écarts non justifiés entre les masses de MF admissibles retenues comme limites pour certains colis et celles obtenues ou déduites des études, ainsi que des incohérences concernant les masses maximales estimées par les producteurs de déchets (par exemple, la masse de MF maximale dans un colis PIVER est de 176 g selon la note [67] et de 153,3 g selon le rapport préliminaire de sûreté [40]) ;
- des masses admissibles indiquées uniquement pour les configurations les plus pénalisantes en surface ou en alvéole. L'IRSN estime que l'Andra pourrait présenter les masses admissibles obtenues en surface et en alvéole pour l'ensemble des colis, de manière à pouvoir les comparer. En effet, la réactivité dépend à la fois du type de colis primaire et des interactions neutroniques, ces dernières dépendant elles-mêmes des types de configuration (surface ou alvéole) et de conditionnement (stockage direct avec ou sans panier, ou en conteneur de stockage) ;
- des descriptions imprécises et l'absence de justification concernant, par exemple, le caractère homogène ou hétérogène du contenu des colis et la nature des matrices retenues par l'Andra pour ses modélisations (eau, verre ou béton), ainsi que les dimensions des colis enveloppes considérés dans les études de criticité pour les différents types de colis (certaines exigences dimensionnelles spécifiées dans l'analyse sont en réalité moins contraignantes que les dimensions correspondantes considérées dans les études, et pourraient donc conduire à accepter des colis conduisant à des configurations plus réactives que celles étudiées, en supposant les autres hypothèses identiques par ailleurs) ;

⁵⁹ Déchets métalliques et organiques.

- l'absence, dans le DDAC, d'une justification de la qualification des codes de calcul utilisés, usuellement exigée dans le cadre d'une DAC. Des justifications de qualification sont cependant présentées dans les études de criticité de l'Andra, recourant à différents codes de calcul, en s'appuyant parfois sur des choix différents d'expériences critiques représentatives, ce qui n'est pas cohérent lorsque les configurations étudiées sont similaires. Toutefois, l'IRSN estime que les résultats des calculs sont applicables pour les configurations étudiées, sur la base notamment de la représentativité des expériences critiques retenues et des conclusions tirées par l'Andra.

L'IRSN convient que les incohérences et le caractère incomplet de la justification de certaines hypothèses ne sont pas de nature à remettre en cause les conclusions des études présentées au stade du DDAC (cf. chapitre 4.2.3.3). Toutefois, afin de s'affranchir du risque d'utiliser ces éléments, incohérents ou incomplets à ce stade, pour l'élaboration du référentiel de sûreté, **l'IRSN considère que l'Andra devra, dans la prochaine révision du rapport de sûreté de Cigéo, consolider sa méthodologie d'analyse de sûreté-criticité et présenter l'ensemble des hypothèses relatives à la détermination des masses de matière fissile admissibles et leurs justifications.** Ce point fait l'objet de l'**engagement 2024-E26** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant. A ce titre, **il appartiendra à l'Andra de présenter exhaustivement les hypothèses relatives à la répartition homogène ou hétérogène des MF ainsi qu'aux natures de matrices de déchets associées, les masses de MF maximales admissibles à la fois en surface et en alvéole, et de mettre en cohérence les masses de MF présentées dans les différents documents constituant le référentiel de sûreté et les exigences retenues pour la géométrie des conteneurs.**

L'IRSN relève par ailleurs que, pour ce qui concerne les opérations sur les ET, l'Andra a mis en place une analyse spécifique, fondée sur les justifications apportées dans le cadre de la réglementation des transports. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que, par conséquent, les critères d'admissibilité de 0,95 et 0,97 ne sont pas retenus dans ce cas. **Ainsi, il appartiendra à l'Andra de préciser les critères d'admissibilité particuliers retenus pour l'entreposage des ET et les opérations de déchargement d'ET, découlant de la réglementation des transports.**

4.2.3.3. Masses admissibles déterminées

S'agissant des masses admissibles présentées dans le DDAC et déterminées par les études de criticité, l'IRSN relève que celles-ci présentent, pour la plupart des colis de l'inventaire de référence, des marges importantes par rapport aux masses réelles déclarées par les producteurs (voir Annexe T15). A titre d'exemple, il existe des facteurs de 3 à 4 entre les masses maximales déclarées à ce jour par le producteur et les masses admissibles pour les configurations les plus pénalisantes (en surface) pour les colis CSD-C en conteneurs de stockage CS 2.2 et pour les colis CSD-V en conteneurs de stockage CS 14. La marge la plus faible concerne les colis primaires 500 L MI en conteneur de stockage CS 2.3, pour lesquels ce facteur est de 1,12. L'IRSN souligne néanmoins que les masses réelles sont susceptibles d'être réévaluées par les producteurs. Par exemple, le CEA a réévalué depuis le dépôt du DDAC la masse maximale réelle de MF de certains colis 870 L FI à 160 g, contre 133 g indiqués dans le DDAC, sans toutefois dans ce cas que cela ne remette en cause la maîtrise du risque étant donnée la marge importante existante vis-à-vis de la masse admissible pour cette famille de colis (205 g).

Parmi les colis HA, une quinzaine de colis PIVER présentent des masses de MF réelles supérieures à celle admissible déterminée pour l'entreposage tampon dans EP1 des colis de stockage CS 10.1 à 10.4 (176 g contre 120 g). Ces colis PIVER appartiennent à la catégorie de colis dont le conditionnement reste à déterminer. Ils contiennent des solutions de produits de fission vitrifiées et ont été produits dans les années 1970. Le CEA prévoit de regrouper ces colis PIVER (de type I) par deux en étuis en acier inoxydable, constituant le colis primaire à destination de Cigéo. Pour prévenir le risque de criticité, l'Andra envisage plusieurs dispositions particulières, dont le choix sera arrêté à l'issue de la définition du conditionnement définitif des colis PIVER. Ces dispositions consistent à valoriser les épaisseurs des étuis primaires (non pris en compte dans les études de criticité à ce stade), à apparier de manière sélective, en accord avec le CEA, les colis primaires en fonction de leur masse de MF (dans le cas des colis PIVER de type I), ou à garantir l'absence totale de modération extérieure aux colis dans

l'entreposage tampon. L'IRSN souligne que cette dernière disposition implique l'absence de présence humaine (jouant le rôle de modérateur) dans l'entreposage, ainsi que l'interdiction d'usage d'eau en cas d'incendie, ce qui impose des contraintes d'exploitation fortes ; toutefois, l'IRSN convient à ce stade que les autres dispositions (valorisations des étuis primaires et appariement sélectif) sont *a priori* suffisantes pour maîtriser le risque de criticité. **Aussi, l'IRSN encourage l'Andra à retenir des solutions de prévention du risque de criticité pour les colis PIVER basées sur d'autres principes que l'absence totale de modération extérieure aux colis dans l'entreposage tampon des colis de stockage.**

4.2.3.4. Dispositions de contrôle et de surveillance liées au risque de criticité

A réception à Cigéo, les colis primaires sont soumis à divers contrôles (cf. chapitre 5.2 du présent rapport). Pour ce qui concerne la sûreté-criticité, l'Andra ne prévoit à ce stade pas de contrôle dédié, ce qui confère d'après l'IRSN une importance particulière à la fiabilité de la déclaration du producteur de déchets, d'autant plus que la situation de dépassement de la masse de MF admissible ne fait pas partie des situations anormales étudiées pour Cigéo. Ceci conduit l'IRSN à souligner l'importance des missions de contrôle réalisées par l'Andra dans les installations productrices et/ou d'entreposage de déchets, afin de s'assurer des dispositions prises par les producteurs de déchets pour garantir la fiabilité des masses de MF qu'ils déclarent. **Il appartiendra ainsi à l'Andra de s'assurer, lors de l'approbation des familles de colis primaires, que l'ensemble des dispositions associées aux contrôles réalisés par l'Andra chez les producteurs permettent de garantir le respect des exigences de sûreté-criticité relatives aux colis primaires (masses de MF, dimensions minimales et/ou maximales des colis, teneurs en oxyde résiduelles maximales admissibles pour les coques et embouts cimentés, compositions des matrices, répartition *a minima* pseudo-homogène des matières fissiles lorsqu'elle est valorisée dans l'analyse).** A cet égard, l'IRSN souligne que le retour d'expérience, notamment celui de l'installation IECD⁶⁰, montre que de nombreux événements significatifs déclarés sont liés à des dépassements de masses de MF dans des colis de déchets, résultant par exemple d'interventions de conteneurs ou de sous-estimations lors d'anciennes mesures. **Dans la mesure où le dépassement de la masse de MF admissible ne fait pas partie des situations anormales étudiées pour Cigéo, l'IRSN considère que l'Andra devra, dans la prochaine révision du rapport de sûreté de Cigéo, identifier les colis primaires pour lesquels les masses de MF maximales évaluées par les producteurs de déchets et celles autorisées à Cigéo sont proches, quantifier les marges entre les limites autorisées et les masses conduisant à un k_{eff} de 0,97 (en situation anormale de dépassement de ces limites), évaluer la fiabilité des contrôles associés et présenter, si cela s'avère nécessaire, des dispositions de renforcement de ces contrôles. Alternativement, pour les colis primaires concernés, l'Andra pourra également recourir à des hypothèses de modélisation plus réalistes afin d'identifier ces marges.** Ce point fait l'objet de l'**engagement 2024-E27** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Certains colis pourraient par ailleurs être traités via une analyse spécifique. Par exemple, au moins un colis 870 L FI, pour lequel un événement significatif a été déclaré, dépasse la masse admissible fixée par l'Andra. A ce stade, l'acceptation par dérogation de ce colis à Cigéo n'apparaît pas problématique au regard des marges pouvant être valorisées par le producteur et par l'Andra (notamment, s'agissant d'un colis renfermant des fûts compactés, la pseudo-homogénéité de la répartition des MF pourrait être valorisée et conduire à déterminer une masse de MF admissible *a priori* supérieure à la masse de MF présente dans ce colis) ou des dispositions compensatoires existantes, telle que la mise en conteneurs de stockage de colis initialement prévus en stockage direct, afin de les stocker dans une configuration moins pénalisante vis-à-vis de la sûreté-criticité.

S'agissant enfin des dispositions de surveillance, l'Andra prévoit des dispositifs de détection de rayonnements (balises gamma et neutrons dans les installations souterraines et de surface, sondes gamma à haut flux dans les cellules des installations de surface), **ce qui est satisfaisant** étant donné notamment que les sondes gamma à haut flux sont particulièrement appropriées en cas de rayonnements gamma élevés générés par une excursion critique. Par ailleurs, l'Andra ne prévoit pas de système de détection et d'alarme dédié à la détection d'accident de criticité, ce qui avait été jugé acceptable au stade du DOS au regard des risques que présente Cigéo (pas

⁶⁰ Installation d'entreposage et de conditionnement de déchets alpha, située à Marcoule.

d'ouverture de colis, pas de transformation de MF) et des marges prises dans les études de criticité. Pour les mêmes raisons, et sous réserve de la quantification des marges ainsi que de l'éventuel renforcement des contrôles mentionnés ci-avant, **l'IRSN considère acceptable que l'Andra exclue des situations de fonctionnement, pour la phase d'exploitation, la survenue d'un accident de criticité dans le bâtiment EP1 ou dans les alvéoles de stockage.**

4.2.4. Thermique

La réalisation et le maintien de la fonction d'évacuation de la puissance thermique des colis (cf. chapitre 3.2 relatif aux fonctions de sûreté) vise à conserver les propriétés de confinement des colis primaires et à respecter les critères suivants⁶¹, fixés par l'Andra pour assurer le fonctionnement des systèmes et composants qui participent à la démonstration de sûreté en exploitation et après fermeture [51] :

- pour le béton (génie civil, conteneurs MA-VL, etc.), température inférieure à 65°C en fonctionnement normal et dégradé et à 80°C en fonctionnement incidentel et accidentel pendant au plus 10 jours ;
- pour le verre (colis primaires HA), température inférieure à 450°C en fonctionnement normal et à 500°C en fonctionnement incidentel et accidentel ;
- pour l'argilite, température inférieure à 100°C (cible de 90°C pour le dimensionnement) ;
- pour la protection neutronique des hottes HA, température inférieure à 120°C ;
- pour le joint de l'enceinte de confinement des hottes MA-VL, température inférieure à 130°C.

L'IRSN relève que les critères de température retenus par l'Andra pour les composants en béton, la matrice vitreuse et l'argilite sont identiques à ceux retenus au stade du DOS et estime, comme à l'issue de son expertise du DOS, qu'ils sont adaptés à la maîtrise des principaux phénomènes susceptibles de dégrader ces composants (notamment réaction sulfatique interne⁶² pour les bétons, recristallisation du verre) ou aux limites actuelles de connaissances relatives au comportement des radionucléides (argilites). L'IRSN note également que les critères retenus par l'Andra pour la protection neutronique des hottes HA et le joint de l'enceinte de confinement des hottes MA-VL correspondent aux domaines de fonctionnement définis à ce stade pour ces composants. **Ceci est satisfaisant.**

L'Andra indique qu'un risque de dépassement des critères de température existe dans les zones où de nombreux colis sont regroupés (zones d'entreposage tampon, partie utile des alvéoles de stockage) et dans celles présentant un nombre plus limité de colis mais un volume réduit (hottes) [51][68]. Aussi, l'Andra évalue ce risque, sur la base de modélisations thermiques, pour la zone d'entreposage tampon du bâtiment EP1, les hottes HA et MA-VL, et les alvéoles HA et MA-VL, en fonctionnement normal et dégradé ainsi qu'en fonctionnement incidentel et accidentel (températures extérieures extrêmes en surface pour la zone d'entreposage tampon du bâtiment EP1⁶³ ; perte de ventilation au sein de cette zone ou des alvéoles MA-VL ; blocage de la hotte sur une durée infinie). Ces modélisations reposent sur des hypothèses que l'Andra considère pénalisantes concernant notamment la puissance thermique dégagée par les colis et la configuration de ceux-ci. A titre d'illustration, les températures maximales atteintes en fonctionnement normal sont de l'ordre de 45°C dans les bétons (alvéoles MA-VL) et 80°C dans les argilites (autour des alvéoles HA) ; en situation accidentelle de perte de ventilation, elles peuvent atteindre le critère de température pour les bétons après des durées supérieures au délai de remise en service de la ventilation (90 jours). L'Andra conclut de son évaluation que les critères de température sont respectés. En outre, pour les colis MA-VL, l'Andra déduit de ces études les puissances thermiques maximales admissibles pour la mise en stockage, reprises dans les spécifications d'acceptation (cf. chapitre 5.1). Les hypothèses retenues et les calculs réalisés par l'Andra appellent les deux remarques suivantes de la part de l'IRSN. S'agissant de l'hypothèse de température extrême considérée pour la zone d'entreposage tampon du bâtiment EP1, l'IRSN rappelle que l'Andra s'est engagée, au cours de l'instruction du GP1, à justifier la suffisance

⁶¹ Le critère de température associé aux colis de déchets bitumés est examiné au chapitre 4.3.1.5.

⁶² La réaction sulfatique interne correspond à la formation d'ettringite (trisulfo-aluminate de calcium) secondaire du fait de la présence conjointe de sulfates en solution et d'aluminates en phase solide, associée à un cycle de température. En effet, l'ettringite primaire, stable à température ambiante, se décompose au-delà d'un seuil de température proche de 65°C.

⁶³ Les températures dites extrêmes correspondent à des températures extérieures de 42°C sur 7 jours et 47°C sur un jour.

des températures retenues pour sa démonstration de sûreté (engagement 2024-E8). Aussi, **il appartiendra à l'Andra d'intégrer, le cas échéant, les nouvelles températures extrêmes issues des travaux à venir en lien avec cet engagement dans son analyse du risque lié au dégagement thermique dans le bâtiment EP1.** En outre, l'Andra introduit dans son évaluation des contraintes de remplissage pour mieux dissiper la puissance thermique, d'une part au sein des alvéoles MA-VL contenant les colis C1PG^{SP} et CSD-C, en positionnant les colis C1PG^{SP} à spectre ^{108m}Ag en périphérie des nappes et en augmentant la durée de chargement entre deux nappes en vue de tirer bénéfice de la décroissance radioactive, et d'autre part au sein des alvéoles HA1/HA2, en augmentant les espaces intercalaires et en limitant le nombre de colis présentant des puissances thermiques maximales par alvéole. L'IRSN estime que ces règles d'exploitation particulières des alvéoles identifiées par l'Andra concourent à la maîtrise du risque lié au dégagement thermique. Ainsi, **l'IRSN considère que les éléments présentés par l'Andra au stade de la DAC montrent que le risque lié au dégagement thermique est maîtrisé, sous réserve que les règles d'exploitation soient établies sur la base des contraintes de remplissage des alvéoles mises en exergue par les modélisations.**

Pour ce qui concerne la surveillance du dégagement thermique, l'Andra prévoit, comme au stade du DOS, de surveiller la température (bâtiment EP1, alvéoles MA-VL et HA) par exemple par l'implantation de sondes dans les gaines d'extraction de ventilation, de fibres optiques sur la longueur des parties utiles des alvéoles HA et MA-VL ainsi que, pour les alvéoles MA-VL, de capteurs au niveau du revêtement du fond et de l'entrée de la partie utile de l'alvéole. A cet égard, l'IRSN convient que l'implantation de capteurs en paroi des alvéoles permet de suivre de manière relativement précise la température au niveau du génie civil. L'IRSN souligne toutefois que le lien entre la température mesurée en gaine de ventilation et la température atteinte au niveau des cibles (par exemple, béton du génie civil ou des colis) ne peut pas être établie de façon directe (prise en compte des échanges convectifs au sein des locaux, etc.) et peut nécessiter la réalisation de modélisations aérauliques en trois dimensions. Aussi, **l'IRSN estime qu'il appartiendra à l'Andra, en vue de la demande de mise en service de Cigéo, de justifier que les mesures de température réalisées en diverses localisations du bâtiment EP1 et des alvéoles HA et MA-VL permettent de s'assurer, au cours de la phase de fonctionnement de Cigéo, du respect des critères thermiques dans les cibles à protéger (béton du génie civil, verre et béton des colis, argilite du Callovo-oxfordien).** Par ailleurs, l'Andra précise que le débit d'air dans les alvéoles de stockage de colis C1PG^{SP} et CSD-C, pour lesquelles la ventilation joue un rôle essentiel pour la maîtrise du risque thermique⁶⁴, fera l'objet d'un suivi en continu et en temps réel associé à la mise en place d'alarmes, **ce qui est satisfaisant sur le principe.** En outre, l'IRSN note que l'Andra ne précise pas si le suivi de la température des composants des hottes (joints et protection neutronique) sera réalisé, ni, le cas échéant, par quels moyens. A cet égard, **l'IRSN estime que le démonstrateur échelle 1 de hotte de transfert MA-VL que l'Andra prévoit de construire après le dépôt de la DAC [52] pourrait être utilisé pour tester des dispositifs de surveillance de la température des composants de la hotte.**

4.3. Agressions d'origine interne



4.3.1. Incendie

Les risques liés à l'incendie d'origine interne concernent les installations de surface et l'installation souterraine (incluant les LSF). Le présent chapitre porte sur la démarche d'analyse de ces risques retenue par l'Andra (chapitre 4.3.1.1) puis sur les dispositions de protection contre l'incendie prévues à ce stade (chapitres 4.3.1.2 à 4.3.1.4). Les éléments relatifs à la maîtrise des risques liés à l'incendie en alvéole de stockage de colis de déchets bitumés font l'objet du chapitre 4.3.1.5. Enfin, le dimensionnement du génie civil vis-à-vis de sa tenue aux incendies est examiné au chapitre 4.3.1.6.

⁶⁴ La maîtrise du risque de dégagement thermique en alvéoles MA-VL est assurée de manière passive (sans prendre en compte la ventilation) sauf dans le cas des alvéoles de stockage de colis C1PG^{SP} et CSD-C, présentant des puissances thermiques plus importantes, pour lequel la démonstration du respect des critères de température tient compte de la décroissance thermique des colis ainsi que de la ventilation.

4.3.1.1. Démarche d'analyse des risques liés à l'incendie

La démarche d'analyse des risques liés à l'incendie en zone nucléaire retenue par l'Andra consiste à identifier les sources de danger (moyens de manutention et de transfert du process nucléaire, équipements électriques...) et les « cibles » de sûreté (colis de déchets protégés ou non par un conteneur de stockage, une hotte, un emballage de transport, les équipements de manutention des colis, les équipements de ventilation nucléaire...), puis définir et justifier par l'étude de scénarios d'incendie les dispositions de protection contre l'incendie (DPCI). La démarche comporte en outre l'analyse de scénarios d'incendie aggravés consistant à prendre en compte la défaillance la plus défavorable, en termes de conséquences, d'un EIP participant à la protection contre l'incendie.

Situations retenues pour le dimensionnement et situations exclues

Les scénarios d'incendie de dimensionnement et d'extension du dimensionnement étudiés par l'Andra sont présentés en Annexe T16 du présent rapport. Pour l'IRSN, comme indiqué au chapitre 3.3 relatif aux situations de fonctionnement, d'une part les cumuls plausibles d'événements devraient être intégrés dans le domaine des situations accidentelles de dimensionnement et d'autre part, la distinction entre les scénarios de dimensionnement et ceux d'extension du dimensionnement, telle qu'effectuée par l'Andra, repose notamment sur un critère de vraisemblance qui nécessite d'être dûment objectivé.

Ainsi, l'Andra a étudié des situations de cumuls d'événements, en particulier un incendie induit par le séisme de dimensionnement dans l'installation. Dans ce cadre, elle a présenté les dispositions nécessaires à la mise et au maintien à l'état sûr de l'INB pour assurer la gestion d'un incendie post-séisme, les exigences de performance associées, ainsi qu'une étude des conséquences radiologiques d'un tel événement [47], ce qui est acceptable sur le principe. Toutefois, à ce stade, le cumul d'un séisme de dimensionnement et d'un incendie, que l'Andra estime plausible, ne figure pas formellement parmi les situations du dimensionnement présentées dans la version préliminaire du rapport de sûreté [51]. Aussi, **il appartiendra à l'Andra d'inclure, parmi les situations du dimensionnement présentées dans le rapport de sûreté en support à la demande de mise en service de Cigéo, la situation d'un incendie consécutif à un séisme du dimensionnement.** En outre, l'Andra a identifié des scénarios susceptibles de conduire à des rejets massifs, notamment le scénario du séisme extrême, avec ou sans ruine du génie civil [48], aggravé par un incendie induit. Afin d'éviter les incendies induits par un séisme extrême, l'Andra prévoit un dispositif de coupure de l'alimentation électrique des équipements n'assurant pas la maîtrise d'une fonction de sûreté, sur détection d'accélération due au séisme. Selon l'IRSN, bien que l'ensemble des alimentations électriques ne soient pas concernées par cette coupure et que les sources d'ignition possibles à la suite d'un séisme ne se limitent pas à celles d'origine électrique, un tel dispositif de coupure permet bien de réduire les risques de départs de feu d'origine électrique notamment durant le séisme.

Par ailleurs, l'Andra évalue les conséquences radiologiques des scénarios d'incendie du dimensionnement qui intègrent la défaillance d'un système d'extinction comme aggravant. Selon l'Andra, cette défaillance, indépendante de l'événement déclencheur considéré, est la plus défavorable vis-à-vis d'un incendie. Toutefois, l'Andra n'a pas démontré que la défaillance des dispositions d'extinction ou de lutte (dont les systèmes embarqués sur les engins de transfert assurant une protection localisée) est plus défavorable que celle du compartimentage ou de la sectorisation incendie. Les scénarios d'incendie impliquant la défaillance des dispositions de sectorisation sont généralement considérés par l'Andra parmi les scénarios d'extension du dimensionnement. L'IRSN estime pour sa part que la défaillance ou l'indisponibilité de dispositions de compartimentage ou de sectorisation est un événement relativement courant dans une INB. **Ainsi, pour l'IRSN, le classement des scénarios d'incendie avec défaillance de la sectorisation incendie parmi les scénarios d'extension du dimensionnement, au même titre que des scénarios extrêmes de type ECS, ne paraît pas adapté.**

S'agissant des situations exclues (situations physiquement impossibles ou « *extrêmement improbables avec un haut degré de confiance* ») par l'Andra, présentées dans l'Annexe T6, l'IRSN note par exemple que le

déconfinement d'un emballage de transport en cas d'incendie sur le locotracteur⁶⁵ est exclu, en considérant uniquement la qualification des emballages à une température de 800°C pendant une durée de 30 minutes. L'IRSN constate que l'Andra ne retient pas « *la défaillance d'un nombre important de dispositions robustes* » pour justifier l'exclusion de cette situation et qu'ainsi, elle ne respecte pas la règle qu'elle s'est fixée (cf. chapitre 3.3 du présent rapport). Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que l'éloignement entre le locotracteur et l'emballage de transport faisait également l'objet d'une exigence. L'Andra ne présente pas non plus dans la version préliminaire du rapport de sûreté les scénarios d'incendie pouvant résulter de la collision de deux véhicules, comme celle d'un véhicule de maintenance avec un engin de transfert de colis de déchets dans l'ouvrage souterrain. Toutefois, au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué qu'elle allait étudier, parmi les scénarios d'extension du dimensionnement, le cumul d'une collision de véhicules et d'un incendie. **L'IRSN estime pour sa part que ce scénario doit être considéré parmi les situations du dimensionnement**, car les dispositions permettant de prévenir ce risque, notamment des dispositifs anticollisions ou encore la supervision et la géolocalisation des véhicules ne peuvent *a priori* pas pallier les conséquences d'une défaillance humaine. En outre, dans le cadre des études prévues, l'IRSN considère qu'une attention particulière pourrait être portée sur les incendies de véhicules électriques, en particulier au regard des feux de batterie.

Des éléments présentés ci-avant, l'IRSN conclut que l'Andra devra compléter, au plus tard pour la demande de mise en service de Cigéo, sa démonstration de sûreté de l'installation Cigéo pour prendre en compte, dans les situations du dimensionnement relatives à l'incendie, (i) la défaillance du compartimentage ou de la sectorisation incendie et (ii) un incendie consécutif à une collision entre un engin de transfert de colis et un autre type de véhicule. Ces points font l'objet des [engagements 2024-E29](#) et [2024-E30](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que ces engagements sont acceptables sur le principe. Dans ce cadre, **il appartiendra à l'Andra de s'assurer du caractère enveloppe des situations d'incendie retenues pour le dimensionnement de l'installation.**

Démarche d'identification et de qualification des EIP associés à la maîtrise des risques liés à l'incendie

Dans le DDAC, l'Andra définit plusieurs familles d'EIP, parmi lesquelles celle relative à la détection de situations incidentelles et accidentelles [49]. Sont ainsi classés EIP, au titre de la maîtrise du confinement en situation d'incendie :

- les détecteurs incendie et les chaînes de remontée d'alarmes (i) de toutes les zones en surface où sont présents des colis « non protégés », depuis la réception des emballages de transport jusqu'à la mise en hotte des colis, et (ii) de la cellule de manutention de tous les alvéoles MA-VL ainsi que ceux de la partie utile des alvéoles dédiés aux colis de déchets bitumés ;
- le système de mise en sécurité incendie associé à ces zones.

Dans la même logique, nonobstant les exigences définies relatives à la stabilité au feu de certains ouvrages (cf. chapitre 4.3.1.6), l'Andra retient parmi les EIP nécessaires à la mise et au maintien à l'état sûr de l'INB :

- la sectorisation incendie des zones en surface où sont présents des colis non protégés par un emballage de transport ou une hotte ainsi que celle des alvéoles MA-VL ;
- les séparations physiques entre zone d'exploitation (**ZEXP**) et zone travaux (**ZT**) de l'installation souterraine (parois, portes, traversées du sas).

De plus, les conteneurs de stockage et la hotte MA-VL font l'objet d'exigences définies en termes de résistance au feu.

Selon l'IRSN, les dispositions générales de protection contre l'incendie faisant l'objet d'un classement EIP ne devraient pas être limitées aux configurations pour lesquelles les colis de déchets radioactifs sont « non protégés ». À titre d'exemple, dans le cadre d'une démarche de défense en profondeur, la détection des départs de feu dans les meilleurs délais est importante pour la sûreté, notamment dans l'ensemble des locaux ou groupes

⁶⁵ Engin permettant d'acheminer les convois de transport entre l'entrée du terminal ferroviaire et la zone des bâtiments nucléaires, par demi-convois, puis de les transférer dans EP1 en vue de leur déchargement.

de locaux liés à la sûreté et pas uniquement dans les zones où les colis de déchets ne sont pas protégés. L'IRSN rappelle à cet égard que de manière générale, la décision n°2014-DC-0417 de l'ASN [69], dite « décision incendie », requiert que des niveaux de défense successifs soient mis en œuvre pour la maîtrise des risques liés à l'incendie, visant à protéger ou assurer les fonctions de sûreté définies à l'article 3.4 de l'arrêté INB [45]. **À ce titre et bien que le DDAC présente des exigences de conception relatives aux DPCI de l'INB, l'IRSN estime que l'identification de celles en lien avec la sûreté, notamment au titre des niveaux de défense précités, est à consolider.** Par exemple, l'IRSN considère que l'isolement des LSF, le compartimentage des galeries et la sectorisation incendie des locaux techniques en souterrain (cf. chapitre 4.3.1.4 ci-après), de même que les moyens de lutte et de désenfumage en souterrain, sont des DPCI importantes pour garantir la sûreté de l'exploitation de l'INB. **Ainsi, pour l'IRSN, les DPCI de l'ouvrage souterrain classées à ce stade EIP par l'Andra apparaissent insuffisantes.**

En outre, les exigences définies associées aux EIP retenus à ce stade n'apparaissent pas toujours cohérentes avec la démonstration de sûreté. A titre d'exemple, ni la résistance au feu des emballages de transport (cf. chapitre 4.3.1.4) ni la température maximale admissible au niveau des déchets contenus dans un colis primaire en stockage direct (cf. chapitre 5.1.2 relatif aux spécifications d'acceptation) ne sont formellement retenues comme des exigences définies dans la note [49] décrivant les EIP retenus à ce stade, alors que l'Andra les utilise pour exclure du dimensionnement certains événements redoutés liés à un incendie.

Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra, au plus tard pour la demande de mise en service de Cigéo, classer en EIP et définir les ED associées pour :

- **les dispositions valorisées pour la maîtrise des risques liés à l'incendie. Dans ce cadre, l'absence de classement EIP de DPCI de l'ouvrage souterrain et des liaisons surface-fond devra être justifiée ;**
- **l'ensemble des dispositions lui permettant d'exclure du dimensionnement des événements redoutés liés à un incendie.**

Ces points font l'objet de l'**engagement 2024-E31** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est acceptable sur le principe. **Il appartiendra en outre à l'Andra de vérifier le caractère suffisant des exigences de sûreté attribuées aux dispositions permettant d'exclure du dimensionnement, avec un haut degré de confiance, des événements redoutés liés à un incendie.**

Scénarios d'incendie retenus et modélisations en appui à la démonstration de sûreté

L'analyse des risques liés à l'incendie présentée par l'Andra s'appuie en grande partie sur des courbes de feu représentatives des températures atteintes au niveau des cibles en cas d'incendies types, définies pour chaque partie de l'installation selon deux approches [70] :

- des feux dits « conventionnels » correspondant à la courbe de température normalisée ISO 834 pendant 1 h ou 2 h. Cette courbe est notamment utilisée pour la qualification des conteneurs de stockage et des hottes de transfert des colis MA-VL ;
- des feux dits « réels » correspondant aux courbes de l'évolution temporelle de la température, dans une zone de l'installation ou au niveau d'une cible, définies par la modélisation de la combustion des charges calorifiques présentes dans la zone étudiée.

S'agissant de la courbe ISO 834, l'IRSN rappelle qu'il s'agit d'une courbe standard, utilisée par exemple pour qualifier des éléments de sectorisation incendie pendant une durée donnée, dès lors qu'ils sont soumis à des feux qui ne sont pas à cinétique rapide (type feux d'hydrocarbures). **Il appartiendra à l'Andra de démontrer le caractère enveloppe de cette courbe pour les situations dans lesquelles elle l'utilise.** A cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'elle prévoyait de recalibrer certaines simulations de feux réels aux résultats de mesures disponibles (acquises notamment dans le cadre d'essais de tenue au feu de conteneurs de stockage selon la courbe ISO 834, cf. chapitre 4.3.1.4) pour affiner les modèles et vérifier le caractère enveloppe de la courbe ISO de montée en température en fonction du temps lorsque celle-ci est utilisée, **ce qui est satisfaisant sur le plan des principes.**

S'agissant des courbes de feux réels, l'Andra vise en particulier à identifier des situations d'incendie enveloppes en termes d'agression thermique des colis dans les différentes zones de l'installation :

- pour les scénarios d'incendie du dimensionnement, l'Andra retient la courbe de feu réel de l'équipement situé à proximité du colis qu'elle juge pénalisante en termes d'intensité et/ou de durée d'incendie ;
- pour les scénarios d'incendie d'extension du dimensionnement, l'Andra élabore plusieurs courbes de feux réels dont la durée et l'intensité dépendent des équipements impliqués dans l'incendie :
 - une courbe associée à un scénario dit « long » qui maximise la durée du feu et au cours duquel tous les équipements de la zone étudiée prennent feu successivement ;
 - une courbe associée à un scénario dit « court » qui maximise la puissance du feu et au cours duquel tous les équipements de la zone étudiée prennent feu simultanément.

Pour l'IRSN, à l'instar des remarques générales faites précédemment sur la manière de distinguer les situations du dimensionnement de celles classées en extension du dimensionnement par l'Andra, la justification du classement des scénarios dits de « feux réels » en tant que situations d'agression du dimensionnement ou d'extension du dimensionnement, par référence au classement des situations de fonctionnement, est à compléter.

Par exemple, pour l'IRSN, l'étude de scénarios d'incendies « longs » ou « courts » tels que définis par l'Andra s'apparente plus à une étude de sensibilité aux foyers modélisés pour l'étude d'une situation donnée qu'à des situations de fonctionnement distinctes. En particulier, en l'absence de dispositions de protection *ad hoc*, la possible propagation du feu entre équipements constitue le déroulement courant d'un incendie et ne devrait donc pas constituer un scénario d'incendie d'extension du dimensionnement. En outre, la prise en compte « *d'un incendie qui n'aurait pas pu être maîtrisé* », qui relève du troisième niveau de défense défini dans la décision incendie précitée [69], est également attendue dans la démonstration de sûreté. Enfin, l'IRSN rappelle que la prise en compte d'un aggravant relève d'une règle d'étude qui fonde le domaine de dimensionnement de l'installation. Autrement dit, pour l'IRSN, le domaine de dimensionnement devrait permettre la maîtrise de davantage de situations d'incendie. Ainsi, **il appartiendra à l'Andra de justifier la correspondance des situations d'agression résultant des scénarios d'incendie retenus dans la démonstration de sûreté avec la définition des situations du dimensionnement ou d'extension du dimensionnement de l'installation et les objectifs généraux de radioprotection associés.**

Afin d'évaluer le comportement des colis aux effets de l'incendie ou de définir des dispositions de protection de ces colis, l'Andra vise, pour les seuls scénarios d'incendie du dimensionnement, à démontrer que les températures au niveau des déchets contenus dans les colis primaires restent inférieures aux seuils en dessous desquels tout risque de mise en suspension des aérosols est écarté (par exemple, 200°C pour les déchets sans matrice et 400°C pour les déchets enrobés dans un liant hydraulique, cf. chapitre 4.3.1.4 ci-dessous) [51][71]. L'Andra retient alors les scénarios de dimensionnement pour établir les exigences définies des conteneurs de stockage ou les spécifications d'acceptation des colis de déchets en stockage direct [72]. En revanche, à l'exception des colis de déchets bitumés (cf. chapitre 4.3.1.5), les scénarios d'extension du dimensionnement ne sont pas retenus pour qualifier les colis contre les risques d'incendie car une proportion importante de colis est déjà constituée et ils n'ont pas été qualifiés pour maintenir le confinement des substances radioactives qu'ils contiennent en cas d'incendie. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que des dispositions pour protéger ces colis des effets d'un incendie (cf. chapitre 4.3.1.4) et, le cas échéant, des dispositions pour limiter les conséquences d'un relâchement d'une partie des substances radioactives contenues dans le colis sont donc prises en compte dans la conception de l'installation. **Ceci est acceptable dans le principe.**

S'agissant des scénarios de feux réels, les modélisations d'incendie intègrent une augmentation de 20 % des charges calorifiques estimées des équipements impliqués afin de couvrir d'éventuelles dérives des charges calorifiques dans l'installation, **ce qui est satisfaisant.** En revanche, l'Andra considère, par exemple, exclusivement des feux d'armoires électriques dont les portes sont fermées. L'IRSN considère que cette dernière hypothèse n'est pas enveloppe des feux d'armoires possibles.

Par ailleurs, l'IRSN souligne que les données relatives aux charges calorifiques situées à proximité directe des colis constituent des hypothèses majeures dans la démonstration de l'Andra, alors que la conception des équipements correspondants n'est pas complètement connue à ce stade. De manière générale, l'IRSN rappelle que les hypothèses des études de la démonstration de sûreté doivent couvrir la grande diversité des scénarios d'incendies potentiels, pour les différentes phases d'exploitation de l'installation, et que les règles d'étude (données d'entrée, hypothèses...) doivent être adaptées aux incertitudes et aux limites des connaissances des phénomènes mis en jeu. **Ainsi, il appartiendra à l'Andra de s'assurer, au préalable à la demande de mise en service de Cigéo, du caractère enveloppe des scénarios d'incendie retenus pour justifier la maîtrise des risques d'incendie.**

En outre, concernant les modélisations réalisées en appui à la démonstration de sûreté, l'IRSN estime que les outils de modélisation des flux de chaleur et du transfert de chaleur, dont ceux utilisés par l'Andra, sont de manière générale particulièrement sensibles aux paramètres physiques et numériques pris en compte. En effet, certains paramètres physiques, prescrits lors de la simulation, ont d'une part une influence forte sur la valeur quantitative des flux reçus en surface par les colis, et sont d'autre part dépendants de l'incertitude sur les propriétés physico-chimiques de la charge combustible considérée (équipements, câbles, etc.). De même, certains paramètres numériques tels que la taille de maille, le pas de temps ou les schémas numériques ont une influence sur la valeur des flux thermiques calculés en surface des colis, notamment du fait de la nature non-linéaire des transferts radiatifs. **C'est pourquoi l'IRSN estime que l'Andra pourrait, en vue de la demande de mise en service de Cigéo, présenter une validation de la chaîne de calcul (paramètres physiques et numériques, outils...), par exemple par comparaison à des essais, dans les configurations étudiées dans l'objectif de consolider les résultats de son analyse des risques liés à l'incendie.**

S'agissant des incertitudes relatives aux modélisations réalisées, l'Andra a présenté au cours de l'instruction des études de sensibilité relatives à la combustion des engins de manutention ou au comportement au feu des colis dans le bâtiment EP1 ou dans l'ouvrage souterrain. Dans ces études, l'Andra retient des courbes de débit calorifique correspondant à un « feu durci »⁶⁶ et un « feu durci long »⁶⁷ afin d'apprécier la vulnérabilité de différents colis enveloppes⁶⁸ en termes de montée en température sous incendie. Dans ces modélisations, l'Andra retient la défaillance des systèmes d'extinction. Dans l'ouvrage souterrain, les modélisations en cas de feu de référence dans la cellule de manutention des alvéoles MA-VL montrent que les températures atteintes dans les colis primaires en stockage direct avoisinent le seuil de 200°C, critère de vulnérabilité retenu dans cette étude. Ce point est repris dans l'expertise des critères d'acceptation relatifs au comportement des colis primaires en stockage direct en cas d'incendie (cf. chapitre 5.1.2 du présent rapport). Dans le bâtiment EP1, ces calculs montrent en particulier la vulnérabilité des colis de déchets bitumés nus en cas de « feu durci »⁶⁹ ou de « feu durci long » du robot en cellule de contrôle, en cas de défaillance du système d'extinction. La température maximale atteinte dans l'enrobé, de l'ordre de 600°C, dépasse en effet largement le seuil de déclenchement des réactions exothermiques considéré par l'Andra dans sa démonstration (100°C), ce seuil étant atteint au bout d'une minute seulement. L'IRSN souligne en outre la vraisemblance du feu mis en œuvre dans cette étude de sensibilité qui mobilise l'huile des quatre motoréducteurs du bras en cellule de contrôle (plutôt qu'un seul pour le feu de référence). En matière de gestion de la ventilation dans cette situation, l'Andra prévoit le cas échéant le passage en confinement statique afin de préserver le DNF, du fait de la température des gaz chauds au niveau de la bouche d'extraction située en partie haute du local et afin de garantir le bon fonctionnement du système de mousse à haut foisonnement. L'IRSN relève que ce passage en confinement statique, s'il permet de préserver le DNF, pourrait conduire à une accumulation de fumée en cellule résultant de la combustion du bitume. Dans cette situation, le risque d'explosion de ces fumées est à considérer. En tout état de cause, selon l'IRSN, les dispositions résultant de cette étude de sensibilité devraient formellement figurer dans le rapport de sûreté, en

⁶⁶ Modification du feu de référence pour prendre en compte les charges transitoires et des marges de sûreté.

⁶⁷ Augmentation de la durée de l'incendie tout en conservant la charge calorifique totale correspondant au feu durci.

⁶⁸ Le choix des colis enveloppes est notamment basé sur la surface, l'épaisseur, la masse ou le volume des colis de stockage et leur capacité calorifique.

⁶⁹ Les charges calorifiques mises en jeu dans le cadre du scénario durci de la cellule de contrôle C5 correspondent à la mobilisation de 699 MJ (inventaire d'huile des 4 motoréducteurs présents dans la cellule avec propagation de proche en proche) contre 195 MJ pour le scénario de référence (inventaire d'huile d'un seul motoréducteur).

particulier la gestion de la ventilation en cas d'incendie impliquant du bitume et la justification des dispositions de limitation des conséquences dans le bâtiment EP1, incluant une situation de défaillance de la fermeture du clapet coupe-feu sur l'extraction. **Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra justifier, avant la construction du bâtiment EP1, les dispositions permettant de limiter les conséquences en cas d'incendie non maîtrisé rapidement dans une cellule contenant un colis de déchets bitumés dans le bâtiment EP1.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E32](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

4.3.1.2. Prévention des départs de feu

Les principales mesures de prévention des départs de feu sont la limitation et la ségrégation de la charge calorifique, l'utilisation de matériaux, équipements et câbles adaptée à leur classe de réaction au feu ainsi que la limitation voire l'interdiction dans certains cas d'utilisation de produits à cinétique de combustion rapide [51]. **Ces dispositions générales, classiquement mises en œuvre dans les INB, sont satisfaisantes dans le principe.**

4.3.1.3. Détection des départs de feu

L'Andra indique que l'installation est équipée de déclencheurs manuels, de téléphonie conventionnelle ou de sécurité et, dans la partie souterraine, de radiotéléphones portatifs individuels [35][51]. En complément, tous les locaux des installations de surface et l'ensemble des liaisons surface-fond et galeries souterraines sont équipés d'un système de détection automatique d'incendie (DAI) d'ambiance. L'ensemble est piloté par un système de sécurité incendie composé d'un système de détection incendie et d'un système de mise en sécurité incendie. Une détection complémentaire est implantée si besoin dans les armoires électriques du process nucléaire (préparation des colis, transfert et mise en stockage des colis), y compris celles des équipements mobiles (chariots, navettes, pont stockeur) [35].

La technologie de DAI d'ambiance en galeries souterraines et descenderies, prévue à ce stade, est une détection multi ponctuelle de fumées, dont la précision de localisation d'un départ de feu n'est pas indiquée par l'Andra. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de préciser, en vue de la demande de mise en service de Cigéo, les performances de la détection de fumées en galeries souterraines et descenderies, notamment en termes de précision de la localisation des départs de feu.**

Dans le quartier de stockage HA, l'Andra indique qu'une détection d'ambiance est implantée dans la galerie d'accès et dans les principaux équipements nécessaires au transfert et à l'accostage de la hotte ainsi qu'à la mise en alvéole du colis. Dans les alvéoles MA-VL, une détection par thermofusible est mise en place dans les équipements du pont de manutention ou du chariot stockeur, un détecteur de fumée est implanté dans la gaine d'extraction d'air en amont de la filtration THE⁷⁰ et une détection d'ambiance, complétée de moyens vidéo, est installée en ambiance de la cellule de manutention et dans certains équipements de cette cellule. **Ceci n'appelle pas de remarque.**

4.3.1.4. Dispositions de limitation des conséquences d'un incendie

L'Andra indique que les dispositions de limitation des conséquences d'un incendie consistent, d'une part à protéger les colis primaires, notamment au travers de spécifications d'acceptation en termes de résistance au feu ou de protection thermique apportée par les emballages de transport, les conteneurs de stockage ou les hottes, d'autre part à limiter la propagation des effets d'un incendie au sein des installations (sectorisation, désenfumage...).

Emballages de transport, colis et hottes de transfert

S'agissant des emballages de transport, l'Andra indique dans le DDAC [70] que la plupart des ET utilisés, notamment ceux de type B, sont qualifiés pour résister à un incendie (température de 800°C pendant 30 minutes). Par ailleurs, en cas d'incendie d'un locotracteur dans la zone de déchargement des convois de transport, l'Andra considère que le positionnement de l'emballage sur son wagon, ainsi que la mise en place d'un

⁷⁰ Complétant les paramètres usuels de surveillance de la filtration THE (température, colmatage, présence de fumée en aval du filtre).

wagon séparateur entre le locotracteur et le wagon déchargé, assurent un éloignement de plusieurs mètres entre l'emballage et le feu. Ainsi, l'Andra estime que les flux thermiques atteignant l'emballage, dans sa configuration transport, ne remettent pas en cause le confinement des colis qu'il contient. Toutefois, le locotracteur n'étant pas conçu à ce stade du projet, l'Andra n'a pas pu apporter une démonstration complète au cours de l'instruction. **Il appartiendra ainsi à l'Andra de démontrer que les exigences en termes de tenue au feu affectées aux emballages de transport, complétées le cas échéant par les DPCI de l'installation, sont suffisantes pour maîtriser les effets d'un incendie affectant un emballage de transport, quel que soit son type, dans la zone de déchargement des convois de transport.**

S'agissant des colis MA-VL, l'Andra distingue le cas des colis primaires MA-VL en stockage direct, pour lesquels elle définit une spécification d'acceptation relative à leur tenue à une sollicitation thermique (cf. chapitre 5.1.2 du présent rapport), et les colis primaires mis en conteneurs de stockage, pour lesquels la fonction de tenue au feu est portée par les conteneurs de stockage. L'Andra retient deux critères de tenue à l'incendie des conteneurs de stockage MA-VL [41] : les dégradations mécaniques ne doivent pas empêcher la manutention et la température dans les déchets doit respecter des critères de 400°C pour les déchets bloqués ou enrobés dans un liant hydraulique et de 200°C pour les déchets sans matrice. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que les critères de température étaient établis sur la base d'une étude bibliographique relative au comportement des matériaux constituant les déchets. Ainsi, le critère de 200°C pour les déchets sans matrice est défini au regard des températures de pyrolyse des matières organiques. Le critère de 400°C pour les déchets enrobés dans un liant hydraulique correspond à une température à partir de laquelle les dégradations de ce liant commencent à être significatives et à conduire à la remise en suspension d'aérosols. L'IRSN relève que l'Andra indique qu'à partir de 300°C, des dégradations des propriétés des bétons apparaissent, mais restent limitées (écart inférieur à 20 % entre les propriétés à 300°C et à température ambiante) et n'affectent pas la fonction de confinement des aérosols. A cet égard, l'Andra prévoit un programme d'essais visant à confirmer le seuil de 400°C établi sur la base d'une étude bibliographique. Au regard des phénomènes considérés par l'Andra (température de pyrolyse, dégradation des propriétés des bétons), **l'IRSN convient du critère de 200°C pour les déchets sans matrice et estime qu'il appartiendra à l'Andra de confirmer, sur la base des essais prévus, le critère de température à respecter pour les déchets bloqués ou enrobés dans un liant hydraulique.** Pour les conteneurs de stockage MA-VL CS 6 et CS 7 en acier, l'Andra a réalisé des simulations de montée en température suivant la courbe ISO 834 pendant 1 h suivie d'une phase de refroidissement. La température maximale calculée au niveau de l'enveloppe du colis primaire est de l'ordre de 900°C, mais celle dans les déchets ne dépasse pas 200°C, étant donnée la présence d'une enveloppe en béton pour l'ensemble des colis primaires prévus d'être stockés dans les conteneurs en acier (familles CEA-231, CEA-290, CEA-300 et CEA-450). Les déformations plastiques maximales observées ne sont pas de nature, d'après l'Andra, à remettre en cause la fonction de manutention. L'IRSN relève que le critère de température de 400°C est dépassé au niveau des enveloppes des colis primaires, mais pas au niveau des déchets, ce qui est acceptable. Pour les conteneurs de stockage en béton, un essai a été réalisé sur un conteneur de type CS 3, soumis à une montée en température dans un four selon la courbe ISO 834 pendant 1 h suivie d'une phase de refroidissement. Après l'essai, l'Andra a observé un écaillage important du conteneur, avec des éclatements locaux du béton mettant à nu le ferrailage. Toutefois, le conteneur a conservé son intégrité structurale et sa fonction de manutention. Des mesures réalisées par thermocouples montrent que le pic de température à la surface des colis primaires factices est de l'ordre de 60°C. L'Andra conclut ainsi à la tenue au feu des conteneurs de stockage CS 3, dont l'IRSN convient de la représentativité (même épaisseur de béton que l'ensemble des conteneurs de stockage en béton, à l'exception de ceux dédiés aux déchets bitumés, cf. chapitre 4.3.1.5). L'IRSN relève que l'essai a été réalisé sur un conteneur de stockage non clavé. Etant donné que le clavage contribue à limiter l'évacuation de chaleur, l'IRSN estime que l'essai réalisé sur le conteneur CS 3 n'est pas pénalisant vis-à-vis de la température pouvant être atteinte en surface des colis primaires. Toutefois, eu égard à la marge entre 60°C et les critères de températures de 200°C et 400°C, l'IRSN convient que ces éléments tendent à montrer à ce stade la tenue au feu des conteneurs de stockage MA-VL en béton. **Il appartiendra à l'Andra de confirmer ces éléments par un programme de qualification, les conteneurs de stockage MA-VL étant EIP avec notamment l'exigence définie de limiter la température dans les déchets aux seuils précités de 200°C et 400°C [49] lorsqu'exposés aux effets d'un incendie.**

S'agissant des colis HA, l'Andra a réalisé des modélisations afin de confirmer la tenue du confinement et la capacité à manutentionner le colis après un incendie [39]. Deux conteneurs de stockage contenant des colis primaires factices exothermiques ont été soumis à une montée en température suivant la courbe ISO 834. Bien que pour l'un des deux conteneurs (CS 14 destiné au stockage des colis CSD-V exothermiques), la contrainte mécanique maximale modélisée dépasse la valeur admissible de limite d'élasticité de l'acier P285NH en température⁷¹ sur une épaisseur de soudure de 12 mm, l'Andra conclut que les conteneurs de stockage HA remplissent leur fonction de confinement après une sollicitation thermique. L'IRSN convient de ce point, étant donné notamment le caractère *a priori* pénalisant de la courbe ISO 834 retenue au regard des effets des incendies pouvant affecter ces colis et considère que les éléments présentés par l'Andra suggèrent, au stade du DDAC, que la démonstration du maintien du confinement des conteneurs de stockage HA et de leur caractère manutentionnable en cas d'incendie pourra être atteinte pour la demande de mise en service. **Pour cela, il appartiendra à l'Andra de confirmer ces premiers éléments par un programme de qualification. Ce programme pourrait intégrer des essais de tenue au feu des colis de stockage HA exposés à la courbe ISO 834 pendant 1h.**

S'agissant des hottes de transfert HA et MA-VL, l'Andra indique dans le DDAC [51] qu'elles sont dimensionnées pour garantir notamment la protection contre l'incendie en limitant la température dans la hotte et donc dans le colis transféré. A ce stade, l'Andra a réalisé des calculs thermiques qui montrent que les températures atteintes⁷² sur la hotte MA-VL sont majoritairement inférieures aux critères de température retenus pour les essais de résistance au feu selon la courbe ISO (les hottes de transfert MA-VL seront qualifiées coupe-feu 2 h (REI⁷³ 120) [49]). L'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'elle prévoyait de mettre en place une protection passive isolante dans les zones où les critères ne sont pas respectés (face inférieure et pieds de la hotte). **Ceci est satisfaisant dans le principe.** S'agissant des hottes HA, leur structure (pieds, châssis, tourillons) est stable au feu (R 120) par la mise en œuvre de protections thermiques adaptées. En outre, des protections thermiques sont prévues afin de ne pas dépasser 120°C au niveau des matériaux neutrophages de la hotte et de respecter une température maximale de 500°C au niveau du verre des colis HA [51]. Les coffrets électriques de la hotte HA disposent d'une protection thermique et de systèmes d'extinction embarqués. L'IRSN note toutefois qu'à la différence de la hotte MA-VL, la résistance au feu ISO de la hotte HA n'a pas été évaluée à ce stade. La formalisation d'exigences définies permettrait d'apprécier le caractère suffisant de ces dispositions (température à ne pas dépasser au niveau du colis HA ou de la protection neutrophage de la hotte en cas d'incendie à l'extérieur de la hotte). **Aussi, il appartiendra à l'Andra de retenir une exigence définie en termes de température à ne pas dépasser au niveau de la protection neutrophage de la hotte et du colis HA transféré en hotte en cas d'incendie et de démontrer que les DPCI de l'installation sont suffisantes pour la maîtrise des effets d'un incendie affectant une hotte HA.**

Sectorisation incendie et confinement

Dans le DDAC [70], l'Andra indique que des secteurs de feu⁷⁴ (SF) sont notamment définis dans les bâtiments de surface et dans l'installation souterraine pour :

- les zones dans lesquelles les colis ne sont pas protégés par un emballage de transport ou une hotte de transfert. En outre, les SF contenant un inventaire radiologique mobilisable s'inscrivent au sein d'un secteur de confinement (SC) ;

⁷¹ Norme NF EN 10222-4.

⁷² Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que la température maximale dans l'acier est de 164°C (pour un feu ISO 2 heures).

⁷³ « R » (résistance) correspond à la capacité d'un équipement à être stable d'un point de vue mécanique pendant une exposition au feu, « E » (étanchéité) correspond à la capacité d'un équipement ayant une fonction de cloisonnement à être étanche au feu et « I » (isolation) correspond à la capacité d'un équipement d'empêcher le transfert de chaleur. Le chiffre indiqué à la suite correspond à la durée en minutes pendant laquelle les critères R, E et I sont vérifiés dans les conditions spécifiées dans les normes correspondantes.

⁷⁴ Selon la décision ASN 2014-DC0417, un secteur de feu est « un volume délimité par des parois telles qu'un incendie survenant à l'intérieur ne puisse s'étendre à l'extérieur ou qu'un incendie survenant à l'extérieur ne puisse se propager à l'intérieur pendant une durée suffisante pour permettre son extinction ».

- les locaux contenant des substances dangereuses ou des substances radioactives mobilisables par un incendie et susceptibles de conduire à un rejet dans l'environnement. Ces locaux sont, en fonction du niveau des conséquences, entourés ou non de SC ;
- les zones présentant des EIP à protéger des effets d'un incendie ;
- les locaux techniques conventionnels présentant des sources importantes de départ de feu ou contenant un potentiel calorifique mobilisable important.

En outre, l'Andra estime [70] que le recours aux zones de feu⁷⁵ (ZF) est justifié dans le cas de la subdivision de SF dans lesquels sont présentes des séparations physiques délimitant les ZF ou pour certains locaux de grand volume qui ne présentent pas de risque de dissémination de substances radioactives, tels que le hall de déchargement des convois et de réception des emballages, ou le parc à hotte.

Ainsi, le bâtiment EP1 comporte de nombreuses ZF, en particulier les diverses cellules. En général, l'Andra traite en tant que SC (cf. chapitre 4.2.2.3), les zones avant (ZAV) et zones arrière (ZAR) des diverses cellules, pour la plupart des autres locaux adjacents aux cellules ainsi que pour les ZF situées à l'intérieur du SF englobant un bloc de cellules. Pour les scénarios d'incendie du dimensionnement survenant dans une ZF, l'Andra retient un taux de transfert de l'activité remise en suspension vers le SC de 10^{-1} puis valorise le système de filtration de la ventilation du SC (facteur de filtration de 10^{-3}). Pour les scénarios d'incendie comprenant une défaillance de la sectorisation (considérés par l'Andra en extension du dimensionnement), le facteur de rétention des fumées dans le local siège de l'incendie de 10^{-1} n'est pas retenu et l'Andra valorise uniquement la filtration de la ventilation du SC (facteur 10^{-3}). A ce sujet, l'IRSN rappelle que la gestion de la ventilation nucléaire en situation d'incendie est examinée dans le chapitre 4.2.2.3 du présent rapport, relatif à la maîtrise du risque de dissémination.

S'agissant des dispositions de conception des ZF et des SF, l'Andra indique qu'un degré coupe-feu 2 h (EI 120) est requis pour les SF (sauf exceptions) et qu'un degré pare-flamme 60 minutes (E 60) est requis aux limites physiques d'une ZF. De plus, les gaines de ventilation sont équipées, en limite de toutes les SF et de certaines ZF, de clapets coupe-feu restituant le degré de résistance au feu de la paroi qu'elles traversent. L'IRSN relève que les ZF présentent des performances moindres que les SF (par exemple, degré de résistance au feu moindre, simple séparation géographique, absence possible de clapets coupe-feu). L'IRSN rappelle toutefois que les ZF ont un objectif comparable aux SF (éviter la propagation d'un incendie entre l'intérieur et l'extérieur) et estime à cet égard que l'Andra n'a pas justifié que les dispositions de conception des ZF permettaient d'atteindre cet objectif.

Aussi, il appartiendra à l'Andra de compléter sa justification de l'absence de propagation d'un incendie au-delà des frontières des ZF qu'elle a définies.

De plus, l'IRSN souligne qu'il est usuel de concevoir des SF entourés de SC ou, si justifié, des SF dont les parois sont confondues avec celles des SC. Par contre, la présence d'un SC à l'intérieur d'un SF est singulière (les parois de confinement n'étant alors possiblement pas protégées par les parois du secteur de feu en cas d'incendie dans ce dernier). C'est *a priori* le cas pour les SC situés à l'intérieur du SF englobant le bloc de cellules. Par ailleurs, un certain nombre de SF, tels les zones arrière de cellules, contenant des substances radioactives, ne sont pas entourés de SC, mais disposent de parois *a priori* confondues avec celle du SC. Selon l'IRSN, dans ces configurations, l'Andra devrait démontrer l'efficacité de ces SC (article 4.4.27 de la décision relative au rapport de sûreté des INB [54]) ou justifier l'absence de besoin de SC en situation d'incendie. **De manière générale, l'IRSN estime qu'il appartiendra à l'Andra de justifier le maintien des performances des secteurs de confinement du bâtiment EP1 en cas d'incendie.**

S'agissant des scénarios d'incendie dans le bâtiment EP1, l'Andra a consolidé dans le DDAC les justifications lui permettant de ne pas retenir d'incendie impliquant l'intégralité du contenu du colis primaire pénalisant. Elle se base notamment pour cela sur la modélisation des températures atteintes dans divers scénarios d'incendie, qui ne remettent pas en cause, sur la base de seuils de température en fonction des matériaux constitutifs des colis primaires, la première barrière de confinement statique des déchets et sur les conséquences qui se limitent à

⁷⁵ Selon la décision ASN 2014-DC0417, une zone de feu est « un volume délimité par des frontières (séparation géographique ou paroi) telles qu'un incendie survenant à l'intérieur ne puisse s'étendre à l'extérieur ou qu'un incendie survenant à l'extérieur ne puisse se propager à l'intérieur pendant une durée suffisante pour permettre son extinction ».

une remise en suspension de l'activité labile du colis primaire [72]. **Ceci n'appelle pas de remarque particulière de la part de l'IRSN.** L'IRSN rappelle toutefois que les modélisations précitées d'un feu mobilisant l'huile des motoréducteurs du bras en cellule de contrôle conduisent à l'atteinte de température dans l'enrobé des colis de déchets bitumés (600°C) largement supérieure au seuil de déclenchement des réactions exothermiques en leur sein (100°C). Aussi, l'IRSN estime que les conséquences d'un tel feu ne se limitent pas à une remise en suspension de l'activité labile des colis de déchets bitumés. A cet égard, l'Andra a évalué les conséquences radiologiques d'un scénario d'incendie dans le bâtiment EP1, impliquant le déconfinement d'un colis de déchets bitumés.

Désenfumage et compartimentage de l'installation souterraine

L'Andra indique dans le DDAC [73] que les objectifs de la ventilation de désenfumage dans l'installation souterraine (incluant les LSF) sont de permettre aux personnes d'évacuer en sécurité et de faciliter l'intervention des secours pour l'extinction des incendies, tout en limitant la dispersion de substances radioactives ou dangereuses dans l'environnement. L'Andra rappelle également que la conception des systèmes de désenfumage ne doit pas être dissociée de celle des autres DPCI (telles le compartimentage⁷⁶).

S'agissant de l'isolement des liaisons surface-fond en situation d'incendie, l'Andra indique notamment dans son référentiel incendie [73] que les installations de surface sont conçues de manière à ne pas être un agresseur des ouvrages souterrains et de transfert surface-fond, ou des installations support à celles-ci. Ainsi, les interfaces entre les installations de surface et les installations de transfert surface-fond sont isolées par des dispositions constructives *a minima* REI 120. S'agissant du compartimentage des descenderies et des galeries souterraines, l'Andra indique que, en principe, les descenderies et galeries de liaison doivent être divisées en plusieurs compartiments de l'ordre de 800 m de longueur équipés de dispositifs de détection, de désenfumage et d'extinction. Toutefois, l'Andra précise que dans le cas d'une incapacité technique de compartimentage (par exemple, pour la descenderie colis équipée du funiculaire), une dérogation est possible sous réserve de rendre plus robustes les autres lignes de défense incendie.

Les dispositions d'isolement de la partie souterraine en exploitation d'un incendie pouvant survenir en surface et inversement sont détaillées par l'Andra dans le DDAC sans être systématiquement justifiées [70]. Il s'agit par exemple de portes E 60 au niveau de la gare haute du funiculaire, de gaines d'extraction d'air EI 120 dans le bâtiment tête de descenderie, de dispositifs EI 120 entre la descenderie de service et le bâtiment tête de descenderie de service, de portes EI 120 et parois EI 60 au niveau du puits VFE ou encore de la sectorisation incendie de l'usine de ventilation d'air frais d'exploitation. **L'IRSN constate que l'Andra ne prévoit pas d'isoler le puits VVE. Or, l'IRSN considère que, dans des situations accidentelles pouvant conduire à la mise en suspension de l'activité radiologique interne des colis primaires présents en galerie souterraine (cf. chapitre 3.6 du présent rapport), la mise en confinement statique de l'ouvrage souterrain pourrait être nécessaire, éventuellement en ultime recours. En outre, pour les LSF prévues d'être isolées, l'Andra n'a pas justifié à ce stade que les différents degrés de résistance au feu retenus sont suffisants au regard des risques présents et des exigences de son référentiel incendie.**

En outre, les descenderies colis et de service, d'une longueur de l'ordre de 4 km chacune, ne sont ni compartimentées ni munies de systèmes de désenfumage spécifiques (autres que la ventilation d'extraction nominale ascendante des descenderies dont le régime peut être accéléré en situation d'incendie) [70]. L'Andra justifie l'absence de compartimentage des descenderies notamment par leur forte pente (12 %) et la présence du funiculaire dans la descenderie colis, qui compliquent la mise en place de tels dispositifs⁷⁷. Concernant les dispositions compensatoires à l'absence de compartimentage, l'Andra retient notamment [70], en descenderie

⁷⁶ À titre d'exemple, le compartimentage d'une galerie a pour objectif d'empêcher la propagation d'un incendie (flammes, fumées...) d'un compartiment sinistré aux autres compartiments de la galerie.

⁷⁷ Selon l'Andra, des trappes de désenfumage dans un compartiment en pente seraient de faible efficacité, hormis au point haut dudit compartiment qui concentrerait alors les sollicitations thermiques et toxiques, y compris au niveau du cheminement piéton, ce qui n'est pas favorable pour l'évacuation et l'intervention ; du fait de la pente, l'absence de compartimentage permet de maintenir sain et exempt de fumée le dégagement aval (indépendamment de la vitesse du flux d'air nominal de ventilation), ce qui est préférable pour l'évacuation et l'intervention des secours. Un risque de retour de couche de fumée et de saturation par les fumées du compartiment n'est pas exclu dans le cas d'un compartiment fermé en pente, selon le débit de désenfumage mis en œuvre. Un compartimentage serait complexe à intégrer dans un système funiculaire (câbles, galets de guidage, rails).

de service, la limitation de la charge calorifique et la circulation d'un seul engin à la fois et, en descenderie colis, la limitation des charges calorifiques et la possibilité d'accès des forces de sécurité par les recoupes bitubes. Des raccords d'alimentation en eau⁷⁸ sont par ailleurs régulièrement mis en place dans les descenderies afin de faciliter l'établissement des lances incendie à partir des recoupes, tout en limitant le portage de tuyaux dans la pente. De plus, pour la descenderie de service, les stations d'arrêt seront équipées d'un système fixe d'extinction à eau et d'un dispositif d'immobilisation physique du véhicule par rapport à la pente (blocage physique empêchant la dérive du véhicule). Cependant, d'après les simulations réalisées par l'Andra, les secours ne peuvent accéder à la zone sinistrée dans des conditions favorables que depuis la ZSLE, en raison de l'extraction de l'air et des fumées en tête de descenderie de service. Selon l'IRSN, lors d'un incendie dans une descenderie de forte pente⁷⁹ (non compartimentée et non munie d'un système de désenfumage spécifique), l'éventuelle stratification des fumées et sa stabilité influent sur leur propagation, ce qui peut contribuer au développement du feu dans un milieu de plus en plus vicié et chaud, ou à l'inverse, à l'alimentation du foyer en air non-vicié (en présence de convection au voisinage du radier). L'IRSN note que les modélisations présentées par l'Andra au cours de l'instruction n'abordent pas cette problématique. En particulier, l'IRSN considère que le maillage utilisé par l'Andra dans les simulations de propagation d'un incendie dans la longueur des descenderies (mailles cubiques de 50 cm en dehors de la gare haute et la gare basse) ne permet pas de représenter correctement l'écoulement des fumées sous voûte ni les phénomènes de stratification et leur évolution et que l'étude par modélisations d'un incendie dans les descenderies de Cigéo requiert l'usage de modèles numériques spécifiques. **Selon l'IRSN, la justification des DPCI dans les descenderies nécessite des études approfondies, adaptées aux phénomènes aérauliques particuliers induits par l'importante pente, qui n'ont à ce stade pas été présentées par l'Andra. En conclusion, l'IRSN estime que le caractère suffisant des dispositions compensatoires à l'absence de compartimentage et de possibilité de désenfumage spécifique du compartiment en feu associé pour les descenderies, au regard du développement particulier des incendies qui y sont possibles et des spécificités d'intervention, n'est pas suffisamment démontré par l'Andra à ce stade.**

En cas d'incendie dans l'ouvrage souterrain (à l'exception des descenderies), l'air vicié converge, à l'aide de réseaux d'extraction implantés en voûte des galeries, vers le puits VVE afin d'être rejeté par l'usine d'extraction. En outre, l'Andra indique que 3 trappes de désenfumage sont prévues par compartiment, ce qui permet de pallier la défaillance d'une d'entre elles, et les ventilateurs des usines de ventilation sont redondés (cf. chapitre 4.2.2.3). **Ces éléments sont satisfaisants sur le principe.** La conception des galeries en matière de dispositifs de désenfumage demeure cependant très variée : les galeries de liaison, les galeries d'accès aux alvéoles HA et les galeries de retour d'air du quartier MA-VL sont munies de trappes de désenfumage mais pas les recoupes, la galerie dédiée à l'évacuation et au secours du quartier HA, ni certaines voies en ZSLE et les galeries d'accès MA-VL. La mise à l'abri des fumées des personnes dans les différents types de refuges (sas, recoupes borgnes, recoupes bitubes...) fait l'objet de nombreux asservissements impliquant des ventilateurs relais, baies de transfert d'air, surpresseurs et organes d'isolement. Selon l'IRSN, le pilotage en local des dispositifs de désenfumage, en cas de défaillance d'automates ou de reprise manuelle justifiée par des contraintes spécifiques telles que l'évacuation des personnels, paraît complexe. **Aussi, il appartiendra à l'Andra d'élaborer un programme détaillé de qualification des divers systèmes de désenfumage.**

En matière de dispositions architecturales de compartimentage de l'ouvrage souterrain, l'Andra retient notamment le déploiement de bitubes (par exemple, deux descenderies parallèles, deux galeries process parallèles ou une galerie process parallèle à une galerie « évacuation- secours ») avec des recoupes⁸⁰ coupe-feu 2 h entre les tubes espacées d'au plus 400 m, une longueur maximale de 800 m pour le compartimentage coupe-feu 1 h des galeries, l'aménagement de la ZSLE pour permettre l'intervention en présence de fumées dans un

⁷⁸ Orifices de refolement de la colonne en charge.

⁷⁹ La pente des descenderies de Cigéo est de l'ordre de 12 %, contre 2 à 3 % pour les tunnels conventionnels.

⁸⁰ Les recoupes bitubes (par opposition aux recoupes borgnes) sont des ouvrages présents dans l'installation entre les deux descenderies (DSS et DSC puis DSS et DSI), entre les GLI MA-VL nord et sud, entre la GLI HA et la galerie de service évacuation-secours HA, entre la galerie d'accès et la galerie d'évacuation-secours du quartier pilote HA, entre galeries d'accès HA (en extrémité du quartier).

compartiment de cette zone ou encore des sas « écluse⁸¹ » E 60 pour isoler les galeries de liaison et les descenderies de la ZSLE. **L'IRSN considère que le déploiement de bitubes avec des recoups est satisfaisant dans le principe.** S'agissant de la ZSLE, l'Andra n'a toutefois pas présenté, à ce stade, la logique de compartimentage de cette zone, alors que l'architecture de cette zone est complexe (maillage de galeries/plénums à différents niveaux), et que certaines portes de cette zone, normalement fermées pour assurer son compartimentage (par exemple au niveau des sas écluse), peuvent retarder la circulation des secours et entraver le désenfumage des descenderies. **À ce titre, il appartiendra à l'Andra de justifier le compartimentage de la ZSLE, notamment des sas écluse, en lien avec les performances d'intervention et de désenfumage attendues pour l'ouvrage souterrain.**

En outre, l'IRSN constate la grande longueur (de l'ordre de 800 m) de certains compartiments de galeries, notamment dans les galeries d'accès aux alvéoles du quartier de stockage HA et les galeries de liaison du quartier MA-VL et relève que cette longueur pourrait être doublée en cas de défaillance du compartimentage. À ce sujet, les modélisations réalisées par l'Andra visant à évaluer les capacités d'évacuation, d'intervention et la pertinence du compartimentage de l'ouvrage souterrain en exploitation, conduisent pour plusieurs scénarios à des conclusions défavorables pour l'intervention (températures ambiantes et flux thermiques trop importants, opacité et toxicité des fumées). Toutefois, l'IRSN relève que l'Andra n'a pas formellement présenté dans la version préliminaire du rapport de sûreté les dispositions qu'elle retient au vu de ces résultats. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de compléter les mesures correctives tirées des résultats des modélisations, lorsque celles-ci conduisent à identifier des situations défavorables à la gestion de l'intervention, pouvant résulter notamment de l'absence de compartimentage de certaines zones, de la grande taille des compartiments ou de la distance entre recoups. Il appartiendra également à l'Andra d'évaluer les conséquences de la défaillance ou du blocage des portes de compartimentage dans les galeries souterraines.**

Concernant le degré de résistance au feu que se fixe l'Andra (coupe-feu 1 h) pour les portes de compartimentage dans les galeries, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que celui-ci était moindre que pour un SF (coupe-feu 2 h) car, bien que la durée des scénarios de feu réel dans ces zones soit de l'ordre de 90 minutes, les compartiments sont munis d'un système de désenfumage et l'intervention y a lieu dans un délai inférieur à 1 h. L'Andra a toutefois ajouté que le degré de résistance au feu du compartimentage sera adapté aux feux pouvant se produire dans les compartiments. Nonobstant, l'IRSN considère qu'il n'est pas satisfaisant de retenir, pour le compartimentage des galeries, des exigences moindres que celles requises pour un SF sur la base des délais d'intervention, d'autant plus pour une installation neuve. En effet, dans le cadre d'une démarche de défense en profondeur [69], le bon dimensionnement des dispositions de sectorisation et de compartimentage, relevant du troisième niveau de défense contre l'incendie, doit être justifié indépendamment de l'intervention. **Aussi, l'IRSN estime que le degré de résistance au feu des équipements assurant le compartimentage des galeries ne devrait pas être réduit au motif de la présence de moyens de désenfumage ou d'intervention.**

De l'ensemble des éléments présentés ci-avant, l'IRSN conclut que l'Andra devra, avant le début des travaux de creusement :

- **présenter les dispositions d'isolement du puits VVE, en particulier en situation d'incendie pouvant conduire à la mise en suspension de substances radioactives dans l'ouvrage souterrain ;**
- **justifier les dispositions de protection contre l'incendie retenues dans les descenderies, en particulier l'absence de besoin d'un compartimentage et l'efficacité des dispositions compensatoires ;**
- **retenir des dispositions d'isolement des liaisons surface-fond et de compartimentage des galeries dont la résistance au feu est adaptée aux incendies possibles dans ces zones.**

Ces points font l'objet de l'**engagement 2024-E33** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est acceptable.

⁸¹ Sas permettant de maintenir l'isolement entre les galeries souterraines et la ZSLE vis-à-vis de la propagation de fumées. Les portes des sas écluse donnant accès aux plénums de ventilation sont EI 120.

Exigences de stabilité au feu des ouvrages

Le dimensionnement des ouvrages de génie civil pour assurer leur tenue au feu est examiné au chapitre 4.3.1.6 ci-après. Bien que des exigences de conception en matière de stabilité au feu du bâtiment EP1, de l'ouvrage souterrain et des LSF soient présentées dans le DDAC [51], les exigences définies concernant la stabilité au feu ne portent que sur certaines parties de ces ouvrages. À titre d'exemple, seuls les locaux du bâtiment EP1 assurant le confinement statique en cas d'incendie font l'objet d'exigences définies [49]. Or, selon la décision incendie de l'ASN [69], la stabilité au feu des éléments porteurs de la structure des bâtiments ne doit pas mettre en cause la résistance au feu des SF ou ZF qui s'y trouvent. En outre, cette stabilité s'entend pour un incendie se produisant à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, en considérant les interactions éventuelles avec un incendie se développant dans un ouvrage proche. Enfin, les exigences de stabilité des structures doivent être suffisantes pour assurer l'ensemble des fonctions de sûreté nécessaires en cas d'incendie. Selon l'IRSN, les exigences de stabilité au feu des ouvrages devraient faire l'objet d'exigences définies. **Aussi, il appartiendra à l'Andra, pour la mise à jour du rapport de sûreté, de retenir des exigences définies en termes de stabilité au feu pour l'ensemble du bâtiment EP1, de l'ouvrage souterrain et des liaisons surface-fond, en lien avec les fonctions nécessaires à la mise et au maintien dans un état sûr après un incendie.**

Par ailleurs, lorsqu'il est spécifié par l'Andra, le degré de résistance au feu des ouvrages est fixé à 2 h pour un feu suivant la courbe normalisée ISO 834. Or, l'IRSN constate que le scénario d'incendie d'un poids lourd dans la descenderie de service, modélisé par l'Andra, conduit à un dépassement localisé de cette courbe. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que le déclenchement des systèmes d'extinction automatique (sprinklers) en moins de 10 minutes, soit avant l'atteinte de la puissance de feu maximale, permettait de justifier que l'agression thermique restait en deçà de la courbe ISO 834. Cependant, l'IRSN relève que la descenderie de service n'est pas munie de sprinklers qui permettraient une protection en ambiance du volume. En effet, au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que l'extinction automatique prévue dans les descenderies, embarquée sur les véhicules (protection localisée), était complétée par des bouches incendie au niveau des recoupes pour l'intervention des forces de sécurité (FDS). **En tout état de cause, l'IRSN considère que, pour démontrer la stabilité au feu d'un ouvrage neuf, il n'est pas satisfaisant de valoriser des systèmes d'extinction.**

Plus globalement, cette problématique concerne les ouvrages pouvant abriter des engins ou des matières dont la combustion est susceptible de générer une agression thermique supérieure à celle de la courbe ISO 834, comme les feux de camion dans les sas camion du bâtiment EP1. L'IRSN rappelle de plus que la courbe ISO 834 retenue par l'Andra ne permet pas de couvrir le déroulement complet d'un incendie réel (incluant la phase de refroidissement) et ses conséquences eu égard à l'objectif de stabilité. **Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra retenir, avant le début des travaux de creusement et les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, pour la vérification des exigences de résistance au feu des ouvrages de génie civil, des agressions thermiques enveloppes des incendies pouvant s'y produire, notamment au regard des feux d'hydrocarbures.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E34](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Moyens d'intervention et de lutte contre l'incendie

L'Andra indique que l'installation Cigéo sera équipée de deux réseaux incendie indépendants, l'un en zone descenderie et l'autre en zone puits, comportant chacun trois réservoirs d'eau (*a minima* 600 m³ chacun) et trois surpresseurs (avec alimentations électriques normale et secourue). Le réseau de la zone descenderie alimente les systèmes d'extinction des zones nucléaires et conventionnelles des installations de surface, des descenderies et de l'ouvrage souterrain en exploitation. Le réseau de la zone puits alimente les ouvrages de surface de cette zone ainsi que la zone travaux de l'ouvrage souterrain. Selon l'IRSN, afin de limiter les risques d'indisponibilité de moyens d'extinction, bien que ceux-ci soient redondés (cf. chapitre 4.3.6), l'ensemble de l'ouvrage souterrain devrait pouvoir être alimenté en tant que de besoin à partir de chacun des réseaux d'incendie. Ainsi, le réseau prévu pour lutter contre un incendie dans la zone travaux pourrait permettre de lutter contre un incendie dans la zone exploitée, et inversement. À ce sujet, l'IRSN relève qu'en cas d'incendie dans la zone travaux, les conditions d'évacuation ou d'intervention peuvent nécessiter le passage exceptionnel au niveau des sas ZT/ZEXP.

Ainsi, l'IRSN estime que l'Andra pourrait étudier la possibilité de mutualiser, en cas d'indisponibilité de l'un d'entre eux, les réseaux d'incendie des zones puits et descenderies.

Par ailleurs, l'IRSN relève que plusieurs zones, locaux (cellules de manutention des alvéoles MA-VL) ou équipements (engins de manutention et de transfert, armoires électriques sensibles...) sont munis de systèmes fixes d'extinction de divers types en fonction des incendies redoutés. De plus, le sol des cellules, des couloirs de circulation du process, des zones tampons du bâtiment EP1 et des cellules de manutention des alvéoles MA-VL fait office de rétention des effluents. Une rétention est également assurée au pied des descenderies et par compartiment dans les galeries souterraines, par locaux ou groupes de locaux dans les autres installations de surface. **Ces éléments sont satisfaisants dans le principe.**

Concernant l'organisation de lutte contre l'incendie, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'elle se compose :

- de groupes locaux d'intervention du personnel d'exploitation, présents en heures ouvrées dans chaque quartier de l'installation souterraine, chargés de contrôler l'évacuation, la sectorisation et d'utiliser des extincteurs sur feu naissant ;
- de forces de sécurité (FDS) positionnées en permanence en zone puits et en zone descenderies. Sur déclenchement de l'alerte incendie, les FDS réparties sur les deux zones doivent se mobiliser simultanément afin d'atteindre l'effectif attendu sur le lieu du sinistre ;
- du service départemental d'incendie et de secours, lorsque l'incendie n'est pas maîtrisé par les FDS ou qu'un renfort est nécessaire.

S'agissant de l'ouvrage souterrain, l'Andra prévoit la possibilité d'accéder au plus près de la zone sinistrée (hors alvéole) avec les engins d'intervention et d'évacuation de victime, dans un délai de 15 minutes [73]. Pour ce faire, l'Andra retient le concept d'architecture bitubes avec recoupes pour les descenderies et galeries de l'ouvrage, **ce qui est jugé satisfaisant dans le principe.** L'Andra précise par ailleurs que les voies de circulation des FDS doivent rester dégagées en toute circonstance [51]. Ainsi, des règles d'exploitation interdisent par exemple l'entreposage dans les galeries en dehors de zones dédiées, le transfert de hotte en présence de personnel en galerie, la circulation dans les deux sens en descenderie de service et galeries (à l'exception des galeries d'évacuation secours). Selon l'Andra [70], ces règles permettent d'assurer le libre passage pour les engins des FDS. L'IRSN relève que cela nécessite toutefois, dans certaines configurations, de déplacer les chariots de transfert pour libérer l'accès⁸². En outre, l'IRSN considère qu'un incendie en partie souterraine en présence d'engins de maintenance ne peut pas être totalement exclu. De plus, d'après l'IRSN, malgré les règles d'exploitation⁸³ en situation nominale interdisant la circulation simultanée ou le stationnement de deux engins de transfert du process nucléaire dans certaines galeries d'un même quartier de stockage, le risque de blocage des accès pour les FDS existe dans les configurations permises, notamment au niveau des recoupes entre bitubes. À ce sujet, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que, du fait du contact permanent entre le poste central de sécurité (PCS) et la salle de contrôle centralisée (disposant des données de géolocalisation des engins du process nucléaire), le besoin de déplacer un engin pourra être identifié rapidement après l'ordre de départ des FDS et, par conséquent, le temps nécessaire à ce déplacement n'est pas comptabilisé comme un délai supplémentaire dans le délai d'intervention estimé. **Toutefois, l'IRSN estime, en l'absence de données quant aux délais de déplacement en situation d'incendie des engins pouvant faire obstacle à la circulation des FDS, que l'absence de délai supplémentaire à considérer du fait de ce déplacement n'est pas encore démontrée.**

⁸² Cela concerne par exemple l'accès du véhicule incendie depuis la ZSLE jusqu'à la zone en alarme feu dans les galeries de liaison MA-VL [51], qui nécessite de libérer l'accès à la zone en feu en utilisant selon les cas une recoupe. Pour cela, des dispositions sont prises pour qu'un chariot puisse se déplacer après le déclenchement d'une alarme feu et libérer les accès. De même, dans les galeries d'accès aux alvéoles HA, l'accès du véhicule incendie depuis la galerie d'évacuation secours jusqu'à la zone en alarme feu nécessite des contraintes d'exploitation telles qu'un éloignement suffisant entre les équipements présents en même temps dans chaque tube et la possibilité de commander le déplacement d'une navette dans le tube non sinistré. Ces exigences permettent ainsi au véhicule incendie d'emprunter les recoupes pour accéder à la zone en feu.

⁸³ Par exemple, pour le quartier de stockage MA-VL, lorsqu'une hotte est en attente dans GLI nord à une intersection avec une GA MA-VL, la présence d'une hotte en attente dans GLI sud est interdite (et vice versa). Pour le quartier pilote, la galerie évacuation-secours parallèle aux GLI et GA en exploitation est disponible pour intervention. Pour le quartier de stockage HA, par exemple, aux intersections de GLI et GA, la présence de deux hottes en simultanée dans les GA nord et sud est interdite afin de libérer un accès véhicule en toute circonstance.

Par ailleurs, l'Andra indique que les FDS sont composées de 6 équipiers répartis en deux demi-piquets (3 en zone puits et 3 en zone descenderie). Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que, de façon nominale et afin de respecter le délai d'arrivée sur zone de 15 minutes qu'elle s'est fixé, les deux demi-piquets empruntent prioritairement le même chemin pour accéder à l'ouvrage souterrain, à savoir l'ascenseur du puits VFE. Ensuite, l'Andra indique que le premier demi-piquet arrivant sur place engage les actions de levée de doute, de reconnaissance et d'attaque du feu, sans attendre l'arrivée du second si la situation ne met pas en danger le premier demi-piquet. L'Andra considère que la répartition en deux demi-piquets permet d'optimiser le délai entre le déclenchement d'une alarme au PCS et l'arrivée sur les deux zones d'exploitation (bâtiment EP1 et zone d'exploitation de l'ouvrage souterrain). En revanche, pour l'IRSN, la nécessité de réunir systématiquement des équipiers distants de plusieurs kilomètres⁸⁴ pour constituer un piquet n'apparaît pas favorable à une intervention rapide, efficace et sécurisée. **Il appartient donc à l'Andra de justifier, en vue de la demande de mise en service de Cigéo, la suffisance des moyens humains dédiés à l'intervention et à la lutte contre l'incendie au regard des caractéristiques, notamment dimensionnelles, de Cigéo.**

L'Andra indique que l'architecture bitubes avec recoupes de l'ouvrage souterrain permet l'accès du véhicule monocabine des FDS de la ZSLE, où ils sont garés, jusqu'au compartiment sinistré [70]. De plus, un passage de 90 cm de largeur est maintenu en permanence dans les galeries de la zone d'exploitation et les descenderies pour l'évacuation des personnels et l'intervention à pied des FDS. Toutefois, selon l'IRSN, les engins des FDS ne peuvent pas opérer un demi-tour dans les longues galeries non-bitubes et de gabarit limité (2,5 m pour les galeries de retour d'air MA-VL). Pour les galeries bitubes avec recoupes, selon notamment le rayon de braquage des engins ou la largeur libre des galeries, une manœuvre en marche arrière doit être effectuée pour regagner leur position de départ. En outre, en cas d'incendie dans la descenderie colis, l'IRSN note que les recoupes supérieures ne sont pas prévues pour la circulation d'un engin des FDS. De plus, l'Andra ne prévoit pas qu'un engin des FDS emprunte une recoupe pour accéder au plus près du sinistre en descenderies colis. Pour l'IRSN, les difficultés de circulation de ces engins, variables selon les parties de l'ouvrage souterrain, induisent une augmentation des distances à parcourir à pied par les FDS et en conséquence une augmentation du délai d'arrivée des FDS sur la zone sinistrée. **Aussi, l'IRSN estime que la capacité de l'Andra à intervenir rapidement en cas d'incendie dans l'ouvrage souterrain n'est pas encore acquise, au regard notamment des choix d'architecture de l'installation et d'organisation de l'intervention.**

En outre, au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que le délai de 15 minutes pour l'arrivée sur zone des FDS était applicable en configuration T1⁸⁵ de l'ouvrage souterrain. Pour les phases ultérieures de déploiement (cf. chapitre 2.6), notamment l'exploitation du quartier HA, l'IRSN souligne que l'allongement de la distance à parcourir impacte ce délai. S'agissant de ce déploiement, à une échéance temporelle lointaine, l'Andra estime qu'elle disposera alors du retour d'expérience de l'exploitation de la tranche T1 et de nouveaux leviers techniques et organisationnels pour maintenir le délai d'intervention à un niveau satisfaisant. Les pistes envisagées à ce stade portent notamment sur les caractéristiques des engins d'intervention (vitesse) et sur l'étude de l'asservissement à la détection automatique incendie de l'appel prioritaire de l'ascenseur du puits VFE, en particulier en heures non ouvrées d'exploitation. Par ailleurs, l'IRSN souligne que le délai d'arrivée sur la zone sinistrée pour la levée de doute n'est en rien équivalent au délai de mise en œuvre des moyens de lutte contre l'incendie par les équipes au complet, d'autant plus si l'établissement de ces moyens doit dans certains cas se faire à pied sur d'importantes distances. Aussi, l'IRSN estime que l'objectif de délai d'arrivée des FDS « sur zone » devrait correspondre à l'arrivée sur le lieu sinistré le plus éloigné dans l'ouvrage souterrain, non seulement dans sa configuration initiale (T1), mais également à terminaison pour le stockage de l'inventaire de référence, voire en intégrant les quartiers de stockage étendus pour prendre en compte l'inventaire de réserve (cf. chapitre 6.5.2 relatif à l'adaptabilité). A ce stade, l'IRSN note que l'Andra n'a pas défini le point le plus contraignant de l'ouvrage à terminaison à prendre en compte pour l'organisation de la lutte contre l'incendie. En outre, l'IRSN estime que l'éloignement entre les LSF et les alvéoles les plus éloignés présente d'ores et déjà des limites pour l'ouvrage à terminaison au-delà desquelles la lutte contre l'incendie ne peut pas être assurée dans les délais attendus.

⁸⁴ La distance entre la zone puits et la zone descenderie est de l'ordre de 6 km.

⁸⁵ La tranche T1 intègre les ZSL, le quartier pilote HA et quatre alvéoles du quartier MA-VL.

L'Andra n'a par ailleurs pas justifié que les pistes d'optimisation envisagées à ce jour⁸⁶ sont de nature à lever ces limites. Enfin, bien que l'implantation du PCS en zone descendrière soit certes favorable en cas de sinistre dans le bâtiment EP1, l'IRSN souligne que ceci se fait au détriment de celle dans l'ouvrage souterrain (accès par les puits distants de plusieurs km).

Des éléments présentés ci-avant, l'IRSN conclut que l'Andra devra adapter, avant le début des travaux de creusement, l'architecture de certaines parties de l'installation souterraine et des LSF ainsi que les moyens d'intervention afin de permettre, pour toutes les phases d'exploitation prévues, une intervention rapide et efficace en cas d'incendie. Ce point fait l'objet de l'**engagement 2024-35** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est acceptable.

4.3.1.5. Cas spécifique des colis de déchets bitumés en alvéole MA-VL

Les colis de déchets bitumés sont issus du traitement d'effluents radioactifs par ajout de sels de coprécipitation puis bitumage des boues obtenues. Dans l'inventaire de référence de Cigéo, ils sont regroupés en 3 familles de colis de déchets du CEA représentant environ 29 000 colis primaires et 2 familles d'Orano représentant environ 13 000 colis primaires. Les boues bitumées présentent un potentiel de réactions chimiques exothermiques, par réactions d'oxydo-réduction entre sels ou par réactions sel/bitumes, qui peuvent être déclenchées à la suite d'un apport d'énergie thermique externe lié par exemple à une situation d'incendie. L'IRSN rappelle [74] que ce potentiel peut conduire, par emballement des réactions, à une pyrolyse⁸⁷ voire à une inflammation de l'enrobé bitumé. Ce phénomène, s'il n'est pas maîtrisé, est susceptible d'induire une dissémination des radionucléides contenus dans les colis.

A la suite de l'instruction du DOS de Cigéo, l'ASN avait estimé que « *les options de conception retenues [...] ne permettent ni de prévenir ni de limiter les risques à un niveau acceptable en cas de réaction exothermique à l'intérieur d'un colis de déchets bitumés* » [27]. Aussi, l'ASN avait demandé à l'Andra, dans le cas où le stockage en l'état des déchets bitumés serait retenu au stade de la DAC, « *de présenter [...] les modifications de conception pour exclure le risque d'emballement des réactions exothermiques* ».

L'IRSN rappelle avoir convenu que la possibilité de déclencher des réactions exothermiques pouvant conduire à un emballement pouvait être raisonnablement considérée comme très faible en-dessous d'une température de l'ordre de 100°C, pour les compositions d'enrobés bitumés pris en compte dans les études réalisées par le CEA en application de l'article 46 de l'arrêté du 23 février 2017 [75]. Les résultats présentés par le CEA dans ses nouvelles études constituaient ainsi, selon l'IRSN, une base utile à considérer dans la démonstration de sûreté du stockage de ces colis à Cigéo. Toutefois, l'IRSN avait estimé que l'accès à la connaissance détaillée de la composition chimique réelle des colis de déchets bitumés figurant à l'inventaire de Cigéo était très complexe et comportait une part d'incertitude irréductible. Par conséquent, l'IRSN avait souligné que la démarche appliquée par le CEA, aussi pertinente soit-elle, ne pouvait suffire à apporter la démonstration de l'exclusion du risque d'emballement, et qu'il convenait de tenir compte de cette limite méthodologique dans la démonstration de sûreté de Cigéo. En outre, dans le cadre du PNGMDR 2016-2018, l'Andra a présenté de nouvelles dispositions de maîtrise des risques pour le stockage des colis de déchets bitumés, par rapport aux éléments présentés dans le DOS de Cigéo. Dans son étude, l'Andra a considéré des scénarios dits « de référence », consistant en des incendies en cellule de manutention et en partie utile de l'alvéole, et des scénarios dits « extrêmes », consistant en un emballement de réactions exothermiques au sein d'un colis de déchets bitumés. L'IRSN avait conclu que la démarche alors initiée par l'Andra concourrait, en vue du dépôt du DDAC de Cigéo, à améliorer la maîtrise des

⁸⁶ L'Andra a identifié les leviers suivants pour optimiser les délais d'intervention pour les phases ultérieures à la tranche T1 : (i) les caractéristiques des véhicules d'intervention (notamment, vitesse), (ii) l'asservissement à la DAI de l'appel prioritaire de la cabine d'ascenseur du puits VVE, en particulier en heures non ouvrées, (iii) l'augmentation de la vitesse maximale de l'ascenseur, (iv) le recours à des systèmes de déverrouillage rapide des portes des garages des engins des FDS en surface et en souterrain, ou encore de motorisation de l'ouverture/fermeture des portes dans l'ouvrage souterrain, (v) l'amélioration des dispositions permettant le franchissement des sas écluse, (vi) la mutualisation des engins d'intervention de surface et de fond ainsi que le positionnement au plus près de locaux stratégiques pour l'intervention par rapport aux LSF et (vii) l'utilisation de drones de reconnaissance, de robots d'intervention et d'assistants de conduite pour augmenter les vitesses de parcours et, en ultime recours, le positionnement d'équipes au fond.

⁸⁷ Décomposition chimique d'un composé organique par une augmentation importante de sa température, qui peut se produire en l'absence d'oxygène.

risques d'incendie dans les alvéoles dédiés au stockage des colis de déchets bitumés, mais que la démonstration de sûreté n'était pas acquise [74].

Ainsi, sur la base des études du CEA et de l'Andra, et des avis de l'IRSN susmentionnés, l'ASN a considéré que « l'Andra pourra retenir comme base de conception une température seuil de 100°C en peau de colis primaire et une valeur maximale d'énergie de 90 J/g, afin de disposer de marges de sûreté importantes, eu égard à la variabilité de composition des colis de déchets bitumés » [76].

Dans la mesure où que l'Andra ne prévoit pas de stocker de colis de déchets bitumés au cours de la phase industrielle pilote, l'IRSN a estimé [74] que l'Andra devrait présenter dans le DDAC les éléments permettant de se prononcer sur le caractère accessible de la démonstration de la sûreté des options de conception retenues pour le stockage en l'état des colis de déchets bitumés.

Dans le DDAC, l'Andra a retenu une conception pour les alvéoles dédiés au stockage des colis de déchets bitumés qui ne présente pas d'évolution majeure depuis 2019. Afin d'apporter les justifications du respect du critère de 100°C pour des scénarios d'incendie dits de référence et de l'absence de propagation aux colis voisins pour des scénarios extrêmes tenant compte d'un emballage, l'Andra a réalisé des modélisations thermiques de ces scénarios [77]. Les éléments apportés par l'Andra sont examinés ci-après pour les scénarios d'incendie de référence et les scénarios extrêmes d'emballage. Le présent chapitre porte ensuite sur l'évaluation des conséquences radiologiques de l'emballage d'un colis de déchets bitumés et les spécifications préliminaires d'acceptation de ces déchets.

Scénarios d'incendie de référence

Les scénarios d'incendie dits « de référence », considérant l'incendie des équipements prévus en cellule de manutention ou en partie utile des alvéoles de stockage, sont utilisés par l'Andra pour démontrer que la conception des alvéoles permet le respect du critère de 100°C en peau de colis primaire. Plus précisément, l'Andra construit des courbes de débits calorifiques permettant de modéliser l'agression des colis de stockage, sur la base des caractéristiques des équipements prévus à ce stade, suivant des scénarios d'incendie dits « courts » (tous les équipements prennent feu simultanément) ou « longs » (les équipements prennent feu successivement). Le principe de définition des scénarios courts et longs, inchangé depuis 2019 [74], est examiné au chapitre 4.3.1.1 ci-avant. L'IRSN rappelle également que ces scénarios d'incendie intègrent les caractéristiques des équipements prévus à date, et qu'il **appartiendra à l'Andra, le cas échéant, de mettre à jour ces scénarios avec l'évolution des équipements.**

Les alvéoles de stockage dédiés à ces déchets sont équipés de moyens de manutention spécifiques, notamment le pont de manutention polyvalent remplaçant le pont stockeur, afin de pouvoir intervenir en alvéole (retrait de colis, détection, intervention, cf. *infra*).

L'Andra retient des conteneurs de stockage renforcés vis-à-vis de l'incendie : les conteneurs CS 4.1 (4 réservations, pour les colis du CEA) et les conteneurs CS 4.2 (5 réservations, pour les colis d'Orano). Ils présentent une épaisseur minimale de 20 cm (contre 16 cm pour les conteneurs standards) et une formulation du béton dédiée contenant des fibres de polypropylène qui permettent d'améliorer la tenue du béton en cas d'incendie, en prévenant le risque d'éclatement du béton. L'Andra a par ailleurs précisé au cours de l'instruction qu'il n'était pas prévu que les conteneurs de stockage CS 4.1 et CS 4.2 soient clavés.

L'Andra a réalisé des essais de tenue au feu sur un conteneur CS 4.1 et un conteneur CS 4.2, tous deux non clavés, selon les mêmes modalités que pour les conteneurs standards (cf. chapitre 4.3.1.4), à savoir une montée en température dans un four suivant la norme ISO 834 pendant 1 h [41]. Le conteneur CS 4.1 contenait des fûts remplis de boues bitumées non actives, instrumentés par plusieurs thermocouples à diverses localisations (notamment une quinzaine répartis à la surface de chacun des quatre colis primaires, en partie basse du fût, à mi-hauteur et en partie haute du fût). S'agissant du caractère représentatif de la courbe ISO 834, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction ne pas avoir comparé les courbes de feux réels étudiés en cellule de manutention et en alvéole avec la courbe ISO 834. L'Andra souligne en revanche que dans les modélisations d'incendies de référence effectuées (cf. *infra*), les températures maximales atteintes en paroi extérieure des

conteneurs de stockage sont de l'ordre de 330°C, ce qui est nettement inférieur aux températures de l'ordre de 900°C atteintes lors des essais avec la courbe ISO 834. L'IRSN relève par ailleurs que les flux de chaleur auxquels sont soumis les conteneurs de stockage dans le cas des essais de tenue au feu sont supérieurs (de l'ordre d'un facteur 1,5 à 2) aux flux attendus en situation d'incendie de référence. **Etant donnés les écarts de température et de flux constatés, l'IRSN considère que la courbe ISO 834 est appropriée pour étudier la réponse des conteneurs de stockage CS 4.1 et CS 4.2 à un feu pouvant survenir en alvéole de stockage.** Les observations réalisées par l'Andra sur les conteneurs après les essais révèlent un écaillage dans certains angles et quelques fissurations. Toutefois, les conteneurs ont conservé leur intégrité structurale et ont pu être manutentionnés. Ces essais ont permis, d'après l'Andra, de mettre en avant le rôle des fibres de polypropylène, **ce dont l'IRSN convient étant donné l'endommagement observé, plus faible pour les conteneurs CS 4.1 et CS 4.2 que pour le conteneur CS 3 non renforcé vis-à-vis de l'incendie et soumis aux mêmes essais.** Les températures atteintes en surface des colis primaires inactifs (cf. Tableau 3) varient de 61°C au fond de ces colis à 97°C en partie haute.

Tableau 3. Températures maximales atteintes en surface des colis primaires non actifs (sur 4 colis primaires dans le CS 4.1 et 5 colis primaires dans le CS 4.2) [41].

	Couvercle des colis primaires	Partie haute des colis primaires	Mi-hauteur des colis primaires	Partie basse des colis primaires	Fond des colis primaires
CS 4.1 non clavé	87°C	80°C	69°C	69°C	61°C
CS 4.2 non clavé	95°C	97°C	75°C	95°C	69°C (colis 1) 95°C (colis 2)

L'Andra attribue les écarts de température entre les conteneurs CS 4.1 et CS 4.2 aux différences entre les types de conteneurs, tels que le nombre de réservations et les épaisseurs de béton au fond des conteneurs⁸⁸. Par ailleurs, au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que ces écarts étaient également attribués à des défaillances des thermocouples (par exemple, les valeurs de 97°C en partie haute du colis primaire pour le CS 4.2 ou de 95°C en partie basse du colis primaire pour le CS 4.2) et que de nombreux thermocouples implantés se sont avérés défectueux. L'IRSN relève que, pour le conteneur CS 4.1, les marges entre les températures mesurées et le critère de 100°C sont de l'ordre de 10°C à 40°C. En revanche, pour le conteneur CS 4.2, ces marges sont de l'ordre de quelques degrés : plusieurs thermocouples situés en haut ou en bas des colis primaires avoisinent ou dépassent 95°C. L'IRSN souligne que ces faibles marges sont associées à des incertitudes de mesure qui n'ont pas été quantifiées (thermocouples défectueux, différences importantes de température d'un essai à l'autre). Toutefois, eu égard au caractère pénalisant de la courbe ISO 834 vis-à-vis des feux de référence pouvant agresser les colis en alvéole dédié aux déchets bitumés, l'IRSN estime que les résultats présentés par l'Andra tendent à montrer la suffisance de la résistance au feu des conteneurs de stockage pour les scénarios d'incendie de référence étudiés dans le DDAC. **L'IRSN estime cependant qu'il appartiendra à l'Andra de conforter ces premiers résultats lors des essais prévus par l'Andra pour la qualification des conteneurs de stockage renforcés vis-à-vis de l'incendie, classés EIP.** En outre, l'IRSN rappelle [74] le rôle prépondérant porté par les conteneurs de stockage dans la démonstration de l'Andra, ce qui confère à la qualité de la réalisation de chaque conteneur un poids très important. Ceci est d'autant plus important que, pour stocker les colis de déchets bitumés, une dizaine de milliers de conteneurs de stockage devront être produits, sur une longue durée. Aussi, aux incertitudes mentionnées ci-avant liées aux essais, s'ajoutent celles relatives à d'éventuelles difficultés du maintien de la qualité des conteneurs de stockage (par exemple, changement des matières premières ou des formulations, défaillances de procédures liées au contrôle qualité des colis).

L'Andra a réalisé des simulations numériques des scénarios d'incendie de référence afin d'estimer les températures atteintes au niveau des colis primaires. D'après les modélisations de l'Andra, réalisées sans considérer les moyens d'extinction disponibles, la température en peau de colis primaire contenu dans un conteneur de stockage atteint une température maximale de l'ordre de 50°C au bout d'une quinzaine d'heures.

⁸⁸ Etant donnés les différences de dimensions entre les colis du CEA et d'Orano, et afin d'obtenir des conteneurs CS 4.1 et CS 4.2 de mêmes dimensions externes, les épaisseurs de béton au fond des conteneurs sont respectivement de 20 cm et 31 cm.

L'IRSN rappelle (cf. chapitre 4.3.1.1) que les outils de modélisation utilisés par l'Andra sont particulièrement sensibles aux paramètres physiques (fraction radiative, coefficient d'échanges convectifs, émissivité de surface...) et numériques (taille de maille, pas de temps...) pris en compte et relève à ce titre que l'Andra n'a pas réalisé d'études de sensibilité des températures atteintes en peau de colis primaires vis-à-vis des différents paramètres physiques et numériques de modélisation. C'est pourquoi **l'IRSN estime que l'Andra pourrait, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de Cigéo, d'une part présenter une validation de la chaîne de calcul dans les configurations étudiées afin d'étayer la validité des modélisations justifiant le respect du seuil de 100°C, et d'autre part étudier la sensibilité de ses modélisations, notamment aux paramètres précités et en intégrant l'ensemble des incertitudes existantes (défaillance de la qualité des conteneurs de stockage, évolution des équipements et en conséquence des charges calorifiques, etc.), dans l'objectif de consolider les résultats présentés dans le DDAC.** A cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'elle prévoyait de recalculer certaines simulations aux résultats de mesures disponibles pour affiner les modèles et identifier les paramètres sensibles, ce qui est satisfaisant sur le plan des principes.

La détection d'un incendie est complétée, par rapport aux autres alvéoles de stockage MA-VL, par un réseau de surveillance de la température par fibres optiques (cf. *infra*) et par les caméras du pont de manutention. La levée de doute est réalisée par le pont de manutention (caméras optique, thermique et endoscope) ou un robot (caméras optique et thermique). En outre, comme dans les autres alvéoles MA-VL, une détection des fumées est effectuée en amont de la filtration THE. Les alvéoles dédiés au stockage des colis de déchets bitumés disposent de dispositifs d'intervention spécifiques à base d'eau dont l'objectif est, d'une part d'intervenir sur un feu prenant naissance à l'extérieur des colis de stockage, d'autre part de refroidir l'ambiance thermique pour éviter la propagation aux colis voisins dans le cas d'un emballage au sein d'un colis primaire (cf. *infra*). Ce dispositif comporte :

- un pont permettant le retrait potentiel des colis, muni d'un système d'extinction automatique par brouillard d'eau embarqué, pour protéger l'ensemble des charges calorifiques embarquées sur le pont (autonomie en eau de l'ordre de 90 minutes) ;
- la lance du robot d'intervention, motorisée et télécommandée, pour la lutte contre un feu en alvéole ;
- une rampe fixe d'aspersion en tête d'alvéole (zone d'isolement) permettant de refroidir un conteneur de stockage qui serait déposé dans cette zone.

S'agissant des moyens de détection et d'intervention, spécifiques aux alvéoles de stockage dédiés aux déchets bitumés et diversifiés, **l'IRSN estime qu'ils sont satisfaisants sur le principe**, en particulier pour les feux prenant naissance à l'extérieur des colis.

En conséquence, **s'agissant des scénarios d'incendie de référence, l'IRSN considère que les éléments présentés par l'Andra dans le DDAC, relatifs notamment à la résistance au feu des conteneurs de stockage, aux modélisations réalisées, ainsi qu'à la détection d'un incendie et à l'intervention, concourent à montrer le caractère accessible de la démonstration de sûreté.**

Scénarios extrêmes d'emballage

En réponse à la demande de l'ASN « *de définir et de considérer un scénario d'emballage [...] dans un colis de stockage afin d'identifier les dispositions nécessaires pour limiter les conséquences de ce scénario et pour garantir l'absence de propagation de l'emballage aux colis de stockage voisins* » [76] et en cohérence avec les études menées avant le dépôt du DDAC, l'Andra a postulé l'emballage d'un colis de déchets bitumés stocké en alvéole et a étudié la propagation de la chaleur aux colis de stockage voisins. Plus précisément, l'Andra a postulé deux scénarios d'emballage :

- scénario n°1 – inflammation et entretien de la combustion d'un colis primaire ;
- scénario n°2 – pyrolyse d'un colis primaire et inflammation des gaz de pyrolyse en dehors du colis de stockage.

L'IRSN souligne que ces évaluations relèvent d'une démarche de défense en profondeur et rappelle que l'objectif des études menées par l'Andra est de confirmer l'absence de propagation d'un emballement aux colis de stockage voisins avec la conception actuelle des alvéoles de stockage dédiés aux colis de déchets bitumés⁸⁹.

Dans le scénario n°1, l'Andra considère qu'un colis de déchets bitumés dans un conteneur de stockage s'enflamme et que la combustion est entretenue [77]. L'Andra souligne que ce scénario considère un feu développé malgré l'absence d'oxygène dans le conteneur. La modélisation thermique réalisée, sur la base d'une sollicitation à l'intérieur du conteneur de stockage de 927°C pendant 8 h (ce qui correspond à une sollicitation suivant la courbe ISO 834), montre que, dans le colis de stockage situé au-dessus de celui soumis à une sollicitation thermique, la température au niveau des colis primaires reste inférieure à 50°C. L'Andra conclut ainsi à l'absence de propagation de l'emballement aux colis primaires situés dans les colis de stockage voisins. L'IRSN relève que l'Andra ne s'appuie pas sur des considérations physiques pour établir la sollicitation thermique de 927°C, mais qu'elle l'a définie en lien avec la courbe ISO 834, retenue par ailleurs dans la démonstration de sûreté. L'IRSN convient du caractère irréaliste de l'entretien de la combustion d'un colis dans un conteneur de stockage restant fermé et contenant par conséquent une quantité limitée d'oxygène. Pour autant, l'IRSN rappelle que l'enchaînement de réactions exothermiques, caractéristique d'un scénario d'emballement, peut se produire en milieu anoxique. Aussi, il conviendrait que l'Andra considère l'occurrence d'un tel phénomène d'enchaînement afin de s'assurer du caractère effectivement enveloppe de la sollicitation thermique qu'elle retient dans le scénario n°1. A cet égard, l'IRSN note qu'une température de l'ordre de 900°C a été obtenue pour des modélisations d'emballement de bitumes qu'il a réalisées, sur la base de données pénalisantes issues du précédent programme quadripartite⁹⁰, et sans considérer de compensation par un phénomène de pyrolyse, endothermique. Aussi, **l'IRSN considère que le choix de l'Andra de retenir une température de 927°C comme source de chaleur dans un conteneur de stockage, bien que non basé sur des considérations d'ordre phénoménologique, est acceptable à ce stade.**

Dans le scénario n°2, l'Andra considère que les déchets bitumés pyrolysent, que les gaz de pyrolyse inflammables sortent du conteneur de stockage par l'interface entre le corps et le couvercle, qui reste en place sur le conteneur, et qu'ils s'enflamment en sortie de conteneur. L'Andra a évalué par modélisation les flux thermiques reçus par le colis de stockage cible, au-dessus de celui au sein duquel est postulé l'emballement, puis l'augmentation de la température au sein de ce colis cible. Pour cette modélisation, l'Andra retient la pyrolyse de 10 % d'un fût de déchets bitumés parmi les quatre du colis, soit une puissance de 34,5 kW. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que la combustion d'un fût entier, soit une puissance de 345 kW, conduisait dans les modélisations à imposer un débit calorifique surfacique atteignant près de 1 500 kW/m² (au niveau des surfaces des passages de fourche du colis cible), qui est une valeur très élevée, non représentative d'après l'Andra. De plus, la faible surface du foyer de l'incendie des gaz de pyrolyse (passages de fourches) associée à ce débit important conduit à un feu de type « torchère » et la faible distance entre les colis provoque un effet « cheminée », entraînant des hauteurs de flamme de l'ordre de 2 m. L'Andra considère que ce scénario est « *extrêmement hypothétique* ». Ainsi, une valeur de puissance divisée par 10, soit 34,5 kW, a été retenue par l'Andra. S'agissant du transfert thermique dans le colis cible, l'Andra postule que l'incendie est maîtrisé au bout de 8 h (à partir de l'inflammation des gaz de pyrolyse), par un moyen d'intervention disponible dans l'alvéole. Avec ces hypothèses, la température maximale modélisée en surface du bitume, 102°C, est atteinte au bout de près de 11 h au niveau du fond du fût. L'IRSN relève que l'Andra n'intègre pas de considérations phénoménologiques relatives à l'emballement d'un fût d'enrobé bitumé (**FEB**) dans ces modélisations, et retient notamment de manière arbitraire une puissance de 34,5 kW sans avoir justifié du caractère extrêmement hypothétique d'une puissance de 345 kW. Si l'IRSN convient du caractère irréaliste de la combustion de la totalité d'un fût en l'absence d'oxygène, la pyrolyse complète d'un fût, provoquée par l'emballement de réactions exothermiques, ne peut en revanche être exclue en milieu anoxique. En effet, sur la base des résultats du précédent programme quadripartite, l'IRSN note que, pour les bitumes les plus pénalisants, les réactions exothermiques peuvent atteindre une chaleur massique de l'ordre de 0,5 à 1 MJ/kg, en considérant des

⁸⁹ Ce qui se traduit par le respect du seuil de 100°C en peau de colis primaire.

⁹⁰ Programme de recherche Andra-Orano-CEA-EDF [26][75].

thermogrammes allant jusqu'aux températures caractéristiques de la pyrolyse. La chaleur de pyrolyse peut quant à elle atteindre 1 à 2 MJ/kg. Ainsi, le cas où les réactions exothermiques conduiraient à la pyrolyse de l'ensemble du volume d'un colis de déchets bitumés ne peut par conséquent être complètement exclu selon l'IRSN⁹¹. Dans ces conditions, la cinétique de la réaction exothermique conduirait à un feu de l'ordre de 900 kW pendant près de 3 h avant pyrolyse totale du contenu d'un FEB. Ces estimations de l'IRSN, bien que pénalisantes, montrent que l'Andra pourrait sous-estimer de plus d'un facteur 10 la puissance d'un feu lié à l'inflammation de gaz de pyrolyse. A ce titre, l'IRSN attire l'attention sur l'importance de considérer, pour l'étude d'un scénario d'emballlement, des valeurs de puissance et d'énergie évaluées sur la plage complète de température (0-300°C), et non les valeurs obtenues sur une plage de température tronquée (50-200°C) visant à démontrer l'absence d'emballlement sur cette plage.

En outre, l'IRSN estime que, compte tenu des connaissances actuelles sur la réactivité des FEB, la combinaison des deux scénarios postulés par l'Andra ne peut être exclue dans la mesure où la reprise de réactions exothermiques dans un FEB peut conduire, d'une part à la montée en température du FEB incriminé et des FEB adjacents à l'intérieur du même colis de stockage, et d'autre part à la pyrolyse du bitume et la combustion des gaz de pyrolyse ainsi produits, à l'extérieur du colis de stockage. Ainsi, bien que le scénario n°1 soit majorant en ce qui concerne les transferts thermiques au sein du colis dus à l'emballlement thermique, l'IRSN estime que ces transferts thermiques internes peuvent être cumulés à une agression externe au colis de stockage due à la combustion des gaz de pyrolyse.

Par ailleurs, s'agissant de l'hypothèse de tenue du couvercle du conteneur de stockage, l'Andra estime que les essais réalisés avec de l'hélium (cf. chapitre 4.3.2.1) montrent la possibilité d'évacuation des gaz, notamment par l'interface entre le corps et le couvercle du conteneur. Au cours de la présente instruction, l'Andra a transmis des résultats de simulations de montée en pression dans un conteneur de stockage de type CS 4.1 réalisées sur la base des données issues des essais d'évacuation d'hélium. Ces résultats, qui montrent l'apparition de fissures sur le couvercle du conteneur alors que les déformations plastiques des vis et inserts sont nulles, conduisent l'Andra à conclure à la tenue du couvercle. Sur ce point, en cohérence ses précédentes conclusions [74], l'IRSN considère que la transposition des essais réalisés à l'hélium par l'Andra à une situation réelle d'emballlement n'est pas acquise, étant donnés notamment les phénomènes pouvant survenir lors de l'emballlement d'un FEB (montée en température, colmatage de l'interface corps/couvercle par des suies ou des particules, bullage du bitume, etc.). En particulier, l'IRSN considère que les éléments transmis par l'Andra au cours de l'instruction, consistant uniquement en des résultats de simulations sans description des hypothèses sous-jacentes (débit de gaz, taux de fuite du conteneur, température, etc.), ne lui permettent pas de se prononcer sur la tenue du couvercle d'un conteneur de stockage en cas de montée en pression. Compte tenu de l'importance du maintien des conteneurs de stockage fermés dans la démonstration de l'Andra [74] et du manque de connaissances sur le comportement des FEB en situation d'emballlement, **il appartiendra à l'Andra de consolider, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de Cigéo, son évaluation de la tenue du couvercle.**

S'agissant des moyens de détection et d'intervention spécifiques, l'Andra indique avoir dimensionné les réseaux de fibre optique en modélisant deux scénarios d'élévation de température dans les conteneurs de stockage (scénario dit « emballlement » correspondant à une température imposée de 927°C pendant 6 h ou scénario dit « échauffement » correspondant à 100°C pendant 24 h), sans considérer la ventilation. Avec un seuil⁹² d'alarme fixé à 5°C, l'Andra conclut que, pour le scénario « emballlement », la détection a lieu 6 h après le début de la sollicitation thermique. Pour le scénario « échauffement », la détection a lieu entre 11 h et 26 h, selon le positionnement du colis (nappe inférieure ou supérieure) dans lequel est appliqué la sollicitation thermique. Par ailleurs, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les temps de parcours de l'alvéole (500 m) étaient de l'ordre de 30 minutes pour le pont de manutention et d'une dizaine de minutes pour le robot (tous deux équipés de systèmes de détection et d'intervention). L'IRSN convient que, dans le cas d'un scénario dans lequel les gaz de pyrolyse s'enflamment, la détection pourrait être rapide (émission de gaz ou fumées chaudes pouvant être

⁹¹ Situation dans laquelle la chaleur massique des réactions exothermiques est égale à la chaleur de pyrolyse.

⁹² L'Andra précise que ce seuil pourra être ajusté ultérieurement en recherchant un équilibre entre le risque de déclenchement de fausses alarmes et la diminution du délai de détection d'un échauffement.

détectées par les fibres optiques ou les détecteurs en gaine de ventilation). En revanche, dans le cas d'une montée en température d'un FEB lente et sans flamme apparente, au vu des durées précitées qui peuvent atteindre 26 h, l'IRSN considère que la capacité du réseau de fibres optiques à détecter dans les délais adaptés une montée en température reste à démontrer, en lien avec la cinétique des scénarios d'emballlement. Par ailleurs, l'IRSN souligne que le délai de détection est *a priori* fortement dépendant de l'aéroulque en alvéole MA-VL et que les écoulements de gaz n'ont pas été pris en compte dans les modélisations de l'Andra. Ainsi, l'IRSN considère que, bien que l'Andra ait apporté des éléments au cours de l'instruction relatifs aux performances des systèmes de détection, **l'évaluation du délai maximal pour l'identification et la localisation du colis à l'origine d'un emballlement devra être consolidée en lien avec la définition des scénarios d'emballlement**. S'agissant des dispositifs d'intervention, l'Andra a indiqué que le fonctionnement du pont de manutention était à ce stade limité à une température ambiante de 50°C et qu'il ne pouvait être utilisé pour déplacer un colis en zone d'isolement si sa température en surface dépassait 70°C. Malgré les éléments apportés par l'Andra au cours de l'instruction sur les performances du pont de manutention et du robot, **l'IRSN estime que l'Andra devra consolider son évaluation de la durée nécessaire, en lien avec ces performances, pour isoler un colis à l'entrée de l'alvéole ou, le cas échéant, pour écarter les colis voisins afin d'empêcher la propagation**. En outre, l'IRSN rappelle les difficultés de mise en œuvre de dispositifs d'extinction avec des capacités adaptées à l'extinction de FEB contenus dans un colis de stockage [74]. En tout état de cause, l'IRSN souligne que la suffisance des dispositifs de détection et d'intervention dépend fortement des scénarios d'emballlement et de leur cinétique.

En conclusion, l'IRSN relève que la démarche retenue par l'Andra pour démontrer l'absence de propagation d'un emballlement repose sur la définition de scénarios sans considérations phénoménologiques relatives à l'emballlement d'un FEB. En outre, l'IRSN considère que l'Andra n'a pas démontré le caractère enveloppe des sollicitations thermiques issues des scénarios extrêmes par rapport à celles attendues en situation d'emballlement, sur la base des connaissances sur la réactivité des FEB acquises au cours du précédent programme quadripartite (chaleur et puissance massiques notamment). **Aussi, dans l'objectif d'atteindre la démonstration de la sûreté du stockage des colis de déchets bitumés MA-VL, l'IRSN considère que l'Andra devra définir, dans la prochaine révision du rapport de sûreté de Cigéo, des scénarios d'emballlement enveloppes s'appuyant sur des considérations phénoménologiques de la réactivité des enrobés bitumés et du comportement des fûts d'enrobés sous sollicitation thermique**. L'IRSN rappelle à cet égard que les connaissances relatives à la réactivité des enrobés bitumés peuvent être amenées à évoluer dans le cadre du programme Babylone en cours. **Sur cette base, l'Andra devra définir une stratégie de détection et d'intervention et justifier sa suffisance pour exclure la propagation d'un emballlement de réactions exothermiques aux colis voisins dans les alvéoles de stockage dédiés au colis de déchets bitumés**. Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E36](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Conséquences radiologiques

L'Andra a évalué [78] les conséquences radiologiques de l'emballlement d'un FEB stocké au sein d'un conteneur de stockage en alvéole MA-VL. Pour ce scénario, l'Andra considère que le terme source de l'ensemble des FEB du colis de stockage dans lequel un FEB s'emballle est mobilisé, pour la famille de déchets bitumés pénalisante vis-à-vis de l'activité. La rétention dans les gaines de ventilation n'est pas valorisée et les facteurs de rétention retenus par l'Andra pour le colis de stockage et l'alvéole sont de 10^{-1} chacun (soit 1 % rejeté dans la galerie d'accès). S'agissant du facteur de rétention retenu pour l'alvéole de stockage, l'IRSN note qu'il est lié aux performances de la façade d'accostage MA-VL et qu'il est par conséquent identique à celui retenu en situation d'incendie quel que soit l'alvéole MA-VL considéré, une fois celui-ci mis en confinement statique (cf. chapitre 4.2.2.2). L'Andra prévoit des essais de qualification pour confirmer ces performances. S'agissant du facteur de rétention du conteneur de stockage, l'IRSN note qu'il est plus pénalisant que celui retenu pour d'autres situations accidentelles (10^{-1} contre 10^{-2} pour les situations de choc ou chute par exemple, cf. chapitre 4.2.2.1). Sous réserve que l'Andra démontre que la suppression générée en cas d'emballlement n'est pas de nature à conduire à une éjection du couvercle du conteneur de stockage (cf. *supra*), l'IRSN estime que ce facteur de rétention est acceptable. Aussi, **il appartiendra à l'Andra, selon les résultats de ses études sur la tenue du**

couvercle du conteneur de stockage en cas d'emballage d'un FEB, de mettre à jour le coefficient de rétention associé au conteneur de stockage, et le cas échéant, son évaluation des conséquences radiologiques.

Le coefficient de remise en suspension des aérosols solides non volatils retenu par l'Andra est de 5.10^{-2} (1 pour les aérosols volatils). L'IRSN relève que, depuis le DOS de Cigéo, ce coefficient a augmenté et considère que cette évolution est de nature à consolider l'évaluation des conséquences radiologiques de l'emballage d'un FEB. Enfin, les autres hypothèses retenues par l'Andra (hauteur de rejet, conditions météorologiques, groupe représentatif, etc.) sont examinées au chapitre 4.5.2 du présent rapport.

Avec ces hypothèses, l'exposition évaluée par l'Andra à court-terme (pendant 24 h) est de l'ordre de 0,7 mSv à Bure et ne nécessite donc pas de mesures de protection du public. L'IRSN convient de l'ordre de grandeur du résultat de l'Andra, qui repose sur un ensemble de paramètres dont le caractère pénalisant est à considérer dans leur ensemble, mais rappelle que celui-ci est conditionné notamment à la démonstration de la tenue du couvercle du conteneur de stockage en cas d'emballage. **En revanche, il appartiendra à l'Andra, en accord avec l'arrêté INB, de compléter son évaluation des conséquences radiologiques à moyen et long terme, mais également des conséquences toxiques non radiologiques, comme pour les autres scénarios d'extension du dimensionnement** (cf. chapitre 4.5.2 du présent rapport).

Spécifications d'acceptation des colis de déchets bitumés

Les colis de déchets bitumés font l'objet de spécifications d'acceptation dédiées visant à couvrir le risque lié à leur réactivité chimique [79]. A ce stade, l'Andra a défini une méthode d'élaboration de ces spécifications, mais les critères associés seront définis ultérieurement, ceux-ci étant notamment assujettis aux résultats du programme Babylone en cours. Ces travaux devraient en effet permettre à l'Andra de déterminer s'il est nécessaire de définir des limites en concentration de certaines espèces, et le cas échéant de quantifier ces limites. Trois options de spécifications d'acceptation sont ainsi retenues à ce stade par l'Andra :

- l'absence de spécification sur la concentration des sels (si les résultats du programme Babylone montrent que la puissance générée par la réactivité des sels ne suffit pas à conduire à une élévation significative de la température jusqu'au critère de 100°C pour un domaine de concentrations englobant toutes les compositions existantes) ;
- des spécifications sur la concentration des principaux sels oxydants et réducteurs (si les résultats du programme Babylone montrent un dépassement des critères de 5 mW/g et 95 J/g pour un ou plusieurs domaines de concentration de ces principaux sels) ;
- des spécifications sur la concentration de l'ensemble des sels étudiés vis-à-vis du risque d'emballage (si les résultats du programme Babylone ne permettaient pas de démontrer que le dépassement des critères de 5 mW/g et 95 J/g peut être écarté pour certains domaines de concentration des principaux sels). L'Andra souligne que cette spécification serait complexe à contrôler d'un point de vue opérationnel.

S'agissant des critères de puissance et d'énergie, l'IRSN rappelle avoir estimé [75] qu'une énergie de 90 J/g était une valeur majorante de l'exothermicité des enrobés, pouvant être utilisée dans la démonstration de la maîtrise des risques liés à l'incendie. **L'IRSN estime ainsi que ces critères sont *a priori* fondés, et qu'ils devront être confirmés sur la base des résultats du programme Babylone.**

S'agissant des trois options retenues par l'Andra, l'IRSN rappelle que la détermination de la composition chimique réelle des colis de déchets bitumés comporte une part d'incertitude irréductible [75]. Aussi, l'IRSN considère comme peu réaliste la première option qui consiste à démontrer que le risque d'emballage réactionnel est exclu pour toutes les compositions existantes. L'IRSN rappelle également les difficultés associées à la caractérisation physico-chimique des colis de déchets bitumés et estime à cet égard que la possibilité de garantir qu'un fût ou qu'un ensemble de fûts entrent dans les domaines de concentration qui pourraient être fixés dans les deuxième et troisième options présentées ci-avant n'est pas acquise. En pratique, la mise en œuvre de contrôles associés à cette spécification, qui restent à définir par l'Andra, soulève de nombreuses questions (contrôle systématique ou par batch, représentativité des prélèvements eu égard à l'hétérogénéité des colis, etc.). Toutefois, l'IRSN rappelle que, à défaut de démontrer l'absence de risque d'emballage pour toutes les

compositions, l'Andra étudie des scénarios d'emballement dans l'objectif d'exclure le risque de propagation aux colis de stockage voisins. **In fine, l'IRSN considère que la démarche engagée par l'Andra est de nature à faire avancer les réflexions sur l'acceptabilité des colis de déchets bitumés à Cigéo, et convient que la poursuite des travaux d'élaboration des spécifications d'acceptation des déchets bitumés, prévus d'être stockés après la tranche 1, est conditionnée par les futurs résultats du programme quadripartite.**

Conclusion

Les éléments présentés par l'Andra dans le DDAC conduisent l'IRSN à conclure au caractère accessible de la démonstration de la sûreté du stockage en l'état des colis de déchets bitumés pour les scénarios d'incendie dits de référence. En revanche, concernant les scénarios extrêmes d'emballement, l'IRSN considère que les scénarios retenus par l'Andra ne sont pas nécessairement pénalisants en raison de lacunes phénoménologiques dans leur définition ou d'interrogations sur la tenue du couvercle en situation d'emballement, et qu'en conséquence, l'Andra n'a pas apporté, à ce stade, les éléments permettant de s'assurer de l'absence de propagation d'un emballement. En outre, bien que l'Andra prévoie d'équiper les alvéoles dédiés aux FEB de moyens de détection et d'intervention spécifiques et qu'elle ait indiqué les performances envisagées à ce stade pour ces moyens, l'IRSN estime que l'Andra n'a pas démontré la suffisance de ces moyens, en lien avec la cinétique de scénarios d'emballement pénalisants. **Aussi, bien que l'IRSN n'identifie pas, à ce stade, de point rédhibitoire à l'accessibilité de la démonstration de sûreté du stockage en l'état des FEB, l'IRSN considère qu'il n'est pas garanti que la démonstration de l'Andra, basée sur la combinaison des dispositions de conception de l'alvéole, des conteneurs de stockage renforcés vis-à-vis de l'incendie et des stratégies de détection et d'intervention, puisse à terme être apportée.**

Compte tenu des difficultés posées par l'accessibilité de démonstration de sûreté du stockage en l'état des FEB, en accord avec la demande de l'ASN de privilégier « *la recherche de la neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitumés* », l'IRSN souligne la nécessité de poursuivre les recherches de solutions de neutralisation, d'autant plus s'il apparaît, à l'issue du programme Babylone ou de caractérisations des FEB, que certains d'entre eux ne sont pas éligibles au stockage en l'état à Cigéo (intégré par l'Andra au titre de la flexibilité de Cigéo).

4.3.1.6. Résistance du génie civil aux sollicitations thermiques

Exigences de comportement des ouvrages

Pour rappel (cf. chapitre 4.3.1.4 ci-avant), l'Andra attribue aux ouvrages de surface et souterrains constitutifs du génie civil une exigence de résistance au feu normalisé ISO 834 de deux heures (REI 120), excepté pour les refuges qui ont une exigence de résistance au feu de quatre heures. Pour les ouvrages souterrains, cette exigence porte sur les revêtements définitifs de type béton coffré ou voussoirs sans revêtement additionnel et vise également à protéger la formation géologique située autour des galeries à l'égard de la sûreté après fermeture. A cet égard, l'Andra a indiqué en cours d'instruction que, dans les phases ultérieures du projet, des simulations numériques thermo-hydomécaniques, intégrant une phénoménologie aussi réaliste que possible, seront réalisées afin de préciser les marges de dimensionnement par rapport aux approches conservatives qu'elle estime avoir retenues. L'IRSN encourage l'Andra à poursuivre cette démarche.

L'Andra présente une analyse de stabilité au feu basée sur la méthode des valeurs tabulées (section 5 de l'Eurocode 2) appliquée par élément de structure. La justification de l'Andra repose sur une stabilité au feu de deux heures sous une sollicitation thermique conventionnelle (courbe ISO 834). A cet égard, l'IRSN rappelle (cf. chapitre 4.3.1.4) que l'Andra n'a pas justifié le caractère enveloppe de ce feu par rapport aux incendies possibles dans les installations, en particulier pour les feux d'hydrocarbures⁹³. De plus, le feu normalisé ne permet pas de tenir compte de l'action thermique due à un éventuel impact des flammes et ne permet pas de couvrir le déroulement complet d'un incendie réel incluant la phase de refroidissement et ses conséquences (éclatement du béton lors de cette phase). A ce sujet, l'IRSN note (cf. chapitre 4.3.1.4) que l'Andra s'est engagée à retenir,

⁹³ L'IRSN note par exemple que le scénario d'un feu de camion dans les sas camion du bâtiment EP1 conduirait à un dépassement localisé de ce feu normalisé.

avant le début des travaux de creusement et les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, pour la vérification des exigences de résistance au feu des ouvrages de génie civil, des agressions thermiques enveloppes des incendies pouvant s'y produire (engagement 2024-E34).

Comportement au feu des ouvrages de surface

Concernant les ouvrages de surface, l'IRSN constate que les voiles enterrés du bâtiment EP1, soumis à des actions latérales significatives (poussées statiques de terre ou hydrodynamique), n'entrent pas dans le domaine d'application de la méthode retenue par l'Andra. Toutefois, l'IRSN estime que leur épaisseur (de l'ordre de 1 m en raison de leur dimensionnement à la chute d'avion, discuté au chapitre 4.4.4.2 du présent rapport) et les dispositions constructives retenues pour ces voiles sont globalement conformes aux prescriptions de l'Eurocode 2, **ce qui est satisfaisant pour vérifier a priori l'exigence de résistance au feu.**

L'Andra considère que les parois et dalles délimitant des locaux susceptibles de contenir des substances radioactives, tels que les zones arrière de la cellule de préparation des colis, constituent à la fois la limite du secteur de feu et du secteur de confinement (cf. chapitre 4.3.1.4). Toutefois, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les parois qui délimitent les secteurs de feu et de confinement ne correspondent pas aux limites du bâtiment EP1. De plus, l'Andra indique que le hall de déchargement est identifié comme une zone de feu eu égard au risque d'incendie interne. A ce stade, l'IRSN estime qu'il n'est pas pertinent d'exclure, dans la cellule de déchargement des emballages de transport, un incendie dont l'ampleur serait susceptible de porter atteinte au confinement assuré par les parois de cette cellule. Toutefois, le maintien de la ventilation dans les locaux adjacents permet de garantir l'extraction et la filtration des éventuelles fuites avant leur rejet. L'IRSN rappelle que les exigences de comportement associées à la fonction de confinement ne peuvent pas être atteintes par le génie civil seul, mais doivent être complétées par des dispositions de confinement dynamique. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de s'assurer que le pilotage de la ventilation en situation d'incendie dans les locaux adjacents C2⁹⁴ est adapté à la maîtrise du risque d'incendie dans les locaux dont les parois constituent la limite du secteur de confinement.**

Pour ce qui concerne les dalles de la toiture du hall de déchargement, l'Andra indique que ce local accueille des emballages de transport qui constituent la deuxième barrière de confinement ; les colis primaires qu'ils contiennent constituant la première barrière de confinement. Aussi, le confinement en situation d'incendie interne ne repose pas sur la toiture du hall de déchargement. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Incendie induit par la chute d'avion sur les ouvrages de surface

Comme indiqué au chapitre 4.1 du présent rapport, l'IRSN considère que les dispositions retenues contre la chute d'avion (mise en place d'une « coque-avion » et du concept de « dalle-liner ») sont satisfaisantes sur le principe. En revanche, des hypothèses et de la méthodologie d'évaluation des conséquences d'une chute d'avion considérées par l'Andra, l'IRSN retient que l'analyse de la stabilité en cas d'incendie suite à une telle situation ne tient pas compte du risque d'éclatement du béton de la face supérieure des dalles en cas d'incendie de kérosène, qui pourrait se produire dans la zone d'enrobage des armatures supérieures, et ainsi diminuer leur protection thermique et réduire la résistance mécanique de la structure à l'égard de l'incendie, en particulier pour le concept « dalle-liner » (liner métallique en sous-face de la dalle, cf. chapitre 4.1). Aussi, **il appartiendra à l'Andra, avant les premiers bétons, d'évaluer la performance de cette épaisseur d'enrobage en vue de satisfaire à l'exigence de confinement, notamment du concept de « dalle-liner », qui pourrait être mise en cause à la suite de l'impact de l'avion et de ses effets induits sur le béton.**

Pour ce qui concerne le concept de « dalle-liner », l'Andra retient une exigence de non-perforation du liner qui permet d'assurer son étanchéité, et par voie de conséquence d'éviter l'écaillage et l'introduction de kérosène dans l'installation. Aussi, l'Andra justifie la tenue du liner et des goujons sous l'impact d'un avion à l'égard du risque d'enfoncement de la dalle mais ne tient pas compte des effets d'un incendie de kérosène sur le liner,

⁹⁴ Maintien de l'extraction tant que les seuils limites de la protection des filtres ne sont pas atteints.

susceptible de conduire à une perte de sa fonction de supportage et par conséquent des exigences de comportement qui lui sont attribués. Aussi, l'IRSN ne peut pas conclure sur le respect des exigences attribuées au concept dalle-liner en cas d'incendie de kérosène. Le respect de l'exigence de supportage du liner dépend notamment de son état d'endommagement et de celui de la dalle en béton armé supportant le liner. Pour l'IRSN, un critère de déformation limite des armatures (de 1 %) permettrait de garantir le respect de l'exigence de supportage du liner.

L'IRSN souligne également que l'Andra ne présente pas d'analyse du comportement du hall de déchargement des emballages de transport et du bâtiment VVE sous l'impact d'un avion suivi d'un incendie. Or, il est nécessaire de vérifier que l'endommagement de ces structures de génie civil, directement ou indirectement impactées par la chute d'avion, n'a pas d'effet préjudiciable sur le respect de leurs exigences de comportement.

Ainsi, l'IRSN considère que l'Andra devra justifier, dans la prochaine révision du rapport de sûreté, le respect des exigences de comportement attribuées aux structures de génie civil des bâtiments nucléaires de surface constituant la dernière barrière de confinement à l'égard des effets induits par la chute d'un avion suivie d'un incendie. A défaut de justification de l'exigence de non-introduction de kérosène, l'Andra devra prendre en compte la combustion des charges calorifiques du bâtiment nucléaire de surface cumulées à celle de kérosène en cas de chute d'un avion. Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E37](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Comportement au feu des ouvrages souterrains

S'agissant des ouvrages souterrains, l'IRSN note que l'Andra retient pour les structures internes (cloisons, voiles et dalles de ventilations) des dispositions constructives éprouvées, en particulier pour les soutènements où l'Andra prévoit des dispositions de protection passive (application du béton projeté, enrobage de la tête des boulons) afin que l'incendie ne porte pas atteinte aux composants nécessaires à leur stabilité, **ce qui est satisfaisant sur le principe.**

Pour ce qui concerne les revêtements, l'Andra s'appuie sur la méthode simplifiée de l'isotherme 500°C de l'Eurocode 2⁹⁵ pour d'une part, montrer qu'il n'y a pas d'élévation de température au-delà de 30 cm de béton après deux heures de feu ce qui permet de justifier la préservation des propriétés de l'argilite d'une éventuelle montée en température et d'autre part, conclure que l'épaisseur de 5 cm retenue pour le revêtement permet de confirmer la résistance au feu de ces structures souterraines en béton (l'isotherme 500°C étant atteint à une profondeur de 3,4 cm). L'IRSN estime que pour les ouvrages souterrains de Cigéo, la méthode des valeurs tabulées et les méthodes simplifiées de l'Eurocode 2 peuvent être utilisées uniquement pour vérifier les structures internes. Pour des structures qui doivent être résistantes à la fois en compression et au feu, tels que les revêtements, l'IRSN estime que des méthodes de calcul avancées permettent de mieux prendre en compte les effets hyperstatiques et les contraintes internes dus aux dilatations thermiques empêchées et devraient être utilisées. A cet égard, l'IRSN souligne que l'état de l'art recommande que ces calculs soient réalisés par un organisme agréé en ingénierie de sécurité d'incendie. L'IRSN souligne également que la méthode simplifiée de l'isotherme 500°C n'est pas adaptée pour les revêtements, et notamment en phase de refroidissement, puisque la propagation de la chaleur dans le béton des revêtements de galeries perdure pendant cette phase. Aussi, l'IRSN considère qu'il est nécessaire de vérifier la résistance au feu des revêtements également pendant cette phase de « refroidissement », avec une méthode adaptée.

Par ailleurs, pour tenir compte du risque d'éclatement du béton en situation d'incendie, l'Andra propose d'utiliser un béton résistant à l'éclatement permettant selon elle de vraisemblablement limiter la durée des réparations après incendie. L'IRSN souligne que le comportement de ce type de béton peut être influencé par plusieurs paramètres, notamment sa formulation, ce qui rend potentiellement difficile l'évaluation de son

⁹⁵ La méthode de calcul simplifiée comprend une réduction générale des dimensions de la section droite selon une zone endommagée par la chaleur sur les surfaces de béton. L'épaisseur du béton endommagé est rendue égale à la profondeur moyenne de l'isotherme à 500 °C dans la zone comprimée de la section droite. Le béton endommagé, c'est-à-dire à des températures supérieures à 500 °C, est supposé ne pas contribuer à la capacité portante de l'élément, alors que la section de béton résiduelle conserve ses valeurs initiales de résistance et de module d'élasticité.

comportement au feu sans avoir recours à des essais. En outre, le risque d'éclatement du béton dans les ouvrages souterrains est augmenté du fait des contraintes en compression plus élevées en situation d'incendie, à la fois dans le sens longitudinal et dans les directions circonférentielles des ouvrages. **Aussi, il appartiendra à l'Andra, avant le début des travaux de creusement, de justifier, sur la base de résultats d'essais, que la formulation retenue pour le béton des revêtements permet d'écarter ou de limiter le risque d'éclatement de ce béton pour les scénarios d'incendie susceptibles de se produire dans les ouvrages souterrains.**

Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, l'IRSN considère que l'Andra devra justifier, dans la prochaine révision du rapport de sûreté, la résistance au feu des voussoirs ainsi que celle des revêtements, par une méthode à l'état de l'art applicable aux ouvrages souterrains, en tenant compte des risques d'éclatement du béton et sur une durée permettant le refroidissement complet des structures. Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E38](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

L'IRSN rappelle que la justification de la résistance au feu des voussoirs et des revêtements doit aussi tenir compte de leur rôle de protection de la formation hôte au regard de ses fonctions de sûreté. A cet égard, **l'IRSN considère que le principe de retenir une épaisseur suffisante de béton pour protéger la roche est satisfaisant mais considère que l'Andra pourrait définir les caractéristiques du Callovo-Oxfordien à vérifier en gestion post-accidentelle de situations d'incendie impactant significativement les voussoirs et les revêtements.**

Pour ce qui concerne l'incendie induit par un séisme, l'Andra indique [70] maintenir après séisme la performance et le fonctionnement des sectorisations incendie dans les locaux contenant des substances radioactives. De plus, l'Andra retient une marge pour la justification du comportement au feu après séisme des dispositifs d'ancrages. L'IRSN souligne que les éléments structuraux et les éléments de sectorisation incendie doivent donc *de facto* conserver leurs caractéristiques après un séisme. **À défaut, il appartiendra à l'Andra, au plus tard pour la demande de mise en service de Cigéo, de tenir compte dans l'évaluation du risque d'incendie de la possibilité de dommages sur les éléments structuraux et de sectorisation résultant de l'occurrence d'un séisme.**



4.3.2. Explosion

La production d'hydrogène gazeux inflammable par radiolyse ou par corrosion engendre un risque d'explosion dans Cigéo, respectivement examiné aux chapitres 4.3.2.1 et 4.3.2.2 ci-après. Le risque d'explosion d'origine interne lié notamment à la présence de batteries, d'un générateur à rayons X à haute énergie et de bouteilles de gaz fait l'objet du chapitre 4.3.2.3.

4.3.2.1. Risques liés à la radiolyse

Les risques liés à la radiolyse sont essentiellement dus à la production d'hydrogène gazeux par irradiation des matières hydrogénées présentes dans des colis MA-VL [80]. A ce titre, les débits de production de gaz inflammables, qui incluent les gaz de radiolyse et dans une moindre mesure ceux de corrosion, font l'objet d'une spécification préliminaire d'acceptation pour les colis primaires MA-VL (par exemple, 15 L/an pour les colis CSD-C, 60 L/an pour les colis C1PG^{SP} en stockage direct ou encore 300 L/an pour un nombre maximum de 150 colis CFR HAO). La prévention du risque d'explosion repose sur le respect de concentrations maximales en hydrogène dans l'air afin d'éviter la formation d'une atmosphère explosive (**ATEX**) : l'Andra se fixe comme objectif le maintien d'une concentration en hydrogène dans l'air inférieure à 1 % en fonctionnement normal (critère correspondant à 25 % de la limite inférieure d'explosivité, ou **LIE**⁹⁶, de l'hydrogène) et à 3 % en fonctionnement incidentel et accidentel (soit 75 % de la LIE de l'hydrogène). L'IRSN note que ces objectifs de sûreté intègrent des marges suffisantes, usuellement retenues dans les INB, par rapport à la LIE de l'hydrogène. L'Andra analyse successivement le risque d'atteinte de ces seuils dans les conteneurs de stockage MA-VL, dans le bâtiment EP1, dans les hottes de transfert MA-VL et dans les alvéoles MA-VL afin, le cas échéant, d'identifier des dispositions complémentaires de maîtrise du risque d'explosion.

⁹⁶ La LIE de l'hydrogène est de 4 % en mélange dans l'air, à pression atmosphérique.

Afin de s'assurer de l'absence d'accumulation d'hydrogène au sein des conteneurs de stockage MA-VL, l'Andra a mené des essais consistant à injecter de l'hélium dans un conteneur CS 4.1 (conteneur renforcé vis-à-vis de l'incendie, cf. chapitre 4.3.1.5) avec un débit de 100 L/an et à évaluer la capacité du conteneur à l'évacuer. Sur la base des résultats de ces essais réalisés sur des conteneurs de stockage sans ou avec liant de clavage (teneur en hélium respectivement de 0,024 % et 0,45 %), l'Andra conclut à la bonne évacuation des gaz pour les conteneurs en béton, **ce dont l'IRSN convient compte tenu des caractéristiques enveloppes des conteneurs CS 4.1** (conteneurs moins perméables du fait de leur épaisseur accrue et de la présence de fibres de polypropylène). S'agissant des conteneurs en acier, l'Andra indique que les gaz peuvent s'évacuer par l'interface entre le corps et le couvercle, vissé et sans présence de joint. Toutefois, dans la mesure où les colis primaires susceptibles d'être stockés dans ce type de conteneurs peuvent dégazer jusqu'à 150 L/an, **l'IRSN estime que l'Andra pourrait réaliser un essai visant à confirmer la capacité de ces conteneurs à évacuer un tel débit.**

L'analyse du risque d'accumulation d'hydrogène au sein du bâtiment EP1, notamment dans la zone tampon des colis de stockage, ne conduit pas l'Andra à identifier de dispositions complémentaires en raison des délais d'atteinte importants des critères de sûreté au regard des temps de séjour prévus des colis. A cet égard, l'IRSN souligne que le retour d'expérience du Centre de stockage de l'Aube (CSA) montre que des colis peuvent être entreposés pendant de longues périodes. Aussi, **il appartiendra à l'Andra d'inscrire dans les RGE, pour la demande de mise en service de l'installation, les temps de séjour maximaux des colis dans les différents locaux du bâtiment EP1, eu égard au respect des objectifs de sûreté liés à l'accumulation d'hydrogène.** Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué prévoir, dans la zone tampon et la cellule de déchargement des ET où un nombre important de colis peuvent être entreposés, l'implantation de capteurs mesurant le taux d'hydrogène dans l'air des locaux et dans l'air des gaines d'extraction de la ventilation. L'Andra a précisé que la position exacte des capteurs serait définie dans les phases ultérieures du projet en accord avec les recommandations de la norme ISO 2889 relative à la représentativité du prélèvement. **A ce stade, l'IRSN estime ces éléments satisfaisants sur le plan des principes. Il appartiendra à l'Andra, en vue de la demande de mise en service de Cigéo, de préciser les dispositions à mettre en œuvre en cas de détection d'hydrogène dans les zones d'entreposage du bâtiment EP1 à un niveau supérieur à un seuil à définir en cohérence avec les objectifs de sûreté.**

Le volume libre restreint de la hotte de transfert MA-VL est propice à l'accumulation de gaz produit par le colis qu'elle transporte compte tenu de son étanchéité et de l'absence de ventilation. L'analyse du risque d'accumulation d'hydrogène dans la hotte en situations de fonctionnement normal et dégradé, similaire à l'approche retenue par l'Andra au stade du DOS, est basée notamment sur la maîtrise du temps de séjour du colis en son sein et suppose une dilution homogène de l'hydrogène. L'IRSN considère réaliste l'hypothèse de dilution homogène de l'hydrogène, compte tenu de sa diffusivité importante et des résultats de simulations numériques effectuées par l'Andra. En cas d'immobilisation prolongée de la hotte, le délai d'atteinte de 3 % d'hydrogène au sein du volume libre de la hotte est estimé par l'Andra à 39 jours pour la situation la plus pénalisante, à savoir le transfert d'un colis CFR HAO présentant un débit de production de gaz de 300 L/an. L'Andra retient cette durée en tant que délai maximal d'intervention post-accidentelle. A cet égard, l'Andra estime que les dispositions mises en œuvre pour garantir l'intégrité de la hotte de transfert en cas d'agression, notamment chute, choc ou incendie (cf. chapitre 4.3.3 relatif à la manutention et 4.3.1 relatif à l'incendie) concourent à faciliter la reprise de la hotte dans un délai inférieur à 39 jours. Dans l'hypothèse d'une durée d'immobilisation supérieure, l'Andra prévoit la mise en œuvre d'un dispositif mobile, transportable à dos d'homme, permettant de balayer l'atmosphère interne de la hotte *via* deux orifices classés EIP auxquels sont attribués des exigences définies (maintien de la capacité de purge en cas de chute de la hotte d'une hauteur inférieure ou égale à 10 cm, d'incendie et de séisme). De plus, l'Andra attribue une exigence de stabilité sous séisme aux chemins empruntés pour atteindre la hotte. En ce qui concerne la durée d'atteinte de 75 % de la LIE de l'hydrogène dans la hotte MA-VL, l'IRSN relève qu'elle diffère de celle évaluée au stade du DOS (9 jours⁹⁷). Cet écart est dû à l'hypothèse de dilution homogène de l'hydrogène. **A ce stade, l'IRSN considère que les dispositions retenues par l'Andra afin de limiter la durée d'indisponibilité de la hotte à une durée inférieure à 39 jours et, en cas de dépassement, les dispositions complémentaires prévues pour évacuer l'hydrogène, sont**

⁹⁷ En supposant une stratification des gaz et un colis présentant un débit de 100 L/an.

acceptables dans le principe. En tout état de cause, selon les évaluations complémentaires de sûreté présentées par l'Andra [48], en cas d'impossibilité de mise en œuvre du balayage par exemple à la suite d'un séisme extrême, une explosion dans la cavité de la hotte conduirait au déconfinement du colis de déchets transféré et à un impact sur la population à 24 h estimé à quelques dizaines de μSv , ce qui est très faible.

S'agissant des alvéoles de stockage MA-VL en exploitation, le délai d'atteinte des seuils de 1 % et de 3 % d'hydrogène dans le volume libre⁹⁸ de l'alvéole le plus pénalisant en termes de débit d'hydrogène (alvéole contenant les colis C1PG^{SP})⁹⁹ est calculé par l'Andra à respectivement 50 et 150 jours en l'absence de ventilation [51]. Compte tenu du nombre limité de colis CFR HAO par rapport à celui des colis C1PG^{SP}, l'IRSN convient du caractère pénalisant de la configuration retenue et, sur la base de ses propres calculs, des durées estimées par l'Andra. En fonctionnement normal, la maîtrise des risques liés à l'accumulation d'hydrogène repose en conséquence sur le maintien de débits de ventilation suffisants. Sur ce point, l'IRSN observe que les débits d'hydrogène de la configuration la plus pénalisante sont compatibles avec les débits requis dans les alvéoles vis-à-vis du risque de dissémination. En complément, l'IRSN relève que l'Andra a réalisé des modélisations aérauliques pour s'assurer notamment de l'absence de zones d'accumulation d'hydrogène, **ce qui est satisfaisant**. L'Andra prévoit la surveillance du taux d'hydrogène dans les alvéoles MA-VL et du fonctionnement de la ventilation au moyen de capteurs placés dans la gaine d'extraction de ventilation. Comme pour le bâtiment EP1, la position des capteurs sera définie ultérieurement conformément aux recommandations de la norme ISO 2889 afin de garantir la représentativité du prélèvement. De plus, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les modélisations aérauliques précitées avaient montré que l'hydrogène dégazé se déplaçait vers le fond de la partie utile de l'alvéole avec le flux de ventilation, confortant ainsi le choix d'une mesure en sortie d'alvéole, **ce dont l'IRSN convient**. L'Andra précise que le système de remontée d'alarmes associées permettra la mise en œuvre d'actions correctives en cas de dépassement du seuil fixé à 1 % d'hydrogène dans l'air ou d'arrêt de la ventilation. **En cas de perte de ventilation dans un alvéole en cours d'exploitation, l'IRSN convient de la suffisance du délai de remise en service de la ventilation de 90 jours retenu par l'Andra** (cf. chapitre 4.2.2.3) **pour rétablir les performances de la ventilation ou mettre en œuvre des solutions palliatives le cas échéant**. A cet égard, l'IRSN rappelle que l'usine de ventilation d'air frais d'exploitation (soufflage) n'est pas dimensionnée à la chute d'avion, événement qui pourrait conduire à un délai de remise en service supérieur à 90 jours. Ce point met en exergue l'importance de la démonstration de l'efficacité de solutions palliatives telles que l'entrée d'air *via* les portes de maintenance du chevalement du puits de soufflage d'air frais d'exploitation ou de la tête de descenderie, objet de l'engagement 2024-E25 (cf. chapitre 4.2.2.3). Enfin, l'IRSN note que le cas d'une explosion dans un alvéole consécutif à une perte de la ventilation due à un séisme extrême (ou phénomène induit) est examiné par l'Andra au titre des évaluations complémentaires de sûreté [48] afin d'identifier les dispositions techniques ou organisationnelles permettant de prévenir et de limiter les conséquences d'un tel scénario. A titre d'exemple, l'Andra se fixe ainsi des exigences, suite à un aléa sismique de niveau extrême, d'absence de ruine des systèmes et composants situés sur le cheminement de l'air en aval des alvéoles (ascenseur du puits de soufflage) et de maintien d'au moins un ventilateur d'extraction fonctionnel ainsi que des cheminements d'accès permettant la remise en fonctionnement au plus tôt des autres ventilateurs, **ce qui est satisfaisant**.

S'agissant des opérations de fermeture des alvéoles MA-VL, l'IRSN rappelle en liminaire qu'à l'issue de l'examen du « Jalon 2009 » [14], il recommandait « *d'analyser les risques d'explosion dans ces alvéoles de stockage ainsi que dans les galeries attenantes* » et qu'au stade du DOS [26], il relevait que l'Andra prévoyait à l'échéance de la DAC les résultats d'un programme de travail, qu'il estimait satisfaisant, visant notamment à caractériser les transitoires hydraulique et gaz dans les alvéoles MA-VL non ventilés, à étudier la performance de dispositifs d'inertage et à identifier les caractéristiques d'une explosion afin d'en évaluer les conséquences et les éventuelles dispositions compensatoires.

L'Andra indique [81] que ces opérations de fermeture sont actuellement prévues à la fin du remplissage du quartier de stockage MA-VL dans le scénario de fermeture de référence. La fermeture d'un alvéole MA-VL

⁹⁸ Le volume libre d'un alvéole correspond à la somme des volumes libres d'un alvéole rempli de colis et de sa cellule de manutention.

⁹⁹ Les règles de co-stockage (cf. chapitre 2.4) ne permettent pas le stockage dans un même alvéole des colis C1PG et des colis CFR HAO.

nécessite l'arrêt de sa ventilation et la mise en place de remblais à chacune de ses extrémités (cellule de manutention et galerie d'accès d'un part et galerie de retour d'air d'autre part). Comme indiqué *supra*, la concomitance de présence d'oxygène et d'hydrogène peut entraîner, selon leurs proportions, la formation d'une atmosphère explosive. Lors de la fermeture de l'alvéole, une certaine quantité d'air, et donc d'oxygène, se retrouve ainsi piégée dans l'alvéole, majoritairement dans les jeux fonctionnels de celui-ci (~20 % du volume total de l'alvéole). L'Andra [81] indique que cet oxygène est ensuite consommé suivant différents mécanismes (corrosion des composants métalliques, oxydation de la pyrite des argilites ou encore oxydation de certains déchets ou de la matrice de déchets MA-VL). L'Andra précise que la cinétique de corrosion est pilotée par la disponibilité de l'eau et par le pH dans l'environnement cimentaire (fût primaire, armature des composants cimentaires...) ou argileux (boulons). Selon l'Andra, le temps caractéristique de consommation de l'oxygène peut ainsi varier de quelques années à quelques dizaines d'années en fonction du type d'alvéole et de la proportion respective des surfaces métalliques liées aux armatures ou aux colis.

Parallèlement à ces phénomènes, l'Andra indique que la production de gaz inflammables par les colis MA-VL peut conduire à la formation d'une atmosphère explosive. À cet égard, l'Andra [81] précise que dans les alvéoles contenant principalement des coques et embouts métalliques compactés¹⁰⁰, la production d'hydrogène provient uniquement de la corrosion anoxique et n'intervient qu'après environ 25 ans, temps caractéristique de consommation d'oxygène ; il n'y a donc pas concomitance de présence d'oxygène et d'hydrogène dans ces alvéoles selon l'Andra. Concernant les autres déchets, l'Andra [81] indique que les vitesses de montée en concentration de l'hydrogène sont différentes d'un alvéole à l'autre et qu'en l'état actuel des évaluations, il faut *a minima* une à plusieurs années pour atteindre la LIE (concentration de l'hydrogène dans l'air de 4 %). En particulier, l'Andra précise [81] que dans les alvéoles contenant des colis de déchets bitumés, en l'absence de dispositions spécifiques, la présence d'hydrogène et d'oxygène de façon concomitante est possible après fermeture tant que l'oxygène piégé n'est pas dissous. L'Andra ajoute [81] qu'afin d'éviter qu'une atmosphère explosive puisse se développer dans certains alvéoles, différentes solutions techniques sont actuellement envisagées, l'une d'entre elles consistant à introduire dans les vides technologiques de l'alvéole des consommateurs d'hydrogène permettant d'assurer que sa concentration reste inférieure à la LIE tant que l'oxygène piégé n'aura pas été dissous, sans toutefois les avoir précisées davantage. L'IRSN constate que les éléments présentés par l'Andra dans le DDAC constituent une première estimation globale des transitoires hydraulique et gaz qui suivent la fermeture d'un alvéole MA-VL. **L'IRSN estime que ces transitoires ne sont pas encore suffisamment caractérisés pour apprécier le risque d'explosion. En outre, l'IRSN s'interroge sur l'efficacité et la pérennité des dispositifs de piégeage dans le contexte d'un alvéole MA-VL fermé.**

S'agissant de l'évaluation de la tenue mécanique d'alvéoles MA-VL vis-à-vis du risque d'explosion, l'Andra a présenté une étude suite à la réunion préparatoire du 7 octobre 2024. En première approche, cette étude semble montrer que l'impact de ces scénarios pourrait se limiter au génie civil secondaire des alvéoles, notamment les murs de fond et la zone de support de la dalle supérieure qui selon l'Andra pourraient être renforcés. L'IRSN souligne néanmoins que la manière dont les profils de pression appliqués dans l'alvéole ont été obtenus mériterait un examen approfondi, que l'impact de ces scénarios sur les colis eux-mêmes n'a pas été évalué et que la durée pendant laquelle une température élevée serait présente dans l'alvéole suite à l'explosion a été supposée suffisamment courte pour ne pas avoir d'effet. **L'IRSN constate donc que ces scénarios ne semblent pas remettre en question la sûreté après fermeture à long terme de l'alvéole de stockage, sûreté pour laquelle l'intégrité du génie civil n'est pas requise, mais pourrait compromettre la récupérabilité des colis (cf. *infra*).** Par ailleurs, l'IRSN souligne que la durée pendant laquelle une température élevée serait présente dans l'alvéole suite à une explosion et les conséquences de cette explosion sur l'intégrité des conteneurs de stockage méritent d'être évaluées de manière spécifique, au regard notamment de la maîtrise des risques d'incendie dans les alvéoles dédiés au stockage des colis de déchets bitumés. En effet, le respect du critère de 100°C en peau de colis primaire des déchets bitumés, garant de l'absence d'emballement, repose sur la fonction de protection thermique des conteneurs de stockage renforcés vis-à-vis de l'incendie. En situation d'incendie de référence, l'IRSN rappelle que cette résistance au feu a notamment été évaluée sur la base d'essais sur des colis intègres

¹⁰⁰ Les CSD-C représentent 13 % du volume des déchets MA-VL de l'inventaire de référence de Cigéo.

suivant les caractéristiques de la courbe ISO 834 (rampe de température pendant une heure atteignant plus de 900°C – cf. chapitre 4.3.1.5). **Aussi, l'IRSN considère que l'Andra, dans le cadre de l'engagement 2024-E57 (cf. *infra*), devra s'assurer de l'absence de conséquences d'une explosion dans un alvéole fermé dédié aux colis de déchets bitumés vis-à-vis du risque d'emballement de ces colis.**

L'IRSN relève qu'après l'arrêt de la ventilation d'un alvéole, l'Andra prévoit [82] de réaliser les premières opérations de fermeture en une quarantaine de jours pour isoler la partie utile de l'alvéole et démonter les derniers équipements de la cellule de manutention, durée qu'elle estime inférieure au délai minimal d'atteinte d'une concentration de 1 % d'hydrogène dans l'alvéole (50 jours, cf. *supra*). À cet égard, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'en cas de retards de chantiers lors de ces opérations, la ventilation de l'alvéole pourrait être momentanément rétablie afin d'écarter le risque d'explosion. L'IRSN convient également que l'Andra pourrait utiliser le dispositif de balayage/inertage envisagé pour faciliter les opérations de récupérabilité (cf. chapitre 6.4). Néanmoins, l'IRSN souligne que ces possibilités ne sont *a priori* plus utilisables une fois les remblais mis en place, opération de l'ordre de la semaine nécessitant l'usage d'engins de chantier.

Au-delà des opérations de fermeture, l'IRSN estime que les incertitudes sur l'évolution de l'atmosphère interne d'un alvéole MA-VL après sa fermeture ainsi que les conséquences d'une explosion sur l'intégrité des colis, du génie civil secondaire et des équipements métalliques présents dans l'alvéole (rails du pont stockeurs, fixations diverses, etc.), font également peser une incertitude sur la récupérabilité des colis après cette étape de fermeture.

De manière générale, l'IRSN rappelle que la maîtrise des risques d'explosion dans un alvéole MA-VL fermé requiert en premier lieu la connaissance de l'évolution de leur atmosphère interne après fermeture, puis l'évaluation des conséquences d'une explosion afin, en cohérence avec la démarche de défense en profondeur, d'identifier les dispositions complémentaires, le cas échéant, nécessaires à cette maîtrise des risques. **Aussi, à ce stade, l'IRSN considère que la démonstration de sûreté des opérations de fermeture d'un alvéole MA-VL, ainsi que celle d'un alvéole fermé, n'est pas acquise vis-à-vis des risques d'explosion. L'IRSN estime à cet égard que l'accessibilité de cette démonstration pourrait nécessiter des modifications de modes opératoires ou de conception.**

En conséquence, l'IRSN estime que l'Andra devra fournir, avant le début des opérations de creusement de l'installation souterraine, la démonstration de sûreté des opérations de fermeture des alvéoles MA-VL au regard des risques d'explosion, fondée notamment sur l'évaluation qu'elle prévoit (i) du devenir des gaz dans ces alvéoles non ventilés et (ii) des conséquences d'une explosion dans leur partie utile. Ce point fait l'objet de l'**engagement 2024-E57** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Enfin, l'IRSN rappelle que l'Andra n'envisage pas de démonstrateur d'alvéole MA-VL fermé dans Cigéo à ce stade. L'IRSN estime que la pertinence d'un tel démonstrateur pourrait être réévaluée au regard des enseignements qu'il pourrait apporter et des contraintes qu'il pourrait induire sur l'ensemble du projet Cigéo.

4.3.2.2. Risques liés à la corrosion

Les risques d'explosion liés aux gaz produits par corrosion anoxique des métaux sont principalement présents dans les alvéoles HA ; en effet, bien que certains déchets MA-VL métalliques puissent également produire de l'hydrogène par corrosion, cette production est intégrée dans les débits retenus pour l'étude des risques liés aux gaz de radiolyse (cf. *supra*).

Dans les alvéoles HA, la formation d'hydrogène est liée à la corrosion anoxique de l'acier constituant les conteneurs de stockage et le chemisage de l'alvéole. A cet égard, l'IRSN note que l'Andra a transmis un programme de recherche et de premiers résultats relatifs à cette corrosion, en réponse à l'engagement 2024-E12 pris par l'Andra et à la recommandation n°3 du GPD [4], qui pourront lui être utiles dans son évaluation de la maîtrise de l'atmosphère interne de l'alvéole. Afin de maîtriser les risques d'explosion, l'Andra définit une concentration maximale en oxygène (**CMO**) de 4,8 % garantissant le maintien de l'atmosphère interne de l'alvéole dans le domaine de non-inflammabilité de l'hydrogène. De manière à dégager des marges suffisantes

par rapport à la CMO, l'Andra retient comme objectifs de sûreté une concentration en oxygène de l'atmosphère interne de l'alvéole HA inférieure à 25 % de la CMO (soit 1 % d'oxygène) en fonctionnement normal et dégradé, et inférieure à 75 % de la CMO (soit 3 % d'oxygène) en situations incidentelle et accidentelle. L'Andra précise que ce régime proche de l'anoxie lui permet également de maîtriser le risque de corrosion du conteneur de stockage et du chemisage vis-à-vis de leurs fonctions de sûreté (cf. chapitres 4.2.2 et 6.4). **L'IRSN convient qu'une concentration en oxygène respectant les objectifs retenus par l'Andra permet effectivement de maîtriser le risque d'explosion dans les alvéoles HA.**

S'agissant des dispositions de maîtrise de l'entrée d'oxygène dans l'alvéole HA, l'Andra retient une conception (cf. chapitre 2 du présent rapport) visant à limiter les échanges gazeux en tête d'alvéole qui repose notamment sur une bride métallique équipée d'un joint et boulonnée sur une plaque scellée dans le massif d'accostage de la tête d'alvéole HA, ainsi que sur une membrane étanche aux gaz posée en paroi de galerie sur le pourtour du massif d'accostage de la tête d'alvéole. En outre, l'Andra prévoit d'injecter un MREA dans l'espace annulaire entre le chemisage et la roche. L'Andra précise [83] que la constructibilité de ces dispositifs fait partie des « *incertitudes résiduelles* » au stade du DDAC. Toutefois, l'Andra indique qu'aucun point réhibitoire n'a été identifié à ce stade et précise à cet égard que le programme de démonstrateurs d'alvéoles HA au LSMHM se poursuit (cf. *infra*). Afin de s'assurer de l'efficacité de ces dispositions de conception, l'Andra a réalisé des mesures de teneurs en oxygène dans différentes parties utiles des démonstrateurs HA du LSMHM. Ainsi, pour le démonstrateur dont le concept est le plus proche de celui retenu au stade du DDAC (longueur de 80 m, chemisage avec tronçons emboîtés à l'extrados duquel est injecté un MREA, fermeture par une plaque boulonnée), l'Andra indique que la teneur en oxygène se stabilise autour de 1 % au bout de 750 jours (sans intervention). **L'IRSN convient que les dispositions de conception retenues à ce stade par l'Andra (bride métallique équipée d'un joint, membrane étanche en paroi de galerie, MREA, etc.) devraient, sur le principe, contribuer à la maîtrise de la teneur en oxygène dans les alvéoles HA. Toutefois, l'IRSN note qu'à ce stade leur faisabilité technique n'est pas démontrée. En particulier, l'IRSN considère que les essais réalisés sur les démonstrateurs du LSMHM ne sont pas représentatifs, d'une part du concept d'alvéole qui sera *in fine* retenu par l'Andra (étanchéité de la tête d'alvéole, formulation du MREA, etc.), d'autre part des conditions d'exploitation dans les quartiers pilote et de stockage HA (influence par exemple des phases de chargement des alvéoles).**

Pour surveiller périodiquement les taux d'oxygène et d'hydrogène, l'Andra prévoit un dispositif de prélèvement de l'atmosphère interne de chaque alvéole. Les prélèvements sont réalisés au moyen d'un tube métallique introduit au travers de la bride et guidé jusqu'au fond de l'alvéole par un fourreau percé et fixé par soudage à chacun des tronçons du chemisage, à l'intrados supérieur. Dans le cas d'une concentration supérieure à 1 % d'oxygène, l'Andra prévoit l'inertage de l'atmosphère interne à l'azote pour chasser les gaz (oxygène et hydrogène) présents dans l'alvéole. Cet inertage repose sur le même dispositif que celui prévu pour le prélèvement des gaz mentionné ci-dessus, le tube servant aux prélèvements étant celui par lequel transite l'azote. L'Andra a réalisé au LSMHM de premiers essais¹⁰¹ de prélèvement et d'inertage de l'atmosphère interne d'un démonstrateur d'alvéole vide de 40 m de long, au moyen d'un dispositif expérimental reposant sur l'utilisation de tubes de prélèvement et d'inertage distincts et placés hors du tube guide. L'Andra indique que ce dispositif d'inertage a montré sa capacité à faire baisser la teneur en oxygène dans l'alvéole sous 1 %. A l'instar des dispositions de maîtrise de l'entrée d'oxygène dans l'alvéole HA, l'Andra précise toutefois que « *la capacité à réaliser un alvéole [HA] entièrement équipé, comprenant un dispositif de prélèvement et de balayage et une instrumentation complète d'observation/surveillance (en particulier de l'évolution de l'atmosphère de l'intérieur de l'alvéole)* » constitue une incertitude résiduelle [83] au stade du DDAC. En particulier, l'Andra identifie un risque de décalage des tronçons de fourreau à l'intérieur duquel sera déployé le tube d'inertage, lors de la mise en place des tronçons du chemisage ou ultérieurement sous l'effet du chargement mécanique induit par le Callovo-Oxfordien, qui devra être pris en compte dans sa poursuite du programme de démonstrateurs d'alvéole HA au LSMHM (cf. *infra*). L'IRSN partage l'importance de disposer d'un système de surveillance de l'oxygène et

¹⁰¹ Il s'agit d'essais reposants sur des prélèvements fixes réalisés par des tubulures en polymère thermoplastique (PEEK) positionnées à l'intérieur de l'alvéole mais hors du tube guide.

de l'hydrogène en alvéole HA, complété par un système d'inertage, dans l'objectif de maîtriser son atmosphère interne vis-à-vis du risque d'explosion. L'IRSN souligne toutefois que l'efficacité de tels dispositifs en conditions d'exploitation (représentativité des prélèvements, inertage de l'ensemble de l'alvéole) reste à démontrer à ce stade. En particulier, l'IRSN relève que l'essai réalisé dans un démonstrateur vide de 40 m de longueur, au moyen de dispositifs distincts de prélèvement et d'inertage différents de celui envisagé, ne saurait constituer une preuve de l'efficacité de ce dernier dans un environnement représentatif de l'alvéole HA (présence de colis entravant la circulation des gaz, dispositif unique situé dans un tube guide susceptible de se déformer, exothermicité des colis, etc.). Outre l'efficacité de ce dispositif, l'IRSN considère que sa constructibilité et son opérationnalité durant la phase d'exploitation reste également à démontrer pour un alvéole HA de 150 m chargé de colis. En particulier, l'IRSN observe que ce dispositif repose, pour chaque quartier HA (plusieurs centaines d'alvéole) sur la production centralisée d'azote dans une niche dédiée au début de chaque galerie d'accès, amené jusqu'aux alvéoles via des tubes, et sur une injection contrôlée localement *via* une armoire technique implantée à côté de chaque tête d'alvéole.

Aussi, l'IRSN estime que les éléments fournis à ce stade par l'Andra ne lui permettent pas de disposer de la raisonnable assurance que les dispositions de maîtrise de l'atmosphère interne de l'alvéole HA permettront d'atteindre l'objectif de 1 % d'oxygène, et de le maintenir, au cours de l'exploitation des quartiers de stockage. L'IRSN considère donc qu'à ce stade, selon la conception actuelle de l'alvéole HA vis-à-vis des risques d'explosion, l'accessibilité de la démonstration de sûreté n'est pas acquise.

A cet égard, l'IRSN rappelle [2][26] que des essais en vraie grandeur étaient attendus pour le DDAC afin notamment de valider la technique de construction retenue pour l'alvéole HA, de qualifier les performances de la bride en termes de limitation des échanges d'air avec la galerie d'accès et d'observer les mécanismes de corrosion à l'œuvre dans l'alvéole.

En cours d'instruction, et notamment en réponse à l'engagement 2024-E12 précité, l'Andra a précisé que plusieurs démonstrateurs complets d'alvéole seront construits au LSMHM pendant la phase d'instruction de la DAC et au-delà. Dans un premier temps, trois démonstrateurs de 80 m de longueur seront mis en œuvre sur la période 2024-2027 et équipés d'un dispositif de gestion de l'atmosphère interne (flexible de prélèvement et d'inertage, système de guidage du flexible), préalablement testé sur un banc d'essai en surface. En fonction du retour d'expérience de ces démonstrateurs, intégrant notamment des essais réguliers de déploiement du flexible sur plusieurs années, l'Andra indique que le diamètre du tube guide et/ou son positionnement pourront être optimisés. En outre, l'Andra a indiqué que l'atmosphère interne de ces démonstrateurs fera l'objet d'un suivi (notamment de la cinétique de remontée en oxygène après inertage, intégrant les effets de la température dès le deuxième démonstrateur). Sur cette base, l'Andra prévoit de définir la fréquence de prélèvement de gaz. Le nombre et la localisation des points de prélèvement seront quant à eux définis précisément sur la base d'essais menés sur un banc d'inertage en surface, au cours desquels l'homogénéité de la teneur en dioxygène à l'intérieur de l'alvéole sera évaluée en configuration vide, puis chargée de colis factices. Dans un second temps, l'Andra prévoit de construire, toujours au LSMHM, trois nouveaux démonstrateurs complets de 80 m de longueur dans une galerie de même diamètre que la galerie d'accès du quartier pilote, sur la période 2028-2031. La conception de ces démonstrateurs, qui s'appuiera sur le retour d'expérience des trois premiers, n'est pas définie à ce jour. Enfin, l'Andra a indiqué en cours d'instruction que ce programme visait à aboutir à un démonstrateur d'alvéole HA complet au LSMHM, représentatif du quartier pilote (tenant compte du phasage de réalisation et des optimisations potentielles de la tête d'alvéole et des moyens d'inertage) à l'horizon 2031/2033. **L'IRSN convient que ce programme devrait permettre d'évaluer la faisabilité des dispositions de maîtrise de l'atmosphère interne de l'alvéole HA pendant la phase de fonctionnement. L'IRSN souligne toutefois que les résultats de ce programme pourraient engendrer des modifications de la conception des alvéoles HA en vue d'établir leur démonstration de sûreté à l'horizon de la construction du quartier pilote.**

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra présenter, avant le creusement du quartier pilote HA, les résultats du programme de démonstrateurs d'alvéoles HA et compléter sur cette base la démonstration de sûreté du stockage des colis HA. Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E28](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033

du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Dans le DDAC, l'Andra présente les dispositions lui permettant d'exclure la perte du dispositif d'inertage. L'IRSN relève que ces dispositifs (redondance des centrales de production et raccordement manuel possible avec des bouteilles d'azote) portent exclusivement sur l'approvisionnement en gaz d'inertage (cf. chapitre 4.3.6) alors que la faisabilité et l'efficacité même de ce dispositif n'ont pas été démontrées. L'IRSN note que l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'elle prévoyait de réaliser, à l'échéance 2025-2026, une étude relative à la tenue mécanique des conteneurs de stockage HA dans le cas d'une explosion en alvéole de stockage, sur la base de simulations numériques, **ce qui est satisfaisant au titre de la défense en profondeur pour élaborer la démonstration de sûreté. Il appartiendra à l'Andra, dans les phases ultérieures du projet, de présenter ses résultats d'évaluation des conséquences d'une explosion en alvéole HA et, le cas échéant, de présenter des dispositions complémentaires de limitation des conséquences.**

Dans la conception actuelle, la maîtrise du risque de formation d'une atmosphère explosive après la fermeture d'un alvéole HA, dans le cadre de la fermeture d'un quartier de stockage HA (dispositif de surveillance et d'inertage retiré), est étroitement liée au maintien de la concentration en oxygène sous les objectifs de sûreté retenus par l'Andra. En l'état actuel des connaissances du comportement des gaz dans les phases transitoires et des évolutions possibles de la conception des alvéoles HA, l'IRSN n'est pas en mesure de se prononcer sur l'absence de risque d'explosion d'un alvéole HA ainsi fermé et **estime qu'il appartiendra à l'Andra d'intégrer dans la démonstration de sûreté des alvéoles HA, des scénarios de fermeture et de réouverture d'alvéoles HA.**

4.3.2.3. Autres risques d'explosion

L'Andra indique que les autres risques d'explosion d'origine interne sont liés notamment à la présence de batteries pouvant dégager de l'hydrogène en phase de charge, d'un générateur à rayons X à haute énergie (**RX HE**) implanté dans le bâtiment EP1 ou encore de bouteilles d'acétylène.

S'agissant de la démarche de sûreté, l'Andra précise que la prise en compte des risques d'explosion d'origine interne est évaluée au regard de l'impact potentiel d'une explosion sur les cibles de sûreté présentes dans l'environnement immédiat des sources de dangers. L'Andra retient des dispositions de prévention, de surveillance et de limitation des conséquences conformément au concept de défense en profondeur. Pour ce qui concerne la prise en compte de situations de cumuls, l'IRSN relève que le cumul d'un séisme de dimensionnement suivi d'une explosion ne figure pas formellement parmi les situations du dimensionnement présentées dans la version préliminaire du rapport de sûreté [51]. Toutefois l'Andra indique [51] que, d'une part les scénarios d'explosion retenus n'entraînent aucune conséquence directe sur la sûreté des installations car les zones d'effets potentiels seront suffisamment éloignées des cibles de sûreté ou car le dimensionnement des ouvrages de génie civil prévient les effets potentiels sur les locaux adjacents, d'autre part les dispositions de surveillance/détection ont pour but de détecter l'occurrence d'une atmosphère explosible ou de suivre son évolution, à la suite d'un séisme. Le dimensionnement au séisme des systèmes de surveillance des installations sensibles doit ainsi permettre d'initier des actions afin de prévenir le risque d'explosion à la suite d'un séisme. Cela concerne notamment la surveillance de l'asservissement de la charge des batteries au fonctionnement de la ventilation des locaux. **Ces dispositions sont acceptables sur le principe ; toutefois l'Andra n'a pas précisé les distances d'éloignement prévues, ni justifié que ces dernières sont suffisantes pour maîtriser les effets d'une explosion sur les cibles de sûreté. Aussi, il appartiendra à l'Andra de justifier l'absence d'atteinte des cibles de sûreté en cas d'explosion notamment consécutive à un séisme.** De plus, à l'instar des situations de cumuls d'incendie induit par un séisme du dimensionnement (cf. chapitre 4.3.1.1), **il appartiendra à l'Andra d'inclure, parmi les situations du dimensionnement présentées dans le rapport de sûreté en support à la demande de mise en service de Cigéo, la situation d'une explosion consécutive à un séisme du dimensionnement.**

La charge des batteries des engins de transfert est réalisée, d'une part dans l'ouvrage souterrain dans des locaux dédiés et sectorisés EI 120 (E1 et E13), d'autre part dans le bâtiment EP1 dans les trois sas camion et dans la surcellule du parc à hottes. Les locaux de charge des batteries du réseau d'alimentation sans interruption sont quant à eux situés à différents niveaux du bâtiment EP1 ainsi que, pour l'ouvrage souterrain, dans les recoupes de la

ZSLE, dans les galeries de liaison, dans les galeries d'accès aux alvéoles HA et dans les galeries de retour d'air des alvéoles MA-VL. S'agissant des dispositions de prévention, l'Andra retient notamment le choix de batteries étanches, l'asservissement de la charge au fonctionnement de la ventilation du local où se fait la charge, associé à un renouvellement d'air suffisant pour évacuer l'hydrogène produit lors de la charge et un zonage ATEX autour des zones de charge. En outre, l'Andra indique que les batteries présentes dans l'installation ne sont pas sensibles aux phénomènes d'emballage thermique (exemple des batteries au lithium). S'agissant des dispositions de détection et de surveillance, l'Andra indique que des détecteurs d'hydrogène, permettant d'arrêter automatiquement la charge en cas de détection, sont mis en place et que, outre les asservissements, des rondes de surveillance du fonctionnement de la ventilation sont organisées. De plus, dans l'ouvrage souterrain, les zones de charge des véhicules électriques et des locotracteurs dans la ZSLE sont éloignées du processus nucléaire. S'agissant de la limitation des conséquences, l'Andra indique en particulier que, en cas d'explosion dans les locaux E1 ou E13, la redondance et l'implantation dans les locaux différents des batteries alimentant les récepteurs vitaux du processus nucléaire permettent de conserver une voie d'alimentation électrique, malgré la défaillance potentielle des équipements électriques implantés dans les locaux adjacents. **L'IRSN considère que ces principes sont globalement acceptables.** Toutefois, l'IRSN relève que les locaux de charge de batterie, à l'exception des locaux E1 et E13 de l'ouvrage souterrain, ne sont pas tous systématiquement des locaux sectorisés contre l'incendie malgré les risques d'incendie que présente généralement ce type d'équipement¹⁰². **Il appartiendra à l'Andra, en vue de la demande de mise en service de Cigéo, de justifier l'absence de sectorisation dédiée de certaines zones de charge de batteries.**

L'utilisation dans le bâtiment EP1 d'un générateur RX HE, envisagé pour les contrôles des colis, génère de l'ozone, dont la LIE dans l'air est de 9 % en volume. L'Andra estime qu'une explosion consécutive au dégagement d'ozone pourrait endommager un colis en cours de contrôle. S'agissant des dispositions de prévention, de détection et de surveillance, l'Andra indique notamment que l'ozone dégagé est dilué et évacué par la ventilation, que le fonctionnement du générateur est asservi à celui de la ventilation, que le délai entre deux tirs permet la décomposition de l'ozone¹⁰³ et que la porte d'accès au générateur est fermée et bloquée sur détection d'une concentration en ozone supérieure à 2,5 %. Aucune disposition de limitation des conséquences n'est retenue par l'Andra, qui considère que l'occurrence d'une explosion dans le local RX HE est exclue compte tenu des dispositions de prévention et de surveillance, robustes et diversifiées. L'IRSN relève toutefois qu'en particulier, les concentrations en ozone atteintes en fonctionnement normal ou dégradé ne sont pas présentées, ni les exigences associées aux différentes dispositions de prévention. **L'IRSN considère donc que l'Andra pourrait compléter, en vue de la demande de mise en service de Cigéo, la démonstration du caractère suffisant des dispositions de maîtrise du risque d'explosion d'ozone dans le local du générateur RX HE.**

Enfin, s'agissant de l'utilisation de bouteilles de gaz inflammable (acétylène), l'Andra indique que celle-ci fera l'objet d'un permis de feu en prévention des risques d'incendie associés. Aussi, l'Andra ne retient pas dans sa démonstration de sûreté un scénario d'explosion de bouteille d'acétylène à la suite d'un incendie. A cet égard, l'IRSN souligne que le retour d'expérience montre que les départs de feu malgré l'existence de permis de feu sont nombreux. L'IRSN considère donc que cette disposition organisationnelle n'est pas suffisante pour exclure l'analyse de ce risque. **Il appartiendra à l'Andra de justifier l'exclusion d'un tel scénario, en lien avec l'engagement 2024-E17** (cf. chapitre 3.3.2 du présent rapport). Par ailleurs, l'IRSN relève que l'Andra n'a pas étudié les risques liés à l'usage de bouteilles de gaz inflammables dans le bâtiment EP1. **Il appartiendra à l'Andra de présenter son analyse des risques liés à l'usage de bouteilles de gaz inflammables dans le bâtiment EP1.** Les risques liés à l'utilisation de bouteilles de gaz inflammable dans la zone travaux de l'installation souterraine sont examinés au chapitre 4.3.5 du présent rapport, relatif à la coactivité.

¹⁰² Cela concerne notamment les zones de charge des batteries de traction du bâtiment EP1 qui ne sont pas des locaux dédiés à l'intérieur de 3 sas camion sectorisés.

¹⁰³ L'ozone, très instable, se décompose rapidement en oxygène à température ambiante (durée de vie limitée à 50 min).

4.3.3. Transport et manutention

En liminaire, il convient de rappeler que la DAC de Cigéo n'inclut pas les opérations de transport des emballages contenant des colis primaires depuis les installations d'entreposage jusqu'à Cigéo. Ces opérations devront faire l'objet d'une démonstration de sûreté préalablement à l'expédition des premiers colis, notamment à l'égard de la réglementation du transport sur voie publique. A l'intérieur du périmètre de Cigéo, les opérations de transport de colis de déchets en dehors des bâtiments de surface relèvent d'opérations de transport interne. Lors de ces opérations de réception des emballages de transport et d'acheminement vers l'installation de surface, les colis de déchets sont encore en configuration de transport sur la voie publique (emballages munis de leurs capots amortisseurs). Ces opérations, dans des emballages agréés par l'ASN pour le transport sur la voie publique, ne sont donc pas examinées dans le cadre de la présente expertise.

L'expertise de l'IRSN porte plus particulièrement sur les opérations de manutention au sein des bâtiments de surface de Cigéo et dans l'installation souterraine, jusqu'à la mise des colis en alvéoles. Sont examinés successivement par l'IRSN dans le présent chapitre, la démarche d'analyse de l'Andra, sa mise en œuvre dans les locaux des installations de surface et dans l'installation souterraine, la justification du dimensionnement du génie civil susceptible d'être agressé en cas de chute de charges et enfin le cas particulier du transfert des hottes dans les liaisons surface-fond.

4.3.3.1. Démarche

Les équipements de manutention pour les installations de surface et souterraine ainsi que pour les liaisons surface-fond [35] sont principalement constitués d'équipements de levage (ponts et portiques de manutention, élévateurs, grue vélocipède de manutention), d'équipements de transfert sur rails (par exemple le chariot de transfert dans les galeries de liaison ou encore le funiculaire dans les liaisons surface-fond) et d'équipements spécifiques de mise en alvéole ou de retrait des colis (robots pousseurs et robots tireurs pour les colis HA, ponts et chariots stockeurs pour les colis MA-VL). Dans sa démarche d'analyse des risques de manutention [51][84], l'Andra présente les dispositions retenues pour prévenir, détecter et maîtriser les conséquences des situations de chute et de collision de colis de déchets, les situations de chute de charges sur des éléments constitutifs du génie civil, ainsi que des situations de blocage de la chaîne cinématique de manutention. L'Andra analyse ces situations en considérant les cibles de sûreté contenant des substances radioactives, à savoir les colis primaires et les colis de stockage, ou encore le génie civil susceptible d'être agressé par la chute d'une charge. Enfin, l'Andra prévoit de limiter la manutention des colis de déchets à des hauteurs inférieures à leur hauteur minimale de qualification à la chute issue des spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires¹⁰⁴, à l'exception de certaines opérations effectuées dans le bâtiment EP1¹⁰⁵ et dans la cellule de manutention des alvéoles MA-VL pour lesquelles des mesures spécifiques de type platelage ou matelas amortisseurs sont mises en œuvre.

L'IRSN observe que les chariots et ponts stockeurs des alvéoles MA-VL ainsi que les ponts polyvalents des alvéoles dédiés au stockage des colis de déchets bitumés ont été intégrés à la liste des EIP retenus par l'Andra [49] depuis le DOS. L'IRSN constate ainsi qu'un grand nombre de moyens de manutention, en surface comme dans l'installation souterraine, sont à ce stade retenus comme EIP par l'Andra, **ce qui est satisfaisant** compte tenu de la prépondérance du procédé de manutention dans l'exploitation de Cigéo (nombre de transfert, distances, etc.) et des risques identifiés. L'IRSN note toutefois que les chariots stockeurs dédiés aux colis de stockage de type CS 6¹⁰⁶ en alvéole MA-VL ne sont pas classés EIP, alors que leur fonction et les risques associés sont les mêmes que pour les autres chariots stockeurs. Aussi, **il appartiendra à l'Andra de les classer EIP dans la prochaine révision du rapport de sûreté.**

L'IRSN constate que la démarche d'analyse des risques de manutention élaborée par l'Andra au stade du DOS, et considérée satisfaisante sur le plan des principes à l'issue de l'instruction de ce dossier [26], a été reconduite

¹⁰⁴ 1,20 m pour les colis MA-VL et 9 m pour les colis HA.

¹⁰⁵ Cela concerne (i) la cellule de déchargement des emballages de transport, (ii) la cellule de préparation des colis de stockage, (iii) la cellule de réouverture des colis de stockage MA-VL et (iv) la cellule de préparation aux contrôles hors flux, au sein desquelles les hauteurs de levage peuvent aller jusqu'à notamment la hauteur de l'emballage de transport.

¹⁰⁶ Colis de stockage MA-VL disposant d'un conteneur en acier.

et complétée dans le DDAC. En particulier, l'IRSN observe l'intégration d'éléments constitutifs du génie civil parmi les cibles de sûreté considérées ainsi que la consolidation de la liste des EIP, **ce qui est satisfaisant.**

4.3.3.2. Application de la démarche dans les bâtiments de surface et l'installation souterraine

L'Andra présente [84] les dispositions d'exploitation visant à prévenir le risque de chute de charge, telles que le dimensionnement au séisme (SDD-2016, cf. chapitre 4.4.1.1) des engins de manutention. Sur ce point, l'expertise de l'IRSN s'est concentrée sur trois équipements mécaniques particuliers présentant des enjeux de sûreté particuliers ou dont la conception ne s'appuie pas sur des solutions technologiques conventionnelles ou éprouvées, à savoir le véhicule du funiculaire, les tables et l'élévateur en cellule de manutention MA-VL ainsi que les hottes MA-VL. L'IRSN constate que les exigences de comportement de ces équipements mécaniques vis-à-vis du séisme, telles que le maintien de la stabilité ou le non-basculement de la hotte ou encore la sécurisation du freinage du funiculaire en cas de sollicitations induites par un séisme, ont été définies dans les dossiers de justification des équipements [38][55][85][86] élaborés par l'Andra postérieurement aux notes d'hypothèses de dimensionnement et de prédimensionnement de ces équipements. Les exigences de comportement au séisme ne sont ainsi pas systématiquement définies dans ces notes et les critères de dimensionnement associés à ces exigences ne sont donc pas identiques en fonction des équipements mécaniques. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'elle prévoyait d'élaborer en amont des différentes phases de consultation des entreprises, un référentiel technique regroupant l'ensemble des règles techniques. **L'IRSN considère qu'un tel référentiel technique, dont les points clés sont détaillés en Annexe T17, permettra à l'Andra de maîtriser l'homogénéité des critères de dimensionnement retenus pour la phase ultérieure de conception des équipements mécaniques, ce qui est satisfaisant à ce stade du projet.**

En outre, l'Andra prévoit de munir les moyens de manutention, en surface et en souterrain, (i) de capteurs de vitesse, (ii) de capteurs anticollisions et de fins de course, et pour ceux sur rails, (iii) de systèmes de freinage redondés et indépendants asservis à des dispositifs d'arrêts automatique sur détection d'anomalie permettant de contrôler le ralentissement et l'arrêt des équipements de manière à induire une décélération maximale compatible avec la qualification de la charge manutentionnée. L'Andra retient également des dispositifs (i) de positionnement aux interfaces entre équipements mécaniques (par exemple le cantonnement de l'alimentation électrique pour empêcher le déplacement du chariot de transfert lorsque le funiculaire n'est pas positionné aux interfaces de dépose ou de prise en charge des colis de déchets), (ii) de positionnement par des guides latéraux pour empêcher le risque de chute latérale du colis en cours de transfert ou encore (iii) d'anti-basculement pour les chariots de transferts. L'IRSN constate que l'Andra retient les mêmes principes de prévention des risques liés à la manutention qu'au stade du DOS et qu'elle a poursuivi la déclinaison de ces principes dans le choix des dispositions opérationnelles retenues au stade du DDAC, qui feront l'objet d'études de dimensionnement ultérieurement. **L'IRSN estime que les dispositions prévues par l'Andra vont dans le sens d'une bonne maîtrise des risques liés à la chute de charges.**

Afin de prévenir les risques de blocage de la chaîne cinématique de transfert des colis, l'Andra prévoit de mettre en place un programme de maintenance préventive des équipements de manutention (transbordeurs et chariots porteurs, ponts, hottes, funiculaire, chariots de transfert, robots pousseur et de retrait, etc.) qui sera réalisé dans des zones dédiées¹⁰⁷. Par ailleurs, le déport dans les zones arrière d'éléments de motorisation des chaînes pousseuses¹⁰⁸ a pour objectif de permettre leur maintenance corrective en cas de défaillances. Les éléments de motorisation, de freinage et de levage des engins de manutention seront également redondés afin de limiter les risques de blocage. L'utilisation de systèmes de halage ou de dispositifs déportés de traction ou de poussée devrait permettre, selon l'Andra, le rapatriement des équipements mécaniques bloqués pour les ponts de manutention ou les chariots de transfert notamment. Des dispositifs manuels d'affalement, notamment des hottes, sont prévues par l'Andra en cas de défaillance de la chaîne de levage des équipements de transfert sur

¹⁰⁷ Ces zones dédiées sont des zones de garage, un parc à hotte, des zones dites « arrière », des zones en cellule de manutention, une zone de maintenance en tête de descenderie colis pour le funiculaire ou encore des locaux de maintenance dans le bâtiment nucléaire de surface pour les navettes de surface et dans la zone de soutien logistique exploitation pour les autres moyens de transfert après dépôt du colis de stockage ou de la hotte dans des locaux dédiés.

¹⁰⁸ Chaînes permettant le déplacement des chariots porteurs et des transbordeurs.

rails (navettes de surface, chariots de transfert fond, navettes MA-VL et HA). **L'IRSN estime que ces dispositions sont conformes aux bonnes pratiques et de nature à limiter les risques de blocage de la chaîne cinématique.** Les dispositions de retrait des colis en alvéole sont examinées au chapitre 6.4 du présent rapport.

S'agissant de la surveillance, l'Andra présente [84] les principes de surveillance des principaux équipements mécaniques. Il s'agit essentiellement de surveiller la position et la vitesse de déplacement des équipements, la masse levée et la bonne préhension des charges au moyen de différents capteurs ou contrôles visuels. Sur le plan des principes, l'IRSN estime le choix des paramètres surveillés pertinent. **Sur cette base, il appartiendra à l'Andra de décliner un programme de surveillance en vue de la mise en service de l'installation, précisant les paramètres surveillés, leurs performances attendues et les moyens associés à leur surveillance.**

L'Andra présente par ailleurs [84] des dispositions visant à limiter les conséquences d'une éventuelle chute ou d'une collision. L'Andra indique notamment la mise en œuvre de systèmes de levage hydraulique pour les élévateurs et les équipements de transfert sur rails afin, en cas de défaillance, de permettre un affaissement lent de la table et de la charge manutentionnée jusqu'à une hauteur limitée à une dizaine de centimètres. Comme mentionné précédemment, l'Andra limite également les hauteurs de manutention des colis primaires à leur hauteur minimale de qualification issue des spécifications ou retient des mesures de type platelage ou matelas amortisseurs pour les opérations de manutention réalisées à une hauteur supérieure à la hauteur de qualification précitée. S'agissant du risque de collision, l'Andra précise que les équipements de manutention ont des vitesses de déplacement des charges contrôlées et limitées avec des rampes de décélération à l'approche des différentes zones d'arrêt. En outre, l'Andra indique que les chariots de transfert et transbordeurs sont dimensionnés aux chocs auxquels ils peuvent être soumis afin d'assurer le maintien de la charge manutentionnée lors du choc. Ils sont également munis d'amortisseurs qui, en cas de défaillance des systèmes de freins ou de détection, sont dimensionnés pour limiter le choc à une valeur inférieure à celle de dimensionnement des fixations des hottes sur les moyens de transfert. **L'IRSN estime que ces dispositions sont satisfaisantes sur le plan des principes au stade du DDAC.**

L'IRSN considère, de manière générale, que l'ensemble des éléments découlant de l'application de la démarche d'analyse des risques liés à la manutention dans les bâtiments de surface et dans l'installation souterraine est conforme aux bonnes pratiques. En outre, l'IRSN souligne que l'Andra a réalisé des prototypes à l'échelle 1 de certains équipements mécaniques liés à la manutention des colis de déchets tels que le pont stockeur ou encore la façade d'accostage de la hotte MA-VL. L'Andra prévoit également la réalisation d'un démonstrateur à l'échelle 1 de la hotte de transfert. L'IRSN encourage l'Andra à poursuivre sa stratégie de vérification de l'atteinte des performances des équipements de manutention sur la base d'essais à échelle 1 au plus tôt dans sa démarche de conception de l'installation. **Il appartiendra néanmoins à l'Andra de préciser, une fois l'ensemble des résultats d'essais analysés, les essais restant à réaliser, notamment pendant la phase pilote, afin de qualifier ces équipements.**

4.3.3.3. Eléments du génie civil susceptibles d'être agressés par la chute de charge

L'Andra précise [51] que seuls quelques locaux et cellules d'EP1, où les hauteurs de manutention sont supérieures aux hauteurs de qualifications des charges, sont concernés par une agression potentielle du génie civil par une chute de charge. Les exigences de comportement attribuées aux éléments cibles (dalles et radiers en béton armé principalement) des scénarios de chute de charge retenues par l'Andra sont précisées en Annexe T9 (cf. chapitre 4.1). Pour la justification du génie civil d'EP1 à l'égard de ces exigences, l'Andra indique retenir, dans les locaux et cellules concernés, les cas de chute de charge les plus pénalisants. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que la position du point d'impact sur la dalle a été choisie de manière à être la plus préjudiciable pour le génie civil. Cependant, l'IRSN relève que seule l'hypothèse de chute à plat a été considérée par l'Andra. **Or l'IRSN estime que des configurations de chute inclinées, sur un angle ou sur un coin, potentiellement plus pénalisantes à l'égard notamment de l'exigence de non-perforation et de non-écaillage, sont plausibles.**

Le respect de l'exigence de stabilité est analysé par une approche numérique reposant sur des calculs en dynamique transitoire prenant en compte le comportement non-linéaire des matériaux acier et béton. L'Andra

fixe un critère de déformation maximale des armatures (5 %) et du béton (0,35 %) traduisant un endommagement important des structures impactées, ce qui n'appelle pas de remarque en l'absence d'exigence de supportage (cf. chapitre 4.1.1) qui pourrait impliquer un critère de déformation maximale des armatures plus sévère (1 à 2 % au maximum). L'IRSN estime que cette méthodologie et les vérifications effectuées par l'Andra sont **globalement satisfaisantes**. **L'IRSN considère toutefois que des études de sensibilité sur les paramètres principaux pris en compte dans l'approche numérique de l'Andra (maillage, pas de temps, loi de comportement des matériaux, etc.) devraient être systématiquement réalisées (cf. résultats du benchmark IRIS¹⁰⁹ [87]) pour vérifier le conservatisme des résultats obtenus, notamment à l'égard des critères de déformation maximale retenus pour les armatures et le béton.** Dans la réalisation de ces études, l'Andra pourrait prioriser les cas de charge présentant une marge ne permettant pas de couvrir les incertitudes inférieures à 50 % compte tenu du retour d'expérience du benchmark IRIS pour des calculs non-linéaires transitoires par rapport aux critères de vérification retenus (acier et béton).

S'agissant des effets locaux des chutes de charge (écaillage et perforation), l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les vérifications de non-écaillage à l'aide des formules empiriques usuelles disponibles dans la littérature technique n'ont pas été réalisées à ce stade et que les vérifications de l'absence de perforation ont été effectuées au moyen de calculs numériques, **ce qui est acceptable en première approche pour la non-perforation**, sous réserve d'avoir procédé à des études de sensibilité telles que mentionnées précédemment. En l'absence de telles études, **l'IRSN considère que les justifications de non-perforation sont insuffisantes et que les justifications d'absence d'écaillage doivent être réalisées au moyen de formules empiriques usuelles notamment à l'égard du risque d'agression des EIP présents en dessous ou à proximité des éléments structuraux impactés.**

Aussi, l'IRSN estime nécessaire que l'Andra, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface :

- effectue, pour l'ensemble des cas de chute de charge retenus, des calculs complémentaires prenant en compte des configurations de chute inclinée sur un angle ou un coin ;
- réalise systématiquement des études de sensibilité pour les études du comportement des structures, reposant sur des calculs numériques en dynamique rapide non-linéaire, effectuées à l'égard des chutes de charge ;
- démontre le non-écaillage et la non-perforation des dalles pour chaque cas de chute de charges à l'aide des formules empiriques usuelles. A défaut, en ce qui concerne la non-perforation, l'Andra justifiera l'absence de rupture des armatures en s'appuyant sur une approche numérique plus complète dédiée à la justification de la non-perforation et faisant appel à des études de sensibilité.

Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E39](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

4.3.3.4. Cas particulier des opérations de transfert des hottes dans les liaisons surface-fond

Le transfert des hottes chargées de colis de déchets, depuis l'installation de surface jusque dans l'installation souterraine, est réalisé au moyen d'un funiculaire (cf. description au chapitre 2.5). Le funiculaire est un équipement de manutention tracté par un câble et circulant en ligne droite sur des rails dans la descenderie colis (pente de l'ordre de 12 % sur une distance d'environ 4 km).

L'Andra identifie [84] les risques associés au funiculaire, à savoir : (i) l'emballement du funiculaire lors de son transfert entraînant un choc en gare basse, (ii) le déraillement du funiculaire entraînant sa collision contre les parois de la descenderie, (iii) la désolidarisation de la hotte transportée par le funiculaire ou encore (iv) le risque de blocage de la chaîne cinématique de manutention entraînant l'immobilisation d'une hotte lors de son transfert.

S'agissant des dispositions de prévention associées, l'Andra indique que la hotte est arrimée sur le funiculaire par un système de quatre verrouillages, un pour chaque pied de la hotte, dimensionné pour résister d'une part

¹⁰⁹ Etude comparative des méthodes et outils disponibles pour évaluer l'intégrité d'une structure impactée par des missile (Benchmark IRIS). Les valeurs des déformations plastiques des aciers calculées par les différentes équipes ayant participé au benchmark IRIS présentent une dispersion significative.

aux décélérations maximales du véhicule, d'autre part aux sollicitations sismiques induites par le séisme de dimensionnement. L'Andra précise que le câble est entraîné par deux poulies motrices, chacune dimensionnée pour assurer seule la reprise de la masse du funiculaire chargé d'une hotte. Enfin, l'Andra prévoit un système de freinage redondé asservi notamment à la surveillance de la vitesse du funiculaire et conçu pour résister aux sollicitations induites par le séisme de dimensionnement. Le freinage de la machinerie des poulies est assuré par des freins à pince de service et de secours. En cas de dysfonctionnement du freinage de la machinerie, le freinage est assuré par deux systèmes embarqués sur le funiculaire : le frein d'arrêt d'urgence (freins à mâchoires) et un frein d'arrêt d'ultime secours (freins par affaissement).

L'Andra prévoit également une surveillance particulière du funiculaire, notamment des systèmes indépendants de mesure de sa vitesse en machinerie et sur le véhicule, complétés par un système de détection de survitesse mécanique de type masselotte, un système redondé de détection d'obstacle sur le cheminement du funiculaire ou encore un contrôle régulier de l'état du câble.

S'agissant des dispositions de limitation de conséquences, l'Andra indique limiter la vitesse du funiculaire par des rampes de décélération à l'approche des zones d'arrêt. En outre, l'Andra prévoit en gare basse et haute des butoirs amortisseurs de fin de voies permettant de limiter le choc à une valeur inférieure à 1 g correspondant au dimensionnement précité des fixations des hottes de transfert sur le funiculaire. De la même manière, l'Andra précise que l'énergie des chocs ou des décélérations est compatible avec l'énergie qui résulterait d'une chute des colis MA-VL ou HA de leurs hauteurs de qualification.

L'IRSN note que l'Andra a poursuivi la déclinaison opérationnelle des principes de prévention des risques, de surveillance et de limitations des conséquences dans la descenderie colis, retenus au stade du DOS. Dans ce cadre, l'IRSN avait souligné les efforts substantiels consentis par l'Andra s'agissant des dispositions de sûreté jugées nombreuses, diversifiées et conformes à l'état de l'art en matière de remontées mécaniques. En outre, l'IRSN souligne que l'Andra a réalisé des essais à l'échelle 1 sur un banc d'essais muni d'un véhicule funiculaire afin notamment de tester les performances des systèmes de freinage d'urgence, d'ultime secours et les butoirs amortisseurs, ainsi que le système de contrôle-commande. L'IRSN estime que les résultats de ces essais tendent à montrer la faisabilité des solutions techniques retenues par l'Andra.

4.3.4. Inondation d'origine interne

L'analyse du risque d'inondation d'origine interne au sein des installations de surface et souterraine présentée par l'Andra dans le DDAC repose sur une évaluation, d'une part des quantités d'eau mobilisables en tenant compte des différentes sources (exploitation du stockage, eaux générées par un incident), d'autre part des dispositions retenues pour les maîtriser [51]. Cette analyse des réseaux d'alimentation en eau et de collecte des effluents au sein des installations fait l'objet du présent chapitre. La gestion des eaux d'exhaure des aquifères traversés par les LSF est examinée au chapitre 4.4.2 du présent rapport relatif à l'inondation d'origine externe.

S'agissant des volumes d'eau mobilisables, l'Andra considère soit le volume total de chaque réseau (en considérant de manière pénalisante qu'ils sont totalement remplis alors qu'il n'est pas attendu que ces réseaux soient en charge), soit un volume rempli mais délimité par des vannes lorsque leur présence permet d'assurer une obturation rapide du réseau fuyard. Ainsi, dans l'installation de surface, les volumes enveloppes estimés pour les différents réseaux sont compris entre 2 et 12 m³, hormis pour le réseau d'eau d'extinction incendie estimé à 60 m³ et le réseau d'eaux de chauffage et de refroidissement (ECC/EGL) à 110 m³. Pour ce qui concerne l'installation souterraine, les volumes enveloppes estimés sont compris entre 1 et 35 m³.

Pour analyser le risque d'inondation interne, l'Andra considère les agressions externes (e.g. séisme, chute d'avion), internes (e.g. incendie, choc d'un véhicule) et les défaillances intrinsèques (e.g. vieillissement) susceptibles de porter atteinte aux réseaux d'eau et *in fine* aux EIP. L'Andra indique que les agressions internes et les défaillances intrinsèques ne conduiraient qu'à des fuites très limitées compte tenu notamment des dispositions constructives (choix des matériaux permettant leur résistance à la corrosion et à la fatigue, dimensionnement des réseaux aux normes en vigueur) et d'un programme de maintenance périodique et de jouvence des équipements [51]. Par ailleurs, l'Andra précise que l'ensemble des réseaux des installations de

surface et souterraine (ainsi que les cuves fixes de récupération, cf. *infra*) est dimensionné à un séisme de niveau SDD, hormis certains tronçons des réseaux (eaux de chauffage et de refroidissement ECC/EGL) qui ne sont dimensionnés à un tel séisme que dans les locaux sensibles. Sur cette base, l'Andra ne retient, comme volumes d'eau mobilisables pour l'étude des conséquences associée à un séisme de niveau SDD-2016, que les réseaux ECC/EGL en considérant, de manière pénalisante, l'ensemble du volume de ces réseaux, soit un volume de 110 m³ [88].

L'Andra présente également les principes retenus à ce stade en termes de dispositions de surveillance avec, pour la surveillance des réseaux fluides dans l'installation de surface, la présence de détecteurs de pression ou de débit, de câbles de détection fluides, ainsi que de rondes de surveillance. Pour la surveillance des réseaux dans l'installation souterraine, l'Andra prévoit la mise en place de débitmètres sur les réseaux ouverts, d'un compteur d'eau sur le réseau d'extinction incendie et également de rondes de surveillance [51].

Outre la possibilité de mise en œuvre de sectionnements des réseaux fluides évoqués *supra*, l'Andra a recours, pour limiter les conséquences en cas d'inondation d'origine interne, aux capacités de rétention ainsi qu'à la surélévation des cibles de sûreté (EIP). Ainsi, s'agissant des capacités de rétention, l'Andra s'appuie, pour les installations de surface, sur les systèmes de rétention utilisés pour la récupération des effluents d'extinction incendie (caniveaux, fosses, puisards) pour reprendre les eaux issues d'une rupture des réseaux d'eau survenant à l'intérieur de ces installations. S'agissant des capacités de rétention dans l'installation souterraine, l'Andra s'appuie sur la collecte au moyen de caniveaux implantés dans les radiers des galeries et recoupes techniques et équipés d'un puisard. Les effluents collectés sont ensuite évacués par pompage vers une cuve mobile puis vers les installations de surface en utilisant les dispositifs de gestion des eaux d'exhaure (cf. chapitre 4.4.2 relatif à l'inondation d'origine externe). Enfin, pour ce qui concerne la surélévation des cibles de sûreté¹¹⁰, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que les hauteurs d'eau maximales étaient calculées sur la base des plus faibles surfaces de locaux dans lesquels la plus grande quantité d'eau pouvait être relâchée et ce, sans tenir compte de la présence de capacités de rétention. L'Andra conclut de son analyse que l'élévation retenue pour les cibles de sûreté est adaptée aux niveaux d'eau maximaux estimés sur cette base. L'IRSN constate en effet, d'après les résultats présentés par l'Andra, que dans le cas de la motorisation des ventilateurs d'extraction et de soufflage de l'installation souterraine, qui ne se situent qu'à 30 cm au-dessus du niveau du sol, ces cibles de sûreté restent hors atteinte du niveau maximal d'eau (17 cm) en cas d'inondation interne.

L'IRSN note que l'analyse du risque d'inondation interne présentée par l'Andra présente une amélioration par rapport à celle fournie au stade du DOS, avec notamment le recensement par sources d'eau des situations à risque d'inondation, l'évaluation des volumes d'eau mobilisables et l'identification de dispositions pouvant être mises en œuvre pour maîtriser ces volumes. La démarche proposée par l'Andra pour cette analyse est en outre cohérente avec les préconisations du guide n°13 de l'ASN applicable aux installations de surface. L'IRSN estime ainsi, sur la base de l'ensemble des éléments présentés *supra*, que l'analyse par l'Andra du risque d'inondation interne dans les installations de surface et souterraine de Cigéo est satisfaisante au stade du DDAC.

4.3.5. Coactivité

Les situations de coactivité dans les installations de surface et souterraine au cours de la phase d'exploitation [51] décrites par l'Andra au stade du DDAC sont rencontrées lors de la réalisation d'activités d'exploitation nucléaire simultanément à (i) des travaux de construction d'ouvrages, (ii) la livraison de nouveaux alvéoles (passage en exploitation d'un alvéole MA-VL ou d'un nouveau quartier pour la zone HA), (iii) des opérations de maintenance corrective ou préventive et de jouvence et (iv) de déconstruction des installations de surface ou de fermeture des ouvrages souterrains. L'IRSN constate qu'en sus des situations de coactivité déjà retenues au stade du DOS, l'Andra a identifié la livraison de nouveaux alvéoles et de nouveaux quartiers de stockage comme situation de coactivité avec l'exploitation nucléaire concomitante d'ouvrages, **ce qui est satisfaisant sur le principe.**

¹¹⁰ Colis de stockage, équipements nécessaires à la motorisation, filtres THE, équipements mécaniques de transfert des colis.

S'agissant des risques induits par ces situations, l'Andra identifie les risques radiologiques induits par des agressions sur la zone en exploitation nucléaire (incendie, explosion, collision, émission de projectile, perturbation de la ventilation, perte d'utilités, blocage du procédé de mise en stockage...), les risques sur le fonctionnement de la ventilation induit par les poussières éventuellement générées lors de travaux ainsi que, spécifiquement pour l'installation souterraine, le risque lié à la propagation de vibrations induites par le creusement des ouvrages. L'identification par l'Andra des risques induits par la coactivité **n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN**. Les dispositions qui sont propres à la maîtrise des principaux risques liés aux situations de coactivité, à savoir ceux de collision, d'incendie et d'explosion, sont examinées aux chapitres 4.3.5.1 et 4.3.5.2 ci-après pour les situations de coactivité entre les zones d'exploitation nucléaire et les zones de travaux pour celle au sein de la zone nucléaire.

4.3.5.1. Coactivité entre les zones d'exploitation nucléaire et les zones de travaux

Pour ce qui concerne les installations de surface, l'Andra prévoit des situations de coactivité liées à la construction des bâtiments ETH et EP2 pendant l'exploitation de EP1. L'Andra présente [51] les dispositions de prévention des risques induits par cette coactivité, telles que la construction de ETH et EP2 en tant que « *chantiers clos et indépendants* » et l'arrêt de l'exploitation de EP1 lors des opérations de raccordement avec ETH et EP2. **A ce stade, ces dispositions de prévention n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Pour ce qui concerne les installations souterraines, l'Andra prévoit, comme au stade du DOS, de prévenir les risques de coactivité dus aux travaux de construction en séparant physiquement les activités en zone d'exploitation nucléaire (ZEXP) et les activités en zone de travaux (ZT) (cf. Figure 26), de façon à ce que les activités réalisées dans une zone n'interfèrent pas avec les activités réalisées dans l'autre zone, et ce dans les situations normale, incidentelle ou accidentelle.

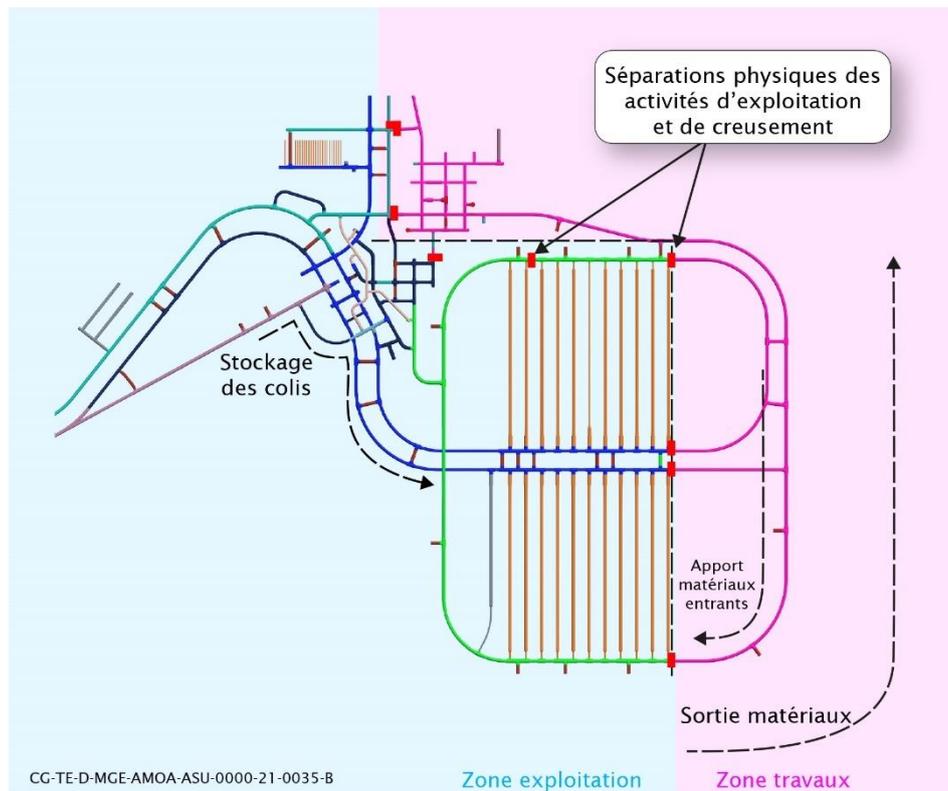


Figure 26. Illustration des interfaces entre les zones en exploitation et en travaux – Quartier de stockage MA-VL [86].

Les réseaux et les flux (ventilation, courants forts, courants faibles, personnels, flux matériels/matériaux exploitation et travaux) sont ainsi physiquement séparés entre ces zones. Cette séparation est matérialisée au stade du DDAC par des sas (un sas par galerie reliant une partie de l'installation en ZEXP et une autre en ZT, y compris au niveau des galeries de retour d'air) équipés de portes de sectorisation et comprenant deux refuges

indépendants pour le personnel (cf. Figure 27). Ces sas sont conçus et exploités pour (i) être infranchissables en situation normale et (ii) permettre l'évacuation du personnel d'une zone à l'autre en cas de nécessité (incidents et accidents). L'un d'entre eux, situé dans la ZSL, est dédié au passage de véhicules.

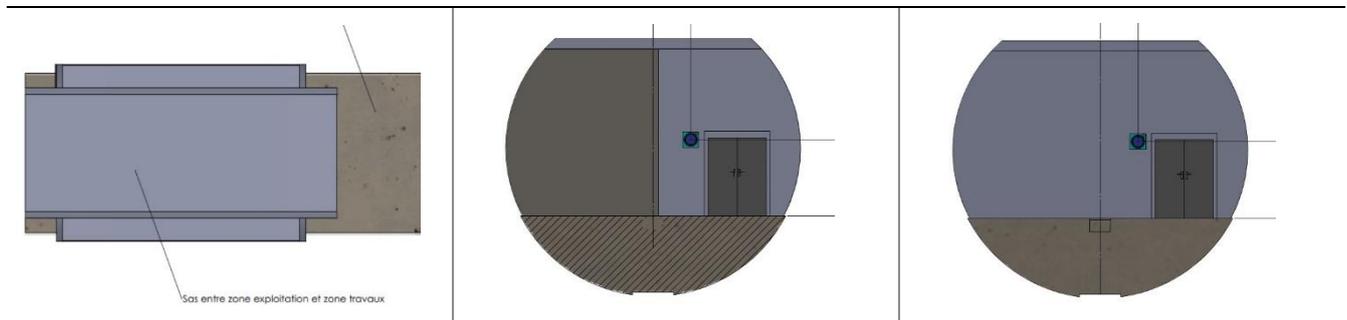


Figure 27. a) Illustration du sas entre la ZT et la ZEX, b) Coupe depuis la ZEXP, c) Coupe depuis la ZT.

L'Andra indique par ailleurs que ces sas sont conçus en tenant compte des risques identifiés dans chacune de ces zones, notamment des risques liés à l'incendie, à l'explosion, aux risques de collision avec des engins circulant en ZEXP et en ZT, ainsi qu'à l'inondation. La conception des sas au regard des risques de collision et des risques liés à l'incendie et à l'explosion est examinée ci-dessous.

S'agissant du risque d'agression du sas par collision, l'Andra précise que les engins se déplacent en ZEXP sur des rails, ce qui lui permet d'exclure ce risque [51]. En ZT, l'Andra indique que les parois des sas doivent être protégées mécaniquement contre les chocs d'engins ou de véhicules, au moyen de blocs de béton ancrés dans le sol. Elle ajoute qu'en cas de nécessité pour les engins d'accéder au plus près des sas, des mesures compensatoires sont prises par des dispositions organisationnelles (vitesse de circulation réduite, limitation de la circulation des véhicules près du sas, marche arrière interdite et interdiction de stationnement dans la zone des interfaces). **Ces éléments n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

S'agissant des risques liés à l'incendie, l'Andra indique qu'en termes de résistance au feu, les parois, portes et traversants des sas donnant sur la galerie de la ZT sont à la fois EI 240 sous incendie conventionnel et EI 120 sous courbe Hydrocarbure Majoré (HCM) et que les parois, portes et traversants du sas donnant sur la galerie de la ZEXP sont EI 240 sous incendie conventionnel. L'Andra précise à cet égard que la température maximale induite par les feux dimensionnants (HCM et conventionnel) retenus couvre celle qui résulte de l'incendie le plus pénalisant (incendie d'un engin de chantier lourd à proximité du sas), d'après les résultats d'une modélisation fournie au cours de l'instruction. Les flux thermiques au niveau du sas (12 kW/m² pour un incendie distant de 30 m du sas et de 7 kW/m² pour un incendie distant de 60 m) sont inférieurs aux flux maximaux de tenue au feu du béton pendant plusieurs heures (20 kW/m²). Les calculs concluent au bon dimensionnement des sas notamment à la courbe hydrocarbure majorée. L'IRSN constate toutefois que les résultats de la modélisation précitée reposent sur des hypothèses fortes en termes de périmètre de sécurité entre le sas et l'engin de chantier. En conséquence, **l'IRSN considère que les dispositions matérielles retenues à ce stade par l'Andra sont convenables et qu'il lui appartiendra de justifier les dispositions organisationnelles de maîtrise des risques afin qu'un incendie prenant naissance en ZT ne puisse pas affecter la sûreté de la ZEXP.**

S'agissant des risques d'explosion, différentes bouteilles de gaz inflammables sont utilisées dans l'installation, notamment des bouteilles d'acétylène pour les opérations de découpe ou de soudure par points chauds, utilisées lors des phases transitoires de livraison d'alvéoles et de quartiers de stockage (raccordement de réseaux et de rails) et de fermeture (démontage des équipements) (cf. ci-dessous). Les dispositions de protection contre l'explosion retenues par l'Andra sont notamment l'arrimage des bouteilles de gaz sur un chariot ou un cadre prévu à cet effet lors de leur transport en souterrain afin de prévenir leur chute, la ventilation des locaux dans lesquels sont utilisées les bouteilles de gaz et la mise en place de dispositifs de sécurité sur les bouteilles (limiteurs de débit ou détecteurs de fuite). L'Andra a indiqué lors de l'instruction qu'au regard des évaluations qu'elle a réalisées, les sas de séparation ZEXP/ZT présents dans l'installation souterraine sont dimensionnés à l'onde de pression résultant de l'éclatement postulé d'une bouteille d'acétylène située en ZT à plus de 5 m de

ces sas et précise qu'une distance minimale d'éloignement de ces sas de 30 m sera maintenue au cours de l'exploitation. L'Andra a précisé que l'exigence de dimensionnement de la partie des sas située côté travaux est de 20 mbar en lien avec cette distance d'éloignement et que les activités nécessitant l'usage de ces bouteilles seront soumises à la rédaction de permis de feu. L'IRSN souligne que les outils de modélisation utilisés par l'Andra (notamment PHAST¹¹¹, méthode multi énergie¹¹², formules du TNO pour modéliser l'éclatement de la bouteille¹¹³) pour déterminer les distances d'éloignement précitées ne sont pas adaptés à des études en milieu confiné. Par conséquent, l'IRSN estime que l'évaluation menée par l'Andra est susceptible de sous-estimer les conséquences des phénomènes étudiés. De plus, la possibilité physique de maintenir une distance d'éloignement de 30 m des sas, notamment pour le soudage des rails sur tout le linéaire de galerie entre la ZEXP et la ZT au cours des phases de livraison d'alvéoles et de quartiers de stockage, n'est à ce jour pas démontrée. **Aussi, il appartiendra à l'Andra d'utiliser des outils d'analyse adaptés aux explosions en milieu confiné et, notamment sur cette base, de vérifier que les dispositions retenues (dimensionnement à la surpression du sas ZE/ZT, périmètre de sécurité autour des sas ZE/ZT) sont adaptées vis-à-vis des risques d'explosion en zone travaux.**

4.3.5.2. Coactivité au sein de la zone d'exploitation nucléaire

Les situations de coactivité au sein de la zone d'exploitation nucléaire sont liées, d'une part aux phases dites transitoires (livraison d'alvéoles nouvellement construits et fermeture d'alvéoles) et, d'autre part à la maintenance et à la jouvence.

S'agissant des phases transitoires, l'Andra indique que les opérations de livraison d'alvéoles nouvellement construits pour le quartier MA-VL (et de nouveaux quartiers pour le quartier HA) impliquent de faire passer des parties de l'installation de la ZT vers la ZEXP, en déplaçant les sas qui les séparent. L'Andra précise dans le DDAC les opérations de construction et de déconstruction, ainsi que les opérations de raccordement de réseaux associées à ce transfert dénommé « basculement »¹¹⁴ [51]. Elle indique, comme au stade du DOS, que ces opérations sont réalisées en considérant un arrêt des opérations de mise en stockage. L'IRSN constate que les travaux de déconstruction de sas et de raccordement de réseaux au sein de la ZEXP lors de la livraison d'alvéoles ne sont pas séparés physiquement des activités de mise en stockage. Concernant les travaux de fermeture, l'Andra ne retient pas de coactivité avec des opérations de stockage de colis de déchets, puisque le scénario de fermeture de référence considère que les opérations de fermeture d'un quartier donné débutent après la fin des opérations de mise en stockage dans ce même quartier. L'IRSN relève néanmoins que de tels travaux, qui incluent des opérations de démontage d'équipements et la mise en œuvre d'engins de chantiers, sont susceptibles d'être réalisés à proximité immédiate d'alvéoles chargés de colis, où des opérations telles qu'un changement de filtre THE ou des activités de surveillance peuvent être conduites. L'IRSN souligne que, lors de ces phases transitoires, des engins de chantiers ainsi que des travaux par points chauds, par exemple de découpe et de soudage, sont mis en œuvre et présentent des risques particuliers à l'égard de l'incendie et de l'explosion. Or, l'IRSN souligne que l'étude des risques liés à l'incendie en zone nucléaire [70] et celle relative aux risques d'explosion n'incluent pas ceux liés à la coactivité pendant les phases transitoires précitées. **Aussi, l'IRSN considère que la maîtrise des risques d'incendie et d'explosion dus aux bouteilles de gaz lors de ces phases transitoires n'est pas démontrée à ce stade. L'IRSN estime ainsi que l'Andra devra démontrer la maîtrise des risques liés à l'incendie et à l'explosion au niveau de la zone d'exploitation pendant les phases transitoires de livraison d'alvéoles (dus notamment aux gaz nécessaires aux travaux de soudure) et de fermeture d'alvéoles (travaux de découpe, mise en place des composants des ouvrages de fermeture...).** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E40](#) de la

¹¹¹ PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) est un logiciel permettant de modéliser la dispersion de produits toxiques ou inflammables dans l'atmosphère.

¹¹² Méthode d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre.

¹¹³ Les formules du TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) utilisées par l'Andra sont relatives aux caractéristiques d'un feu de nuage consécutif à la perte de confinement d'une bouteille ou d'une boule de feu en fonction de la masse de produit participant.

¹¹⁴ Le basculement de la zone travaux à la zone en exploitation passe par trois états distincts : (i) l'état initial qui correspond au moment où il y a la ZEXP d'un côté et la ZT de l'autre séparées par un sas, (ii) l'état intermédiaire qui correspond au moment où il y a trois zones séparées (la ZEXP, la ZT et, entre les deux, la zone en cours d'équipements qui sera livrée à l'exploitation appelée la zone essais) et (iii) l'état final qui correspond au moment du basculement des ouvrages situés dans la zone essais vers la ZEXP.

lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Par ailleurs, les dispositions permettant de garantir l'accessibilité de la zone essais au personnel de secours lors des phases transitoires de livraison d'alvéoles et de fermeture ne sont pas précisées à ce stade. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que le mode opératoire des activités de déconstruction des sas (utilisation des engins de travaux, gestion des flux de personnels et de matériels...) sera défini de manière à préserver l'accès du personnel de secours au chantier de déconstruction. **L'IRSN rappelle l'enjeu associé à l'accessibilité de l'ensemble de l'installation souterraine et considère qu'il appartiendra à l'Andra de prendre en compte la présence potentielle d'engins associée à la phase transitoire de livraison d'alvéoles dans ses études visant à répondre à son engagement 2024-E40.**

S'agissant des situations de coactivité liées à la maintenance, l'Andra identifie principalement le risque d'exposition externe du personnel affecté aux opérations de maintenance dû au procédé nucléaire (présence potentielle de colis de déchets). Afin de maîtriser ce risque lié à la coactivité, l'Andra retient toujours, comme au stade du DOS, la séparation physique et la gestion séparée des flux du procédé nucléaire et des flux liés à la maintenance (matériaux/matériels et personnels), en surface *via* l'implantation de « zones avant ou arrière » adjacentes au locaux du procédé nucléaire (cf. chapitre 4.3.1 relatif aux risques liés à l'incendie), comme en souterrain par l'utilisation de la descenderie de service séparée et indépendante de la descenderie colis ainsi que par le concept bitubes des galeries de liaison MA-VL et d'accès HA reliées par des recoupes. L'Andra prévoit par ailleurs de planifier la réalisation de certaines opérations de maintenance lors des phases d'arrêt de l'exploitation. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que cette planification des opérations vise à prévenir le croisement de flux en lien avec la maintenance avec la hotte de transfert de colis de déchets pour limiter l'exposition externe du personnel, ainsi que l'occurrence de collisions en ZSLE au niveau du carrousel en pied de descenderie service et en galeries de liaison. **L'IRSN estime que ces principes sont suffisants au stade du DDAC.**

S'agissant des travaux de jouvence¹¹⁵, l'Andra indique comme au stade du DOS qu'ils seront réalisés durant les périodes d'arrêt de l'exploitation et qu'il n'y a donc pas de situation de coactivité. Elle précise que des travaux de jouvence, qui pourraient être rendus nécessaires dans certaines parties de l'installation (par exemple, au sein d'un quartier de stockage), conduiraient alors à interrompre le procédé de stockage dans les autres quartiers. L'IRSN considère, à l'instar des opérations de fermeture (cf. *supra*), que des travaux de jouvence pourraient se dérouler à proximité d'alvéoles chargés de colis de déchets et que le même type de dispositions que celles appelées au titre de la maîtrise des risques liés aux phases transitoires pourraient être mises en œuvre.

4.3.6. Perte d'auxiliaires

Le présent chapitre porte sur les risques liés à la perte d'alimentation électrique, la perte d'approvisionnement en eau nécessaire à l'extinction incendie, la perte d'air comprimé et la perte des centrales de production d'azote ; les risques liés à la perte de la ventilation sont examinés au chapitre 4.2.2.3 du présent rapport relatif au confinement dynamique.

Pour ce qui concerne les risques liés à la perte de l'alimentation électrique, l'Andra présente dans le DDAC [51] leurs origines et les équipements impactés (essentiellement ceux de la ventilation, de transfert des colis, de contrôle commande dont les clapets coupe-feu et de surveillance de l'installation). L'Andra a précisé les dispositions de prévention, de surveillance et de limitation de conséquences identifiées au stade du DOS. S'agissant des dispositions de prévention, l'Andra retient une distribution de l'alimentation haute et basse tension par deux voies d'alimentation normales indépendantes et redondées. De plus, en cas de perte de l'alimentation normale, l'Andra prévoit une alimentation secourue notamment pour le PCS et le PCC, le réseau de ventilation d'extraction C2/C4** du bâtiment EP1, le réseau de soufflage et d'extraction de la ventilation nucléaire de l'installation souterraine, les engins de manutention des colis de stockage, les équipements permettant la détection et la mise en sécurité vis-à-vis du risque incendie. Cette alimentation secourue est

¹¹⁵ L'Andra la définit comme le remplacement programmé d'un équipement (ou d'un ensemble d'équipements) réalisé afin de pallier son vieillissement et de maintenir sa fonction opérationnelle.

assurée par un ensemble de groupes électrogènes et de dispositifs d'alimentation sans interruption redondés. L'Andra prévoit aussi de séparer géographiquement les bâtiments abritant les deux voies d'alimentation normales et les différents systèmes de secours. S'agissant des dispositions de surveillance, l'état des composants constituant le réseau électrique est suivi à travers le système de gestion technique électrique¹¹⁶ qui permet également la détection de potentiels défauts sur les réseaux électriques. S'agissant des dispositions de limitation des conséquences, l'Andra s'appuie sur le système de gestion technique électrique pour notamment reconfigurer le réseau, mettre en fonctionnement les groupes électrogènes ou encore le délestage/relestage de l'alimentation lorsque nécessaire. **L'IRSN estime que les dispositions de prévention, de surveillance et de limitation des conséquences d'une perte d'alimentation électrique ont été complétées de façon satisfaisante depuis le DOS.**

Pour ce qui concerne la perte d'approvisionnement en eau nécessaire à l'extinction incendie, l'Andra rappelle que les réseaux d'extinction incendie sont des réseaux utilisés comme dispositions de limitation des conséquences vis-à-vis d'un incendie, mais qu'ils ne participent pas directement à la réalisation et au maintien d'une fonction de sûreté. L'Andra retient les mêmes dispositions qu'au stade du DOS, notamment la redondance des sources, des réserves et des réseaux d'eau disponibles pour les installations de surface et les zones travaux et exploitation de l'installation souterraine. **L'IRSN n'a pas de commentaire sur ce point.**

Pour ce qui concerne les risques liés à la perte d'air comprimé, l'Andra précise que celle-ci pourrait dégrader le fonctionnement de certains actionneurs d'équipements associés notamment à l'utilisation des robots pousseur et tireur dans les alvéoles HA et à l'alimentation en air des joints gonflables assurant l'étanchéité de certains systèmes de fermeture des cellules ou des façades d'accostage (hotte MA-VL notamment). Les dispositions de prévention, de surveillance et de limitation des conséquences reposent notamment sur (i) des réserves tampon permettant d'assurer le maintien en pression des joints pour une durée de six heures, laissant le temps selon l'Andra de mettre l'installation à l'état sûr (affalage des charges et arrêt des opérations à risques) ou, si besoin, de mettre en place des systèmes portatifs pour réalimenter les joints gonflables et (ii) la possibilité d'intervention manuelle sur les moteurs pneumatiques et les actionneurs. S'agissant du risque de perte d'air comprimé lors des opérations liées à l'utilisation des robots pousseur et tireur, l'Andra a précisé que cela impliquerait un blocage du colis dans une position transitoire mais ne présenterait pas un risque pour la sûreté de l'installation. Il est en outre possible d'intervenir manuellement sur le système à l'aide d'un outillage électrique. **Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

Pour ce qui concerne les risques liés à la perte des centrales de production d'azote, l'Andra précise que ce risque pourrait conduire à l'apparition d'une atmosphère explosive en alvéole HA (cf. chapitre 4.3.2.2). S'agissant des centrales de production d'azote situées en installation souterraine au niveau de chaque sous quartier HA ou au niveau de la galerie d'accès du quartier pilote HA, l'Andra a précisé en cours d'instruction qu'elles intègrent une redondance électrique afin d'exclure une perte simultanée de la fonction d'inertage pour tous les alvéoles HA. De plus, l'Andra indique que chaque centrale est elle-même redondée afin d'exclure la perte de production d'azote à l'échelle d'un sous quartier ; les centrales d'azote sont par ailleurs accessibles en galerie et maintenables en cas de perte d'alimentation électrique. L'Andra précise également qu'en cas de perte ou de défaillance du réseau de production et de distribution d'azote, l'inertage des alvéoles HA pourrait, dans un délai court, être temporairement réalisé manuellement au moyen de bouteilles de gaz mobiles à raccorder sur le tube de prélèvement et d'inertage situé à l'intrados de l'alvéole HA, via la bride métallique. L'IRSN note le caractère redondant et la possibilité d'intervenir en local par un travailleur mais estime difficilement réalisable l'inertage manuel sur un grand nombre d'alvéoles. Aussi, **l'IRSN estime que la permanence de l'alimentation possible en azote constitue un élément de sûreté important dans l'installation et qu'il appartiendra à l'Andra de démontrer la capacité d'un travailleur à inerte un grand nombre d'alvéoles HA dans des délais compatibles avec le respect du critère de 1 % d'oxygène.**

¹¹⁶ Système Numérique de Contrôle-Commande (SNCC) qui a pour but de surveiller et de contrôler les installations électriques à des fins notamment de sécurité et de disponibilité de l'énergie.

4.4. Agressions d'origine externe

4.4.1. Séisme

Le présent chapitre porte sur les éléments relatifs à la définition par l'Andra de l'aléa sismique en phase d'exploitation puis sur la résistance du génie civil aux sollicitations sismiques.

4.4.1.1. Aléa sismique

Pour ce qui concerne l'aléa sismique en phase d'exploitation, les éléments présentés par l'Andra au stade du DDAC [36][51][89][90] sont globalement similaires à ceux déjà instruits par l'IRSN dans le cadre du DOS.

L'examen du DOS avait notamment conduit l'Andra à présenter en 2019 sa prise en compte de l'incertitude associée à l'aléa sismique en vue de l'évaluation du comportement sismique des installations, en anticipation du DDAC. L'expertise de ce dossier, qui fait l'objet de l'avis IRSN n°2021-00071 du 28 mai 2021 [91], a porté d'une part, sur les incertitudes pesant sur les niveaux des séismes majorés de sécurité (SMS)¹¹⁷, notamment par une prise en compte conservative des caractéristiques du séisme de Clairvaux et de l'état de l'art relatif à la prédiction du mouvement sismique et, concernant l'installation souterraine d'autre part, sur l'évaluation de l'évolution de ce mouvement avec la profondeur. Les éléments produits par l'Andra en réponse aux demandes de l'ASN formulées à l'issue de cette expertise [92], notamment ceux concernant les mises à jour de l'évaluation déterministe de l'aléa et du spectre de dimensionnement (SDD) [89], ont été présentés au cours de l'instruction du DDAC. La première partie du présent chapitre concerne l'analyse par l'IRSN de l'évaluation déterministe de l'aléa sismique, en particulier concernant (i) la mise à jour des caractéristiques du séisme de Clairvaux, (ii) l'exploration des incertitudes sur les spectres d'aléa sismique et (iii) l'estimation de la fonction de transfert du mouvement sismique en profondeur. La seconde partie présente l'analyse par l'IRSN de l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique (PSHA) réalisée par l'Andra en 2016 et le niveau d'aléa ECS qu'elle retient.

Evaluation déterministe de l'aléa sismique

Pour rappel, la RFS 2001-01 [93] précise les étapes de la démarche à suivre pour élaborer les SMS. Elle consiste à définir un zonage sismotectonique (par exemple, [94]) pour sélectionner les séismes de référence à partir de la base de données de sismicité historique de la France métropolitaine (base SisFrance¹¹⁸). Les séismes de référence retenus dans chaque zone sont ensuite translatés au plus près du site. Le séisme de référence ayant l'impact le plus fort au site est retenu comme étant le séisme maximum historiquement vraisemblable (SMHV). Dans certaines configurations, plusieurs séismes peuvent être retenus. L'intensité macrosismique au site et la magnitude de ce séisme sont ensuite majorées, respectivement de 1 degré et de 0,5, pour définir le SMS. La magnitude et la profondeur des séismes historiques sont déterminées à partir des informations sur les intensités. Les spectres de réponse de ces séismes (SMHV et SMS) sont calculés avec la loi de prédiction du mouvement sismique définie par la RFS 2001-01. Enfin, la RFS 2001-01 préconise que le spectre retenu pour définir l'aléa ne pourra pas être inférieur à un spectre minimal forfaitaire (SMF) calé en accélération à 0,1 g à la fréquence infinie.

Mise à jour des caractéristiques du séisme de Clairvaux

Lors de l'examen du dossier transmis en 2019 par l'Andra, l'IRSN avait souligné la cohérence des caractéristiques retenues par l'Andra pour les SMHV des séismes de référence (Bitche, Metz, Bligny, Wavignies, Remiremont et Bâle) avec les connaissances actualisées en matière de géologie et de sismologie, à l'exception du séisme de Clairvaux. Suite à une demande de l'ASN [92], l'Andra s'était notamment engagée à mettre à jour son étude de l'aléa sismique de Cigéo en phase d'exploitation en intégrant notamment des caractéristiques épicentrales¹¹⁹ plus conservatives du séisme de Clairvaux (1733) telles qu'elles peuvent être déduites des connaissances disponibles. Dans le DDAC, pour calculer la magnitude et la profondeur de ce séisme et les incertitudes associées,

¹¹⁷ Les SMS permettent de déterminer le spectre de référence en phase d'exploitation, sur la base duquel est défini le spectre de dimensionnement de l'installation.

¹¹⁸ SisFrance : base de données de la sismicité historique de la France. <https://www.sisfrance.net/>

¹¹⁹ Couples de valeurs de la magnitude et de la profondeur des séismes.

l'Andra a intégré les dernières connaissances disponibles (base SisFrance et [95]) ainsi que divers modèles d'évolution de l'intensité avec la distance, la magnitude et la profondeur des séismes (modèles IPE¹²⁰). La magnitude d'ondes de surface (**Ms**) qui résulte de cette étude est de 4,7+/-0,5 avec une profondeur (H) de 12 km (la magnitude de moment (**Mw**) est de 4,8+/-0,5 avec H de 13 km) [89].

Dans son évaluation menée pour établir le catalogue paramétrique en magnitude et profondeur des séismes historiques de la base SisFrance, l'IRSN obtient une profondeur similaire (12 km) mais une valeur de Ms égale à 5,0, associée à un écart-type près, à un intervalle Ms 4,7 – Ms 5,2, et ainsi potentiellement supérieure à celle estimée par l'Andra. Cet écart sur la valeur de Ms peut être imputé aux différences entre les IPE de l'Andra et de l'IRSN et au traitement des intensités « ressenties » [96]. Compte tenu des incertitudes précitées sur les valeurs de magnitude, l'estimation de l'Andra apparaît néanmoins cohérente avec les données disponibles.

Exploration des incertitudes au niveau SMS en vue du dimensionnement de Cigéo

A l'issue de l'instruction du dossier transmis en 2019, l'ASN avait demandé [92] à l'Andra, pour établir le spectre des SMS de Cigéo, de tenir compte de l'évolution de l'état de l'art relatif à la prédiction du mouvement sismique, celui-ci pouvant conduire à un spectre enveloppe de celui obtenu par la loi de prédiction de la RFS 2001-01, notamment pour les hautes fréquences. L'Andra s'était notamment engagée à mettre à jour les équations de prédiction du mouvement sismique. L'ASN lui avait également demandé de revenir à l'approche développée dans le DOS pour quantifier les incertitudes au niveau SMS, en tenant compte de cet état de l'art, afin de définir un SDD de Cigéo en phase d'exploitation présentant suffisamment de marge vis-à-vis des incertitudes relatives à la définition de l'aléa sismique. En réponse à cette demande, l'Andra s'était engagée à réaliser une analyse de sensibilité de la conception sur la base de laquelle elle pourrait justifier la robustesse de la conception et identifier les éventuels besoins de renforcement du dimensionnement des ouvrages et équipements [92][97]. Le spectre retenu par l'Andra au stade du DOS pour le dimensionnement des ouvrages de la phase d'exploitation est appelé dans la suite du rapport « SDD-2016 ».

Au stade du DDAC, l'Andra a réalisé un calcul de spectres SMS alternatifs fondé sur l'exploration des incertitudes sur les valeurs des magnitudes et profondeurs des séismes de référence, en considérant quatre zonages et huit équations de prédiction du mouvement sismique (GMM¹²¹) [89][98][99]. Ce calcul comporte plusieurs étapes, dont la première est la définition des caractéristiques Mw-H des séismes de référence. Il est à noter que l'utilisation de Mw est liée à l'application de GMM plus récentes que celle définie dans la RFS 2001-01. Dans les étapes suivantes, l'Andra explore la variabilité autour des valeurs Mw-H définissant ainsi plusieurs scénarios. Pour chacun de ces scénarios, elle applique huit GMM et effectue une moyenne des spectres ainsi obtenus. L'Andra aboutit ensuite aux distributions des spectres d'aléa et des percentiles associés pour chaque zonage. La dernière étape consiste à effectuer une moyenne des percentiles des distributions calculées pour chaque zonage. L'Andra compare le SDD-2016 [89] à la valeur moyenne des percentiles 75 issue de ce calcul. Sur la base de cette comparaison, l'Andra définit le SDD-2023 en intégrant une augmentation du SDD-2016 au-delà de 10 Hz (allant jusqu'à 20 % au-delà de 12 Hz) (Figure 28).

¹²⁰ Intensity Prediction Equation – Modèle d'évolution de l'intensité avec la distance, la magnitude et la profondeur des séismes.

¹²¹ Ground Motion Model – Modèle ou équation de prédiction du mouvement sismique.

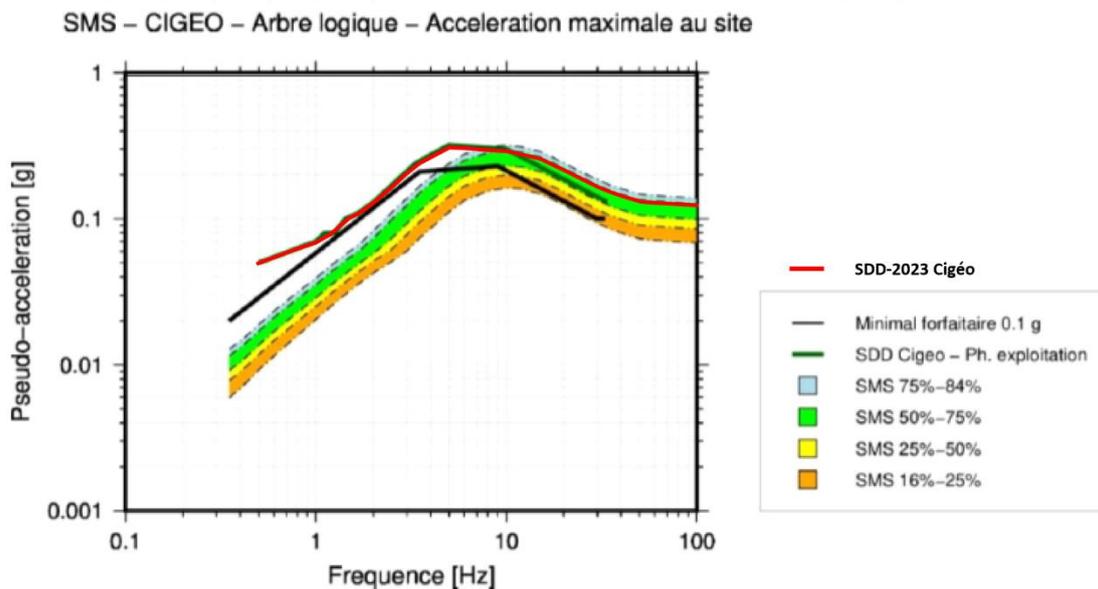


Figure 28. Exploration des incertitudes au niveau SMS par « arbre logique », d'après la figure 4.1 du rapport [98] de l'Andra. Figure modifiée par l'ajout du SDD-2023 (en rouge), enveloppe du SDD-2016 (en vert) et du percentile 75.

L'évaluation du SDD-2023, envisagé par l'Andra comme nouveau spectre de dimensionnement, appelle les remarques suivantes.

L'IRSN estime que l'exploration des incertitudes sur les valeurs de magnitude et de profondeur des séismes de référence, la sélection de zonages et la sélection de GMM de l'Andra **est satisfaisante**. En outre, le choix d'un percentile 75 pour définir ce SDD-2023 apparaît comme acceptable dans le cadre de cette analyse spécifique de l'exploration des incertitudes sur les SMS.

L'IRSN émet cependant des réserves sur les valeurs des M_w des SMS calculées par l'Andra. Pour obtenir la magnitude des SMS en M_w , l'Andra a choisi de s'appuyer sur une double conversion des échelles de magnitude (passage de M_w à M_s par une première conversion, majoration de 0,5 de la M_s et retour à M_w par une deuxième conversion) qui conduit à une majoration de la M_w du SMHV de 0,35 pour passer au SMS [98]. L'Andra a justifié au cours de l'instruction ce choix par la cohérence avec la pratique réglementaire, fondée sur une majoration de 0,5 de la M_s et non de la M_w . L'IRSN rappelle que la majoration de 0,5 de la M_s a été retenue dans la RFS 2001-01 pour rendre compte d'une augmentation d'un degré d'intensité entre le SMHV et le SMS. Ainsi, pour respecter cette pratique réglementaire, le calcul de la M_w associée aux SMS devrait être effectué en majorant d'un degré les valeurs d'intensité macrosismique. L'IRSN relève que l'Andra dispose pour chaque séisme de référence des caractéristiques M_w -H estimées sur la base des intensités macrosismiques [98], à l'image du travail réalisé pour le séisme de Clairvaux. Pour rappel, dans son étude de 2016 [100] instruite au cours de l'examen du DOS, l'Andra avait majoré les M_w de 0,5 pour le calcul des spectres d'aléa. L'IRSN estime que la majoration de la M_w du SMHV de +0,5 apparaît comme une méthode plus directe pour le passage au SMS et devrait être retenue par l'Andra à défaut d'une étude utilisant la majoration de 1 degré des intensités.

L'IRSN émet également des réserves sur la propagation des incertitudes dans le calcul de l'Andra, notamment sur le fait de retenir la moyenne des prédictions du mouvement sismique issues des huit modèles (qui ne permet pas de propager les incertitudes explorées) et la moyenne des percentiles dans chaque zonage. Sur ce dernier point, l'IRSN souligne que la moyenne des percentiles 75 des distributions issues des différents zonages ne correspond pas aux percentiles 75 de la distribution obtenue en considérant tous les spectres issus de l'exploration d'incertitude dans les quatre zonages. De facto, la méthode de l'Andra revient à réduire la variabilité associée à l'aléa sismique et à biaiser l'évaluation de la marge du SDD vis-à-vis des incertitudes relatives à la définition de l'aléa sismique.

L'IRSN a conduit sa propre analyse du SDD-2023 vis-à-vis de la distribution de spectres SMS issues de la propagation des incertitudes sur les scénarios ramenés au droit du site pour chacun des quatre zonages (Annexe T18). Ces scénarios sont ceux qui impactent particulièrement la gamme des plus hautes fréquences (au-delà de 5 Hz, notamment les séismes de Clairvaux et de Bitche).

Dans son analyse des incertitudes, l'IRSN s'est appuyé sur les mêmes hypothèses que l'Andra en matière de GMM et a utilisé les paramètres de distance, profondeur, Mw des SMHV et autres paramètres variables définis par l'Andra. En revanche, l'IRSN a défini les Mw des SMS en majorant de 0,5 celles des SMHV et calcule directement les percentiles associés à la distribution de spectres ainsi obtenue en ne faisant aucune moyenne des GMM ni des distributions issues de chaque zonage. La Figure 29 présente le résultat de cette analyse.

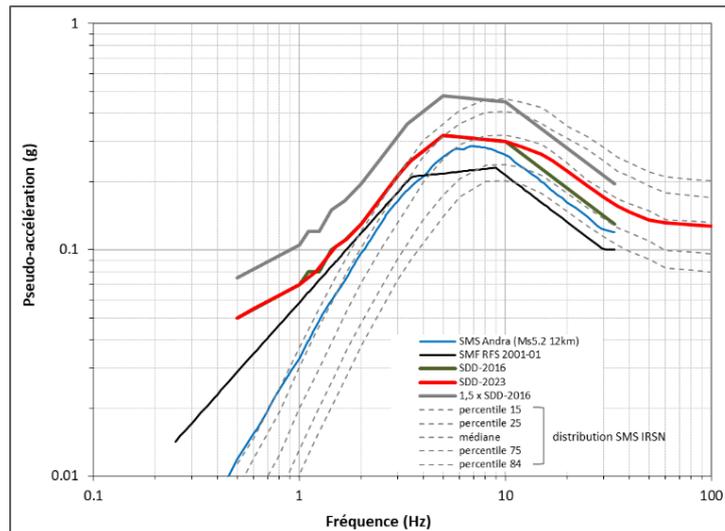


Figure 29. Exploration des incertitudes au niveau SMS selon les hypothèses de l'IRSN. Voir la légende sur la figure. Le spectre 1,5 x SDD-2016 correspond à l'évaluation par l'Andra de la robustesse de l'installation à une majoration de 50 % du SDD-2016.

L'IRSN relève qu'au-delà de 7 Hz, le SDD-2023 se situe au niveau de la médiane de la distribution des spectres SMS qu'il a calculés. En revanche, le spectre 1,5 x SDD-2016, qui correspond à l'évaluation par l'Andra de la robustesse de l'installation à l'aléa sismique par une majoration de 50 % du SDD-2016 (cf. chapitre 4.4.1.2 du présent rapport), se situe au-delà du percentile 84 jusqu'à 10 Hz, puis voisin du percentile 75 au-dessus (Figure 29).

En conclusion, il apparaît ainsi que l'Andra a mené une exploration des incertitudes tenant compte notamment des séismes de Bitche et de Clairvaux et de la prédiction du mouvement sismique. L'IRSN relève néanmoins que la méthode de l'Andra comporte deux hypothèses concernant d'une part la majoration des Mw et, d'autre part, le recours aux moyennes des GMM dans chaque zonage et des percentiles sur les différents zonages, qui conduisent à sous-estimer le niveau du percentile 75 qu'il retient en référence pour définir un nouveau niveau de SDD. **L'IRSN considère dès lors que le SDD-2023 retenu par l'Andra reste insuffisant pour couvrir les incertitudes relatives à la définition de l'aléa sismique.**

Néanmoins, les calculs menés par l'IRSN montrent que, sur toute la plage de fréquence, le niveau 1,5 x SDD-2016, retenu par l'Andra pour vérifier la robustesse de l'installation, se situe au-dessus ou à proximité du percentile 75 de la distribution issue de la propagation plus complète des incertitudes associées aux scénarios ramenant les séismes de Clairvaux et de Bitche au droit du site. **Le niveau 1,5 x SDD-2016 permet donc d'après l'IRSN de couvrir les incertitudes relatives à la définition de l'aléa sismique.** Ce point est repris après l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique ci-dessous.

Transfert du mouvement sismique en profondeur

A l'issue de l'instruction du dossier de l'Andra transmis en 2019, l'ASN a demandé à l'Andra de :

- consolider les fonctions de transfert (**FT**) du mouvement sismique entre surface et profondeur, par fréquence et profondeur retenues, en s'appuyant par exemple sur davantage de stations de mesures en surface et en profondeur, et en complétant les résultats obtenus par de la modélisation numérique ;
- et de présenter annuellement les séismes enregistrés par les capteurs sismiques, les formes d'ondes acquises aux différents capteurs sismiques et les FT calculées sur la base des enregistrements acquis à date.

En réponse à ces demandes, l'Andra s'est engagée à compléter l'étude de la variabilité de la FT sur la base des enregistrements réalisés au LSMHM aux profondeurs intermédiaires, à étudier la faisabilité de mise en place d'un outil de calcul des FT à l'échelle de toute l'installation souterraine et à préciser dans le plan de développement de l'INB, le programme d'implantation de nouvelles stations de mesures à différentes profondeurs et en surface [92][97].

Depuis cette instruction, plus d'une centaine de séismes enregistrés exploitables supplémentaires [101] ont permis à l'Andra de consolider l'estimation de la moyenne de la FT entre le fond du LSMHM et la surface sur une large gamme de fréquences (de 0,5 à 15-20 Hz). L'Andra estime ainsi que les mouvements en profondeur sont en moyenne plus faibles que ceux en surface sur une large gamme de fréquence même s'il existe une variabilité entre les différents enregistrements individuels. Les données disponibles à date ont aussi permis à l'Andra d'évaluer la sensibilité de la FT aux différentes hypothèses de calcul et paramètres sismologiques. Cependant, l'Andra indique que l'interprétation de la FT nécessite davantage de mesures et retient donc à ce stade une absence d'atténuation des mouvements sismiques avec la profondeur (FT=1), **ce que l'IRSN estime satisfaisant en l'état des connaissances**. L'Andra prévoit de poursuivre, comme demandé par l'ASN, les mesures en profondeur, leur analyse et leur consignation dans les bilans annuels. Par ailleurs, afin de transposer la FT établie au niveau du LSMHM à l'échelle de la ZIOS de Cigéo, l'Andra prévoit de mettre en œuvre un programme de développement d'un outil numérique fondé sur l'acquisition de nouvelles données (mise en place de 3 à 4 nouvelles stations de mesures), puis de réaliser des modélisations, à l'échelle du Laboratoire puis de la ZIOS [36][89], à l'horizon 2030.

L'IRSN estime que l'Andra conduit un travail d'analyse rigoureux des données sismologiques à disposition à date, et partage les conclusions selon lesquelles il faut poursuivre les mesures et les analyses pour interpréter les caractéristiques de la FT. De plus, l'IRSN considère que le programme de développement de l'outil numérique proposé par l'Andra est pertinent.

Evaluation probabiliste de l'aléa sismique

Dans le contexte de réglementation actuelle applicable aux INB (e.g. RFS 2001-01), les méthodes probabilistes sont utilisées comme un outil d'estimation de l'aléa complémentaire aux méthodes déterministes. Ainsi, pour ce qui concerne Cigéo, l'ASN a demandé à l'Andra, à l'issue de l'examen des « Commentaires de l'Andra sur le rapport de l'IEER », de mettre en œuvre une estimation probabiliste de l'aléa sismique pour fournir un éclairage sur la période de retour des spectres déterministes. L'Andra avait réalisé en 2016 un calcul d'aléa probabiliste [101]. Dans le cadre du DOS, l'IRSN avait considéré que cette évaluation probabiliste répondait à la demande de l'ASN mais avait émis des remarques [26] portant notamment sur l'absence de justification de certaines hypothèses de calcul (cf. ci-dessous) et l'absence d'évaluation par l'Andra de la pertinence des périodes de retour¹²² affichées en regard de la durée de vie de l'installation.

Périodes de retour associées aux spectres de dimensionnement

Dans le DDAC, l'Andra utilise les résultats de son calcul probabiliste de 2016 pour estimer des périodes de retour associées aux différents spectres d'aléa présentés [88] et estime sur cette base que le SMF est enveloppe d'un spectre médian à 30 000 ans (prenant ainsi en compte la durée de vie de 150 ans de l'installation [88]) et que le

¹²² Durée moyenne entre l'occurrence de deux événements de même intensité.

SDD-2016 est enveloppe d'un spectre médian à 50 000 ans. L'IRSN note que le calcul probabiliste n'a pas été mis à jour au stade du DDAC en intégrant les nouveaux spectres SMS et SDD, ni les éléments de justification des hypothèses du calcul probabiliste dont l'absence avait été pointée lors de l'expertise du DOS en 2017 [26]. Pour rappel, l'IRSN estimait nécessaire que l'Andra justifie les poids associés à l'ensemble des hypothèses retenues ou écartées (failles, zonages, taux d'activité, magnitudes minimales et maximales des séismes, écart-types retenus aux différentes étapes du calcul, etc.), notamment au moyen d'études de sensibilité montrant l'impact des paramètres sur les résultats au sein d'une branche (hypothèses alternatives) et sur le résultat final. En particulier, dans son calcul de 2016, l'Andra avait pris en compte des modèles par zones sources et par failles en donnant un faible poids à la branche « faille », caractérisée par de fortes incertitudes et par de faibles vitesses de glissement. L'IRSN estimait sur ce point que l'Andra pourrait continuer à investiguer les failles du secteur à l'aide de techniques non disponibles lors des études précédentes pour mieux caractériser leur activité et les incertitudes associées. En outre, une mise à jour du calcul était nécessaire pour tenir compte de l'évolution des modèles de mouvement sismiques depuis dix ans, ainsi que de l'évolution des connaissances concernant les catalogues de sismicité et autres données de base. Au stade de la présente expertise, l'IRSN souligne également que la justification des poids retenus, en particulier pour la branche « faille », pourrait tenir compte du fait que le calcul vise à quantifier l'aléa pour des périodes de retour élevées. Enfin, l'Andra pourrait évaluer le positionnement de ses résultats face à des calculs alternatifs (projets européens ou nationaux).

En l'absence de mise à jour de l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique par l'Andra, l'IRSN a effectué ses propres calculs d'aléa probabiliste. Ces calculs reposent sur un arbre logique simplifié (poids identiques pour toutes les hypothèses) dans le but d'établir la sensibilité des résultats aux principales hypothèses relatives à la prise en compte des modèles par zones sources et par failles. En particulier, le modèle par failles se fonde uniquement sur les valeurs maximales des vitesses de glissement établies par l'Andra. En effet, l'IRSN estime qu'il est plus adapté d'utiliser ces valeurs maximales car l'estimation des vitesses de glissement sur les failles demeure incertaine dans une région stable comme celle de Cigéo, où les taux d'érosion sont tels que les décalages de marqueurs géologiques récents ne sont pas mesurables sur le terrain. À l'issue de son calcul, l'IRSN relève que la branche du calcul probabiliste associée aux failles conduit à des niveaux d'aléa significativement supérieurs à ceux obtenus avec la branche associée aux zones sources. Ce résultat montre qu'il est important de poursuivre les efforts de caractérisation de l'activité des failles présentes autour du site en s'appuyant sur l'évolution des méthodes et des connaissances (cf. rapport GP1 [2]) et, le cas échéant, de mettre à jour le calcul d'aléa probabiliste pour vérifier la robustesse de l'évaluation de la période de retour du spectre de dimensionnement. Par ailleurs, les calculs de l'IRSN permettent d'estimer les périodes de retour associées aux spectres SDD-2023 et $1,5 \times$ SDD-2016. Les périodes de retour investiguées correspondent à 10 000¹²³, 20 000 et 30 000 ans. Cette dernière période de retour est estimée par l'Andra représentative de la durée de vie de l'installation (150 ans). De son analyse, l'IRSN retient que :

- le spectre SDD-2023 se situe au niveau du percentile 84 de la distribution des spectres d'aléa à 10 000 ans de période de retour sur l'intégralité de la gamme de fréquences ;
- le spectre SDD-2023 se situe autour de la médiane des spectres d'aléa à 30 000 ans de période de retour sur une large gamme de fréquences ;
- le spectre $1,5 \times$ SDD-2016 est enveloppe de la distribution des spectres d'aléa à 10 000 ans de période de retour et de la moyenne des spectres d'aléa à 30 000 ans de période de retour sur l'intégralité de la gamme de fréquences.

Aussi, l'IRSN estime que le spectre $1,5 \times$ SDD-2016 couvre de manière satisfaisante l'aléa sismique sur la durée de vie de l'installation et l'ensemble des incertitudes précitées.

Pour conclure sur l'approche probabiliste, l'IRSN souligne que les données, les hypothèses et les modèles sur lesquels reposent les calculs de l'Andra de 2016 sont entachés de fortes incertitudes. À ce titre, les contre-calculs simplifiés effectués par l'IRSN ont permis d'explorer l'impact d'hypothèses différentes, notamment celles relatives à la vitesse des failles, sur le positionnement des spectres d'aléa déterministe et de dimensionnement

¹²³ 10 000 ans est la période de retour généralement considérée pour une installation nucléaire, d'une durée de vie moyenne de 50 ans.

vis-à-vis des périodes de retour. Les résultats de ce contre-calcul étant sensiblement différents de ceux de l'Andra, et dans la mesure où les calculs probabilistes apportent un éclairage sur les niveaux de l'aléa sismique et du dimensionnement retenus que ne donne pas l'approche déterministe (cf. *supra*), l'Andra pourrait mettre à jour le calcul d'aléa sismique probabiliste et développer un programme d'investigation des vitesses de déplacement des failles sur le long terme. Au regard des incertitudes portant sur l'aléa sismique, eu égard à la durée de vie de l'installation, l'IRSN estime nécessaire que l'Andra poursuive cette exploration probabiliste. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de réviser son étude probabiliste d'estimation de l'aléa sismique préalablement à la mise en service de la phase pilote, en explorant l'impact des hypothèses retenues dans le calcul, notamment celles qui avaient été identifiées au stade du DOS [26] (poids des branches, catalogues de sismicité, magnitudes maximales et minimales, vitesse de glissement de failles, écart-types des distributions, etc.).**

De manière générale, ces évaluations probabilistes étayent la conclusion de l'IRSN relative aux évaluations déterministes de l'aléa sismique en exploitation (cf. *supra*), selon laquelle **une majoration du SDD-2016 actuellement retenu pour le dimensionnement telle que celle proposée par le SDD-2023 ne couvre pas les incertitudes sur les SMS, notamment à hautes fréquences, qui sont *a contrario* couvertes par le niveau 1,5 x SDD-2016.**

Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra retenir, pour les études ultérieures de dimensionnement de l'installation, un spectre de dimensionnement en phase d'exploitation au niveau 1,5 x SDD-2016 afin de couvrir l'ensemble des incertitudes associées à l'évaluation de l'aléa sismique. L'Andra a pris sur ce point l'**engagement 2024-E41** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement, qui vise à établir d'ici fin décembre 2024, un nouveau SDD (i) en se basant sur une mise à jour de son exploration des incertitudes au niveau SMS et en tenant compte d'une majoration de 0,5 de la Mw, et (ii) en propageant l'ensemble des spectres explorés pour construire la distribution, est globalement acceptable. L'IRSN évaluera, dans le cadre du GP3, le caractère suffisant du nouveau SDD qui sera retenu par l'Andra au regard des remarques *supra*.

Études complémentaires de sûreté – spectre noyau dur

Comme précisé au cours de l'instruction, le spectre noyau dur (**SND**) pris en compte par l'Andra au titre des ECS [48] est défini par l'enveloppe du SMF à basse fréquence et du spectre SMS du séisme de Clairvaux (1733) mis à jour en 2023 à haute fréquence, multipliée par un facteur 1,5, ainsi que par l'enveloppe du spectre médian Andra à 20 000 ans de période de retour¹²⁴. Au cours de l'instruction, l'Andra a transmis un spectre tabulé. L'IRSN observe que le spectre SND retenu par l'Andra est également enveloppe de sa propre estimation du spectre moyen à 20 000 ans de période de retour sur toute la gamme de fréquence. **L'IRSN considère par conséquent que le spectre SND retenu dans le DDAC est pertinent vis-à-vis de la décision de l'ASN [102] émise dans le contexte post accident de Fukushima Daiichi.**

4.4.1.2. Résistance du génie civil aux sollicitations sismiques

Prise en compte de l'aléa sismique en surface et en souterrain

L'expertise par l'IRSN de la méthodologie d'étude de l'effet du séisme et de sa mise en œuvre, ainsi que des résultats des calculs sismiques présentée dans ce chapitre porte sur le DDAC avec les niveaux d'aléas sismiques retenus au stade des études APD. Ainsi, l'Andra considère le SDD-2016 (cf. chapitre 4.4.1.1) pour le dimensionnement sismique des bâtiments de surface. Pour les ouvrages souterrains, l'Andra retient [86] le SDD-2016 calé à 0,13 g pour les études de conception du génie civil intérieur et le SMPP calé à 0,22 g pour les études de conception des revêtements de galerie, ainsi que du génie civil intérieur des alvéoles MA-VL. L'IRSN rappelle qu'à l'issue de la présente instruction (GP2), l'Andra s'est engagée à établir un nouveau SDD en tenant compte des remarques *supra*.

¹²⁴ Outre la majoration de 50 % du spectre SMS, une période de retour de 20 000 ans a été conventionnellement retenue pour l'évaluation des niveaux d'aléas « noyau dur » dans le contexte post accident de Fukushima Dai-ichi (cf. [102]).

Au cours de l’instruction, l’Andra a précisé [89] avoir effectué une analyse de sensibilité au 1,5 x SDD-2016 (correspondant à une majoration de 50 % du SDD-2016) pour toutes les fréquences pour les installations de surface, l’installation souterraine et les équipements du processus nucléaire. L’Andra conclut que la conception d’ensemble des ouvrages n’est pas impactée par cette majoration, notamment le gabarit des galeries, mais que localement, la conception et le dimensionnement de quelques ouvrages et d’équipements pourraient être réévalués, par exemple celui des ferrailages d’ouvrages de surface ou des ancrages d’équipements dans le génie civil. L’Andra rappelle que la conception des ouvrages souterrains est dans l’ensemble robuste au 1,5 x SDD-2016, le dimensionnement des revêtements ayant été vérifié pour le SMPP, enveloppe du 1,5 x SDD-2016. **Ces éléments n’appellent pas de remarque de la part de l’IRSN.**

Etudes sismiques des ouvrages de surface

Bâtiment EP1

Modélisation

Les principales caractéristiques du béton et des armatures retenues pour les modélisations ainsi que les principes de la modélisation numérique du bâtiment EP1 présentés par l’Andra dans le DDAC **n’appellent pas de commentaire de la part de l’IRSN**. En outre, l’Andra présente l’évaluation des paramètres statiques et dynamiques du sol ainsi que des fonctions d’impédances sur la base d’études géotechniques permettant de caractériser le sol, **ce qui est satisfaisant**. L’Andra prend aussi en compte l’interaction entre le sol et les fondations de EP1 par un système de ressorts et d’amortisseurs en cohérence avec les préconisations du guide ASN 2/01 [57].

Les hypothèses et la méthodologie de calculs ainsi que les principes de modélisation considérés pour le dimensionnement des blocs du bâtiment EP1 **n’appellent pas de remarque de l’IRSN**.

Effets du séisme

L’Andra étudie le comportement sismique de chacun des blocs de EP1 et de la tête de descenderie colis suivant la pratique conventionnelle relative aux bâtiments nucléaires¹²⁵. Cette étude est de plus réalisée conformément aux préconisations du guide ASN 2/01 [57], **ce qui est satisfaisant**.

Le dimensionnement des structures est effectué selon les guides CEA [58][59] pour les différentes combinaisons de charges statiques et dynamiques, le chargement sismique étant globalement dimensionnant pour les ouvrages de surface, à l’exception des éléments périphériques dimensionnés par la chute d’avion. Les charges prises en compte dans le calcul statique sont les charges de poids propre, des terres, des équipements et de second œuvre, les charges climatiques et le retrait, à travers une méthode d’analyse élastique linéaire. Ces calculs permettent ainsi de déterminer les déplacements, les accélérations et les sollicitations dans les éléments de structure et d’effectuer une analyse des efforts d’ensemble et des réactions d’appui au droit des fondations. Les vérifications de la stabilité globale des ouvrages de surface, au renversement et au glissement, et de la capacité portante du sol sont réalisées en cohérence avec les critères des guides CEA [58][59] sur la base notamment des réactions d’appui au droit des fondations. Les sollicitations obtenues dans les éléments structuraux en béton armé permettent quant à elles d’effectuer la vérification de leur résistance à travers le calcul des sections de ferrailage enveloppes.

Pour ce qui concerne la vérification de la non-interaction entre superstructures de blocs, la largeur théorique du joint de dilatation retenu par l’Andra garantit une largeur supérieure à deux fois le cumul des déplacements horizontaux des ouvrages estimés par le calcul linéaire, avec un minimum de 100 mm, afin d’éviter l’entrechoquement sous séisme, **ce qui est satisfaisant**.

L’IRSN considère sur la base de l’examen d’un échantillon de notes de calcul de blocs que la conception des ouvrages de surface retenue par l’Andra, ainsi que les justifications de stabilité et de dimensionnement des

¹²⁵ Elle repose sur la méthode modale-spectrale pour trois hypothèses de sol (min, moyen, max) en considérant le béton fissuré ou non fissuré, avec superposition modale par combinaison quadratique complète signée selon le mode fondamental de chaque direction de séisme et cumul des effets des directions de séisme suivant la méthode des combinaisons linéaires de Newmark.

structures **sont satisfaisantes**. Le dimensionnement du ferrailage à mettre en place **n'appelle pas de remarque de l'IRSN**.

L'IRSN souligne que les éléments fournis dans les notes de calcul des blocs concernant le ferrailage ne permettent pas de déterminer aisément les armatures à mettre en œuvre, certaines informations comme le ferrailage minimum ou le ferrailage des coques avions figurant dans des documents distincts, **ce qui reste acceptable au stade du DAC. Il appartiendra néanmoins à l'Andra, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, de présenter de manière détaillée les sections d'armatures requises pour chaque élément de structure afin de s'assurer de la maîtrise de l'établissement des plans de ferrailage.**

Spectres transférés

L'Andra détermine les spectres transférés selon les méthodes décrites dans [58] par un transfert direct du spectre de sol, sans nécessiter le calcul des accélérogrammes temporels. Pour chaque bloc, l'Andra calcule deux spectres d'accélération par niveau, un spectre « enveloppe » obtenu en calculant l'enveloppe des spectres transférés aux quatre coins du niveau considéré et un spectre « mi portée » calculé au centre de la dalle de plus grande portée. L'IRSN constate que les points retenus par l'Andra pour évaluer cette réponse en accélération tiennent compte des modes locaux des planchers mais pas des voiles, alors que de nombreux EIP sont fixés sur les voiles. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de justifier l'absence d'EIP sensible à des modes locaux de voiles. A défaut, il appartiendra à l'Andra de calculer des spectres transférés au niveau des voiles, spécifiques à la configuration de l'EIP.**

Entrée de la descenderie de service et émergences des puits VVE et VFE

Modélisation

Les hypothèses et la méthodologie de calculs ainsi que les principes de modélisation considérés pour le dimensionnement de l'entrée de la descenderie de service et des émergences des deux puits VVE et VFE sont semblables à ceux des blocs du bâtiment EP1 et **n'appellent pas de remarque de l'IRSN**.

Effets du séisme

L'Andra étudie le comportement sismique de la tête de descenderie de service et des émergences des puits VVE et VFE selon la même méthode que celle retenue pour les blocs de EP1 et, conformément au guide ASN 2/01 [57], **ce qui est satisfaisant**. Les vérifications de la stabilité globale des ouvrages et de leur résistance sont effectuées par application de l'Eurocodes 2 [103] pour les différentes combinaisons de charges statiques et dynamiques, la détermination des cartes de ferrailage se faisant suivant la méthode de Capra Maury. **Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

L'IRSN considère que la conception des ouvrages de surface et les justifications de dimensionnement des structures **sont satisfaisantes**.

Le dimensionnement du ferrailage à mettre en place ainsi que des charpentes métalliques et de leurs ancrages dans le génie civil pour les bâtiments des puits VFE et VVE **n'appellent pas de remarque de l'IRSN**.

Spectres transférés

Pour l'ensemble des ouvrages de surface, les spectres transférés sont obtenus par transfert direct du spectre de sol sans passer par le calcul des accélérogrammes sur la base des méthodes décrites dans [58], **ce qui est acceptable** à ce stade des études. La méthode de détermination des spectres transférés et les résultats obtenus **n'appellent pas de remarque de l'IRSN**. Les spectres sont calculés aux coins du niveau considéré et au centre de la dalle de plus grande portée. L'IRSN constate que l'Andra ne tient compte que des modes locaux des radiers et planchers mais pas des voiles, alors que de nombreux EIP sont supportés par les voiles. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de justifier l'absence de prise en compte des modes locaux au niveau des voiles dans les études d'évaluation des spectres transférés.**

Etudes sismiques des ouvrages souterrains

Modélisation

L'Andra modélise la structure d'ensemble des galeries (soutènement/revêtement et génie civil intérieur) à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis. Le calcul des effets du séisme est réalisé à partir d'une étude linéaire modale-spectrale¹²⁶. L'interaction entre le sol et la structure des galeries est prise en compte à l'aide de ressorts élastiques statiques ou dynamiques et en appliquant sur le revêtement la poussée du terrain évaluée par des calculs numériques. Cette poussée tient compte de l'effet du matériau compressible pour les galeries bicouches. Pour ce qui concerne le génie civil intérieur, une méthode simplifiée est utilisée pour prendre en compte son interaction avec le sol.

Par la suite, les contraintes principales majeures statiques dans les revêtements et dans les matériaux compressibles, ainsi que les déformations et les cartes de ferrailage dans les éléments de structures du génie civil intérieur sont éditées. Les justifications des revêtements à l'égard du séisme sont également menées.

Ces méthodes de modélisation permettent de prendre en compte le phasage des travaux dans les calculs de galeries (creusement, mise en place du soutènement avec cales compressibles et boulons d'ancrage pour les revêtements en béton coffré, pose du revêtement définitif y compris le matériau compressible, etc.) et l'interaction terrain-structure au cours du temps. Les modélisations s'appuient sur un modèle de sol reposant sur une loi élasto-viscoplastique avec écrouissage [86]. Dans cette loi, le comportement instantané de l'argilite est présenté par un modèle isotrope élasto-plastique avec double écrouissage en utilisant le critère de Hoek & Brown.

Le dossier de qualification de la loi de comportement du terrain et les principes de modélisation n'appellent pas de remarque de la part l'IRSN.

Vérifications

Les éléments présentés par l'Andra pour le dimensionnement des galeries MA-VL, des alvéoles MA-VL, des galeries HA, des alvéoles HA, des descenderies, des galeries ZSLE et des puits d'exploitation permettent globalement d'apprécier la démarche de dimensionnement des revêtements et les justifications effectuées sur la base des résultats de calcul.

Calculs statiques

Dans les modèles numériques de calcul statique des revêtements préfabriqués, les joints longitudinaux entre voussoirs ne sont pas considérés du fait que les voussoirs restent toujours comprimés suivant la direction transversale. Après écrasement des interstices potentiels, les voussoirs se comportent comme un béton continu. Des justifications en statique de ces joints secs longitudinaux sont néanmoins menées par l'Andra, **ce qui n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

Les interfaces entre le revêtement des sections courantes avec voussoirs et celui des intersections en béton coffré sont constituées par des joints transversaux de 5 cm d'épaisseur en matériau compressible de forte capacité de déformation et de faible transmission d'efforts, permettant la désolidarisation des revêtements. Aucune information complémentaire n'a été transmise par l'Andra concernant la localisation des autres joints transversaux, liés aux effets du séisme ou du retrait, au droit des revêtement en béton coffré non armé en section courante de galerie, et leurs caractéristiques techniques (dimensions, matériaux employés, etc.). **Au titre de la finalisation de la conception, il appartiendra à l'Andra de détailler, avant le début des travaux de creusement, la localisation des joints transversaux de galeries et leurs caractéristiques techniques (dimensions, matériaux employés, etc.).**

Les justifications des revêtements de galeries à l'égard des actions statiques (interaction sol-structure essentiellement) sont menées pour les descenderies en vérifiant que les contraintes principales dans les voussoirs préfabriqués ou le béton coffré coulé en place, ainsi que dans les matériaux compressibles sont

¹²⁶ Etude permettant d'analyser le comportement vibratoire des galeries en cas de séisme.

inférieures aux contraintes de compression admissibles. Des justifications des voussoirs prenant en compte les joints longitudinaux sont également effectuées sur la base de tableaux de valeurs d'efforts transversaux (efforts normal N, de flexion M et tranchant T) et de diagrammes d'interaction N-M. Pour les autres galeries, l'Andra a uniquement vérifié au stade du DDAC que les contraintes principales majeures dans le béton sont inférieures aux contraintes admissibles de compression. Le ferrailage des voussoirs est lié essentiellement aux efforts de manutention et de mise en œuvre (vérins du tunnelier). **Ceci n'appelle globalement pas de commentaire de la part de l'IRSN, mais il appartiendra à l'Andra de réaliser, avant le début des travaux de creusement, des vérifications complémentaires des voussoirs sur la base de diagrammes d'interaction N-M pour les alvéoles MA-VL.**

Enfin, l'Andra présente la vérification de l'admissibilité des contraintes/déformations dans les éléments de soutènement tels que le béton projeté, les cales compressibles et les éventuels cintres coulissants. Les vérifications des boulons de renforcement du terrain sont conduites selon les recommandations de l'AFTES GT30. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Calculs sismiques

Pour ce qui concerne les justifications des galeries à l'égard du séisme, seuls les effets selon l'axe du tunnel sont considérés, les efforts sismiques transversaux résultant de l'ovalisation des sections des ouvrages étant négligeables selon l'Andra. L'Andra présente les principes d'évaluation des sollicitations induites longitudinalement (effort axial, flexion longitudinale et effort tranchant) et de justification des revêtements. Les actions sismiques sont modélisées comme des mouvements différentiels du terrain en champ libre à la profondeur des galeries. Des vérifications concluant que le séisme n'est pas dimensionnant sont présentées dans les notes de calculs de dimensionnement des galeries, comme pour les galeries MA-VL, dans lesquelles sont fournis des tableaux d'efforts longitudinaux et les contraintes en résultant. Il en est de même pour les descenderies.

La vérification des ouvrages souterrains sous action sismique est effectuée dans le cadre des ouvrages profonds à partir des méthodes proposées dans l'Eurocode 8 [56] et des recommandations de l'AFTES relatives à la conception et à la protection parasismique des ouvrages souterrains [104]. Cette vérification se place dans une configuration où la longueur de l'ouvrage (galerie, puits, descenderie) est nettement prépondérante devant les dimensions de la section transversale. **Ceci est satisfaisant.**

Pour ce qui concerne les galeries hors COX, le soutènement est prédimensionné à l'aide de l'abaque de Barton [105] et le revêtement en béton coffré est calculé à l'aide de la méthode en contraintes initiales anisotropes selon Panet [106] avec prise en compte de l'interaction hydromécanique, et du comportement à long terme des terrains, **ce qui est acceptable.**

Sur la base des notes de calculs des galeries présentées par l'Andra, l'IRSN considère que le dimensionnement des puits et des galeries (descenderies, liaison surface-fond, zone de soutien logistique, accès aux quartiers de stockage et alvéole, etc.) **est acceptable.**

Pour ce qui concerne les ouvrages du génie civil intérieur, les résultats de calcul avec la méthode modale-spectrale fournis par l'Andra sont sommaires. L'IRSN constate pour ces ouvrages la présentation incomplète des cartes de ferrailage, l'absence de définition systématique des nappes et directions des barres d'aciers et l'absence de tableau de synthèse du ferrailage enveloppe (sections calculées, sections minimales et autres dispositions constructives), **ce qui reste acceptable au stade du DAC. Il appartiendra néanmoins à l'Andra de présenter, avant le début des travaux de creusement, de manière détaillée les sections d'armatures requises pour chaque élément de structure du génie civil intérieur afin de s'assurer de la maîtrise de l'établissement des plans de ferrailage.**

Spectres transférés

Concernant les spectres transférés pour l'étude sismique des équipements, des spectres sont présentés par l'Andra pour les descenderies. L'Andra n'a en revanche pas fourni d'éléments pour les autres galeries. En cours d'instruction, l'Andra a précisé que les transferts de spectres ont néanmoins été calculés pour chaque ancrage

d'équipement sur le génie civil intérieur et transmis à la maîtrise d'œuvre pour leur prédimensionnement, **ce qui est acceptable.**

Ancrage des équipements dans le génie civil

La méthode de dimensionnement des ancrages des équipements dans le génie civil n'est pas présentée pour le bâtiment EP1 et la tête de descenderie colis, ce dimensionnement étant prévu lors des phases ultérieures du projet. Des principes de dimensionnement d'ancrage sont présentés succinctement pour l'entrée de la descenderie de service et l'émergence du puits air vicié en prévoyant respectivement des chevilles mécaniques métalliques qualifiées au séisme et des tiges d'ancrage pré-scellées munies de coupleurs. Des calculs d'ancrage sont présentés pour l'émergence du puits ventilation air frais en prévoyant des scellements avec résine ou des chevilles métalliques pour les équipements secondaires et des tiges d'ancrage pré-scellées avec coupleurs et plaquettes ou crochets pour les constructions métalliques et les équipements lourds.

Compte tenu du retour d'expérience des expertises récentes sur la thématique ancrages, l'IRSN attire l'attention de l'Andra sur les restrictions d'utilisation des chevilles ancrées à l'aide de produit de scellement chimique eu égard à la maîtrise du comportement des résines. En effet, la résine chimique induit de fortes restrictions d'emploi pour certaines conditions d'ambiance, notamment pour les températures élevées, sous incendie et sous irradiation. De plus, les conditions de transport et de stockage sur site avant leur mise en service doivent faire l'objet d'une attention particulière (notamment la température de la résine d'injection pendant le stockage et la phase d'injection), car elles ont une incidence directe sur les performances du produit et par conséquent des chevilles.

L'IRSN considère qu'il appartiendra à l'Andra de présenter, avant le début des travaux de creusement, le programme de surveillance de la qualification, des études de dimensionnement et de la mise en œuvre des ancrages afin que ceux-ci répondent aux requis de sûreté (radioprotection, incendie, séisme...)

Séisme noyau dur (SND)

Les éléments retenus comme constituant le noyau dur des bâtiments de surface doivent, conformément à [102], faire l'objet d'une vérification de robustesse (non-ruine) à l'égard d'un séisme extrême SND. L'Andra n'a pas présenté de justification de ce type dans les notes de dimensionnement des blocs du bâtiment EP1 ni dans celles des autres bâtiments de surface (têtes de descenderies et de puits) mais une justification générique. Au cours de l'expertise, l'Andra a confirmé qu'au stade des études APD, seule une analyse qualitative de marges sismiques a été menée afin de garantir que le dimensionnement actuel de ces ouvrages permet de dégager un coefficient de marge sismique acceptable à ce stade pour justifier la non-ruine, **ce dont l'IRSN convient.** Néanmoins, **il appartiendra à l'Andra de justifier, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, le respect de l'exigence de non-ruine attribuée sous séisme de niveau extrême à l'ensemble des ouvrages de surface et du génie civil intérieur de Cigéo.**

Spectres transférés à l'égard des travaux en lien avec l'engagement 2024-E41

De même, **il appartiendra à l'Andra, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, de réévaluer les spectres transférés pour l'ensemble du génie civil intérieur de Cigéo en cohérence avec la réponse à son engagement 2024-E41 (cf. chapitre 4.4.1.1 du présent rapport) en vue du dimensionnement des équipements et de leurs ancrages. Il en est de même pour les ouvrages de surface.**

4.4.2. Inondation externe

4.4.2.1. Installations de surface

L'Andra présente dans le DDAC une analyse [107] du risque d'inondation externe fondée sur le recensement de différentes situations de référence pour le risque inondation (SRI) conformément au guide n°13 de l'ASN. Les données de site ayant servi à définir les aléas retenus pour cette évaluation ont été analysées dans le cadre du GP1 [2]. Ainsi, seule l'évaluation du risque d'inondation associé à ces aléas est analysée ci-après.

Les éléments présentés par l'Andra pour écarter les SRI « crues de cours d'eau » et « intumescence » et pour démontrer la maîtrise de la SRI « dégradation d'ouvrages » **n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN**. En revanche, les SRI « pluies locales » et « remontées de nappe » appellent les commentaires suivants de l'IRSN.

S'agissant de la SRI « pluies locales », sur laquelle se base le dimensionnement et les dispositions d'entretien du réseau pluvial, l'IRSN rappelle en premier lieu que les pluies de référence retenues par l'Andra ont été jugées satisfaisantes lors du GP1.

Le dimensionnement du réseau pluvial comprend une étape de prédimensionnement basée sur les pluies de projet et les caractéristiques principales des bassins versants drainés, puis une étape de vérification du bon dimensionnement du réseau, par une modélisation détaillée des réseaux de collecte et tenant compte des pluies de projet, d'une modélisation hydrologique des bassins versants interceptés par le réseau et d'une modélisation hydraulique du réseau. Pour ce dimensionnement, l'Andra retient des coefficients de ruissellement différents selon les bassins versants¹²⁷ et différents coefficients de frottement (ou rugosité) selon la nature des évacuations¹²⁸. Au niveau des toitures, les descentes d'eaux pluviales sont dimensionnées pour assurer une absence d'accumulation sur les bâtiments et une évacuation des eaux pluviales en cas de bouchage. Par ailleurs, l'Andra précise [51] que la surveillance du bon fonctionnement des réseaux d'évacuation des eaux pluviales sera assurée par une inspection visuelle lors des rondes de sécurité effectuées de manière régulière ou déclenchées en cas d'évènements pluvieux importants. Aucun programme d'entretien détaillé n'est toutefois présenté à ce stade.

L'IRSN relève que l'Andra a vérifié le bon fonctionnement du réseau pluvial pour différentes durées de pluie intenses et des coefficients de ruissellement représentatifs de ces pluies, **ce qui est conforme au guide n°13 de l'ASN**. Vis-à-vis des coefficients de frottement des canalisations, l'IRSN note que l'Andra retient des valeurs représentatives d'un réseau neuf, ce qui est cohérent avec la future création de l'installation. Néanmoins, ainsi que préconisé dans le guide n°13 de l'ASN, les coefficients de frottement retenus pour le réseau doivent être représentatifs de l'état des conduites en termes d'usure et d'entretien et les valeurs doivent être justifiées en tenant compte d'un programme de surveillance et d'entretien du réseau pluvial qui nécessite d'être précisé et justifié. A défaut, des valeurs majorantes en termes de débordements doivent être retenues. **Aussi, au vu de la durée d'exploitation prévue pour Cigéo, l'IRSN considère que l'Andra devra justifier les valeurs de coefficients de frottement retenues pour le réseau pluvial par un programme d'entretien adapté ou à défaut tenir compte de valeurs conservatives pour son dimensionnement. L'IRSN souligne en outre que les modélisations d'écoulement dans le réseau pluvial devront être mises à jour sur la base des caractéristiques réelles du réseau une fois celui-ci construit, et ce avant la mise en service de l'installation.** Ces éléments sont repris dans la conclusion ci-après.

En cas d'indisponibilité du réseau pluvial associé à une pluie extrême, l'Andra présente une simulation du ruissellement de surface induit au droit du site de Cigéo¹²⁹, au droit des voiries et infrastructures de transport. Les résultats mettent en évidence des hauteurs d'eau pouvant atteindre jusqu'à 22 cm au contact du bâtiment EP1. L'Andra définit ensuite des dispositifs permettant d'écarter le risque d'entrée d'eau dans les locaux concernés. Ainsi, au droit des accès où des hauteurs d'eau calculées sont centimétriques, elle prévoit la mise en place de seuils ou de légères pentes. Au droit des entrées où des hauteurs d'eau de 20 cm ou plus ont été identifiées, l'Andra prévoit de rehausser les entrées et d'installer des rampes d'accès en pente. Enfin, au droit des accès ferroviaires aux halls, des dispositifs d'étanchéité (joints) seront mis en place au niveau du passage des rails dans le génie civil pour éviter toute entrée d'eau dans le bâtiment.

L'IRSN note que la méthodologie mise en œuvre par l'Andra tient compte d'une indisponibilité totale du réseau pluvial, **ce qui est conservatif**. Vis-à-vis des dispositifs visant à éviter l'entrée d'eau dans les bâtiments, l'IRSN rappelle que la réalisation de pentes orientées vers l'extérieur des bâtiments est à privilégier. Or l'IRSN note, d'après les éléments transmis au cours de l'instruction, qu'à l'ouest et à l'est du bâtiment EP1, des points bas

¹²⁷ Coefficient de ruissellement de 1 pour les voiries et toitures et entre 0,7 et 0,82 pour les talus et espaces paysagers.

¹²⁸ Fossés enherbés, ouvrages superficiels en béton et canalisations lisses.

¹²⁹ Pour une pluie centennale de type « double-triangle » d'une durée totale de 4 h avec un pic de pluie intense de 1 h.

subsistent dans quelques secteurs, notamment à proximité des entrées n°5 et n°6 et que la mise en place de rampes pour limiter les entrées d'eau dans le bâtiment n'empêchera pas l'accumulation d'une lame d'eau à proximité. Aussi, **l'Andra devra vérifier si des aménagements plus larges que la mise en place d'une rampe d'accès, notamment au droit des entrées n°5 et n°6, pourraient être envisagés afin de limiter l'accumulation d'eau dans ces secteurs.** Ce point est repris dans la conclusion ci-dessous.

En conclusion, bien que l'Andra ait vérifié le dimensionnement du réseau pluvial selon différents scénarios de manière conforme au guide n°13 de l'ASN, l'IRSN considère que l'évaluation de la SRI « pluies locales » nécessite encore d'être améliorée. **Aussi, l'IRSN considère que, l'Andra devra, afin de compléter l'évaluation des risques d'inondation par les pluies locales :**

- **étudier et proposer, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, les aménagements envisageables permettant de limiter l'accumulation d'eau à proximité des entrées n°5 et n°6 du bâtiment EP1 ;**
- **justifier, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, les valeurs de coefficients de rugosité retenues pour le réseau pluvial vis-à-vis du programme d'entretien retenu, ou à défaut, tiennent compte de valeurs conservatives pour le dimensionnement du réseau ;**
- **mettre à jour, au plus tard pour la demande de mise en service, les modélisations du réseau pluvial et de ruissellement après construction du réseau afin de vérifier que les aménagements réalisés ne remettent pas en cause les éléments présentés au stade de la DAC.**

Ce point fait l'objet de l'**engagement 2024-E42** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

S'agissant de la SRI « remontée de nappe », l'IRSN rappelle en premier lieu que les niveaux d'eau de référence pour la nappe extrême retenus pour les zones puits et descenderie ont été jugés satisfaisants dans le cadre de l'expertise du GP1. Au niveau de la zone descenderie, le niveau retenu étant supérieur à la cote de fondation du bâtiment EP1, l'Andra prévoit des dispositifs pour limiter les remontées de nappe, plus précisément au droit du bâtiment EP1 et de la tête de descenderie [107]. L'Andra prévoit ainsi la mise en œuvre :

- d'une paroi étanche sur toute la hauteur des calcaires du Barrois et entourant le bâtiment EP1, les deux têtes de descenderie colis et de service ainsi que le terminal ferroviaire. Des drains seront associés à la paroi sur ses faces intérieures et extérieures pour permettre la gestion des eaux d'infiltration ;
- de systèmes de drainage au droit du bâtiment EP1 et de la tête de descenderie colis sous les radiers et contre les voiles verticaux¹³⁰. Les eaux collectées dans le système de drainage seront acheminées vers des puisards puis transférées par pompage vers des cuves de stockage. Le contrôle et l'entretien du système sous radier sont rendus possibles grâce à des collecteurs positionnés dans des galeries sous le bâtiment et espacés de 50 m environ ;
- d'un système de drainage au droit de la tête de descenderie de service¹³¹ récupérant l'eau pour la réinfiltrer ensuite dans son milieu d'origine.

Ces dispositifs d'étanchéité sont dotés d'un système de surveillance et d'un dispositif de nettoyage (maintenance curative).

L'IRSN estime que le risque d'inondation par remontée de nappe au droit de la zone descenderie dépendra fortement des performances de la paroi étanche réalisée ainsi que de la gestion des eaux de drainage mise en œuvre au droit des bâtiments. L'IRSN constate à cet égard que les systèmes de drainage envisagés sont similaires à ceux mis en œuvre sur d'autres sites nucléaires (INB n°177 DIADEM, bâtiments du site Orano de La Hague) et que l'Andra prévoit la mise en place d'une surveillance régulière de ces systèmes, **ce qui est satisfaisant.**

¹³⁰ Les systèmes de drainage au droit du bâtiment EP1 et de la descenderie comprennent un dispositif d'étanchéité par géomembrane contre la sous-face des radiers/voiles, une couche drainante contenant des drains et un deuxième dispositif d'étanchéité par géomembrane en contact du terrain qui limite les arrivées d'eau.

¹³¹ Le système de drainage au droit de la tête de descenderie de service comprend une membrane d'étanchéité en contact du radier et des voiles périphériques, une couche de matériau drainant et des drains.

Toutefois, il appartiendra à l'Andra, pour la demande de mise en service de Cigéo, de préciser et justifier le programme détaillé d'entretien et de surveillance des systèmes de drainage associé à ces drains.

4.4.2.2. Installation souterraine

Les installations souterraines et les liaisons surface-fond sont sensibles au risque d'inondation externe en cas d'infiltration des eaux d'exhaure en provenance des aquifères traversés. Ainsi qu'indiqué dans le cadre du GP1, l'Andra prévoit la mise en œuvre de revêtements étanches de ces liaisons au niveau des calcaires du Barrois, du fait des importants volumes d'eau attendus, tandis qu'au droit des calcaires de l'Oxfordien, l'Andra prévoit un revêtement drainant, auquel il convient d'associer une collecte et une évacuation des eaux dimensionnées à un débit d'infiltration de 50 m³/j pour chacune des deux descenderies et de 6 m³/j pour chacun des 4 puits drainants¹³², le puits VVE étant pour sa part étanche. L'expertise de l'IRSN ci-après porte sur la mise en œuvre des dispositions de gestion des eaux au niveau du Barrois puis au droit des formations sous-jacentes, ainsi que sur l'analyse de la performance des dispositifs de maîtrise du risque d'inondation d'origine externe.

Traversée de l'aquifère du Barrois

L'Andra prévoit pour chaque liaison surface-fond, comme au stade du DOS, la mise en place d'un revêtement étanche résistant à la pression hydrostatique des calcaires du Barrois, et d'un bulbe d'étanchéité, réalisé par injection de résine ou d'un coulis bentonitique, à la jonction avec les marnes du Kimméridgien afin de prévenir une mise en communication avec les niveaux aquifères présents dans ces marnes. L'Andra retient comme critère de dimensionnement de ces dispositifs un débit de contournement¹³³ à la base des calcaires du Barrois, à l'extrados du revêtement, inférieur à 50 L/h par liaison surface-fond. L'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'à titre de comparaison le débit actuel repris sous les bulbes au droit des deux puits du LSMHM était compris entre 3 et 8 L/h en moyenne. En outre, l'Andra prévoit de traiter voire de substituer les anomalies ou zones décomprimées qui seraient, le cas échéant, identifiées dans les calcaires lors des travaux de fonçage de ces futures liaisons.

L'épaisseur des calcaires du Barrois étant relativement faible au droit des têtes de descenderie, **les dispositions présentées par l'Andra n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN pour cette zone.** S'agissant en revanche de la zone puits, l'IRSN rappelle, ainsi qu'indiqué au GP1, que les cinq puits recouperont une épaisseur significative de calcaires (60 m) qui n'a pas encore été investiguée et que **les résultats des investigations géotechniques prévues sont attendus pour consolider le bien fondé des dispositions prises par l'Andra concernant le risque d'inondation externe.**

Traversée des formations sous-jacentes au Barrois

L'Andra prévoit, pour la gestion des eaux d'infiltration, des dispositifs de collecte au niveau des descenderies (drainage des eaux vers un caniveau central intégré dans le radier, puis vers trois bassins de rétention d'une capacité unitaire de 300 m³ situés en pied de descenderies) et des puits (revêtement en béton non parfaitement étanche muni de gouttières périphériques permettant de diriger les eaux vers le fond du puits, puis vers le bassin de rétention de la descenderie pour le puits VFE situé en zone d'exploitation ou vers un bassin de collecte positionné dans le bouniou¹³⁴ du puits VVT pour les autres puits situés en zone travaux). Ces eaux seront ensuite relevées vers un bassin de décantation des eaux d'exhaure situé en surface. Le débit nominal du réseau de relevage des eaux d'exhaure retenu est de 18 m³/h, soit plus de 3 fois le débit d'exhaure total estimé pour les descenderies et les puits. L'Andra indique par ailleurs qu'un bulbe d'étanchéité sera également mis en place à la transition des liaisons surface-fond entre l'Oxfordien calcaire et le COX, avec un débit de contournement des eaux d'infiltration de l'Oxfordien à l'extrados du revêtement inférieur à 20 L/h par liaison. Pour ce qui est de la collecte des eaux d'infiltration en provenance du COX dans la zone souterraine, l'Andra indique que sa très faible perméabilité est suffisante pour limiter fortement les venues d'eau et que la ventilation permanente des galeries permet de l'assécher et d'en évacuer l'humidité. Les eaux d'exhaure proviennent ainsi uniquement des alvéoles

¹³² Les puits VFE, VFT, MMT et VVT sont drainants.

¹³³ Débit des eaux déviées par le bulbe d'étanchéité.

¹³⁴ Fond du puits qui fait office de puisard.

de stockage HA qui ne sont pas ventilés. Ces alvéoles présenteront une faible pente vers leurs galeries d'accès (cf. chapitre 2.3.1), permettant le recueil des eaux d'exhaure dans un collecteur puis leur envoi *via* la descenderie vers un local dédié du bâtiment EP1.

Enfin, l'Andra indique qu'en cas de dégradation des dispositifs de collecte ou de relevage des eaux d'exhaure des différentes couches traversées, la capacité des bassins en fond de puits (bouniou de 1000 m³, bassins de la descenderie) ainsi que les dispositions complémentaires prises pour l'évacuation des eaux permettront de prévenir une inondation externe dans l'installation souterraine. L'Andra précise ainsi qu'au droit de la descenderie, un bassin de secours est prévu en cas de maintenance d'un des bassins de rétention et que les dispositifs de pompage sont redondés¹³⁵ pour prévenir tout dysfonctionnement. A cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'une pompe de secours, présente en magasin dans l'installation de surface, était installable dans un délai de 7 jours en cas de défaillance de la pompe initiale, et qu'en cas d'indisponibilité de l'ensemble de ces systèmes de pompage, l'évacuation des eaux pourrait se faire à l'aide de camions citernes en utilisant la descenderie de service, la fréquence attendue de 6 à 7 camions par jour¹³⁶ ne posant pas de difficulté particulière sur le plan de l'exploitation.

L'IRSN constate que les dispositifs de collecte des eaux d'exhaure dans la zone souterraine reposent en grande partie sur de l'écoulement gravitaire et que les capacités des bassins en fonds de puits et de descenderie permettent de disposer d'un délai d'environ une semaine pour la mise en œuvre de moyens complémentaires en cas de dégradation ou de dysfonctionnement des dispositifs, **ce qui est satisfaisant**.

L'IRSN constate par ailleurs qu'en dehors du suivi de l'efficacité des bulbes d'étanchéité (cf. *infra*), les dispositions de surveillance et d'entretien du réseau d'eau d'exhaure au niveau des puits sont peu détaillées à ce stade. Pour les descenderies, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que les moyens de surveillance n'ont pas encore été définis au stade actuel d'APD. **Aussi, l'IRSN estime qu'il appartiendra à l'Andra de préciser et de justifier un programme d'entretien et de surveillance du réseau d'exhaure au droit des puits et des descenderies. Il appartiendra également à l'Andra de préciser les modalités de jouvence des différentes portions de ce réseau.**

D'une manière générale, compte tenu de l'ensemble des remarques émises dans le présent chapitre relatives aux programmes d'entretien et de surveillance des systèmes de collecte des eaux visant à maîtriser le risque d'inondation externe, l'IRSN considère qu'il **appartiendra à l'Andra, préalablement à la mise en service lors de la phase pilote, de définir et justifier un programme détaillé d'entretien et de surveillance :**

- **du réseau d'eau pluviale ;**
- **des systèmes de drainage de la nappe situés autour des bâtiments de la zone descenderie ;**
- **du réseau d'exhaure des eaux souterraines collectées au droit des puits et des descenderies.**

Performance des dispositifs de maîtrise du risque d'inondation d'origine externe

L'IRSN constate que la maîtrise du risque d'inondation d'origine externe dans l'installation souterraine repose en premier lieu sur des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux d'exhaure (tuyauteries, bassins, capacités, pompes de relevage et son alimentation) dimensionnés de telle sorte à demeurer intègres, voire étanches pour certains, en cas de séisme. **Ceci est satisfaisant.**

S'agissant des bulbes d'étanchéité¹³⁷, l'Andra indique [51] que la surveillance des débits de contournement sera réalisée grâce à la présence de drains qui collecteront ces eaux dans le milieu géologique et les achemineront vers un caniveau situé sous la base de chaque bulbe. L'IRSN constate, sur la base des simulations d'écoulement présentées par l'Andra, que les débits visés (50 L/h à la base des calcaires du Barrois et 20 L/h à la base de l'Oxfordien, cf. *supra*) ne seraient pas respectés en l'absence de mise en œuvre de ces bulbes ou en cas de perméabilité trop élevée de la zone de contact entre la roche hôte et le revêtement en béton. Toutefois, l'Andra

¹³⁵ Deux pompes fixes en mode normal/secours sont prévues dans l'installation souterraine.

¹³⁶ Calcul sur la base d'une évacuation de 136 m³/j via des camions-citernes de 20 m³.

¹³⁷ La conception des bulbes d'étanchéité consiste en une approche mixte utilisant à la fois des injections de collage au niveau des interfaces et un composé bentonitique hydro gonflant.

ne tient pas compte dans ces simulations de l'apport mécanique du composé bentonitique gonflant en termes de diminution de la perméabilité du COX au contact avec le béton, puisque ses compositions et critères de performance ne sont pas encore définis. L'IRSN considère qu'étant donné l'importance des bulbes d'étanchéité dans la limitation des infiltrations d'eau depuis les calcaires du Barrois ou l'Oxfordien vers leurs aquifères sous-jacents, **il appartiendra à l'Andra, d'une part, de préciser les critères de performance du composé bentonitique gonflant requis dans le bulbe d'étanchéité, d'autre part de prévoir un mode de construction de ce bulbe particulièrement soigné notamment à l'interface avec le terrain naturel ; il appartiendra également à l'Andra de vérifier que les débits d'eau de contournement visés sont bien respectés.**



4.4.3. Aléas météorologiques (installations de surface)

Les aléas météorologiques retenus pour le dimensionnement des installations de surface ont été examinés par l'IRSN dans le cadre du GP1, au cours duquel l'Andra a pris l'engagement 2024-E8 visant notamment à « *présenter des éléments relatifs à la capacité d'adaptation de l'installation afin d'assurer une protection face à des niveaux d'aléas susceptibles d'évoluer avec le changement climatique* ». Les éléments relatifs à la prise en compte des aléas météorologiques pour le dimensionnement de l'installation présentés par l'Andra [51], qui font l'objet du présent chapitre, concernent les risques sur l'installation (principalement le génie civil) liés aux températures extrêmes maximales et minimales, aux chutes de neige, aux vents forts, à la tornade et à la foudre.

4.4.3.1. Températures, chutes de neige, vents forts et tornade

Les températures considérées pour la construction des ouvrages de surface sont définies dans [90] et [108]. Pour rappel, l'Andra s'est engagée dans le cadre du GP1 (cf. engagement 2024-E8), s'agissant des températures extrêmes, à justifier « *la suffisance des températures retenues pour sa démonstration de sûreté en regard de températures associées à une fréquence de dépassement cible de 10^{-4} /an et estimées à l'aide de données récentes, en tenant compte de l'impact du changement climatique au travers de scénarios pénalisants de projection climatique, pour un horizon temporel cohérent avec la durée d'exploitation de l'installation* ».

L'IRSN constate que la méthodologie retenue par l'Andra pour le dimensionnement des ouvrages de surface en béton armé en regard des actions thermiques, qui tient compte notamment du retrait du béton susceptible de conduire à de la fissuration et du cumul avec les actions sismiques, est conforme aux Eurocodes et au guide ASN 2/01 [56][57]. L'Andra retient en outre la mise en œuvre de joints de dilatation au maximum tous les 50 mètres entre blocs du bâtiment EP1 afin de limiter les effets liés aux déformations thermiques. **Ces éléments sont satisfaisants.**

Pour ce qui concerne la neige, l'IRSN rappelle que l'analyse menée dans le cadre du GP1 a montré que la charge de neige exceptionnelle de 90 daN.m^{-2} retenue par l'Andra se situe dans la gamme inférieure des nouvelles valeurs préconisées dans le cadre d'un GT intitulé « Vent et Neige »¹³⁸ visant à définir une charge de neige de période de retour décennale [109]. L'IRSN a également rappelé dans son rapport d'expertise du GP1 que des préconisations générales ont été formulées par ce GT concernant l'analyse des risques liés à la neige, notamment le risque d'obstruction des prises d'air des grilles de ventilation ou l'isolement du site (voir ci-après).

S'agissant des vents forts, l'Andra retient des vitesses de vent de 112 km/h (environ 31 m/s) pour le vent moyen et de 194 km/h (environ 53,8 m/s) pour les rafales. L'IRSN a jugé cet aléa satisfaisant dans le cadre du GP1 mais a également rappelé que pour l'analyse des risques liés au vent certaines préconisations générales formulées par le GT « Vent et Neige » nécessitaient d'être prises en compte, notamment concernant les projectiles à retenir.

Ainsi, afin de compléter l'évaluation des risques liés au vent et à la neige, l'IRSN estime que l'Andra devra, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, mener une analyse de robustesse de l'installation en regard des préconisations du GT « Vent et Neige ». Pour la neige, cette analyse devra être menée en analysant l'impact de la prise en compte d'un niveau de neige couvrant la gamme de valeurs de majorations préconisées par ce GT. Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E43](#) de la lettre Andra CG-AMOA-

¹³⁸ Ce GT a émis en 2023, soit postérieurement au dépôt par l'Andra du DDAC, de nouvelles préconisations visant à définir, pour l'analyse de la robustesse des nouvelles installations nucléaires, des niveaux d'aléas cohérents avec les objectifs de sûreté pour ces installations.

LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

S'agissant enfin de la tornade, l'Andra retient pour le dimensionnement du génie civil une tornade d'intensité EF2 et une tornade d'intensité EF3 pour les systèmes, structures et composants formant le noyau dur, à savoir le génie civil des zones tampons des colis primaires et colis de stockage au sein du bâtiment nucléaire de surface EP1, le génie civil du puits VVE et, pour le bâtiment qui lui est associé, les équipements associés à la fonction ventilation extraction. Les caractéristiques de la tornade EF2 étaient jugées satisfaisantes par l'IRSN dans le cadre du GP1. Pour la tornade EF3, l'IRSN soulevait la nécessité de tenir compte d'une vitesse de vent de 68 m/s ainsi que d'une variation de pression atmosphérique et d'une vitesse de chute de pression associée à cette vitesse de vent, et des projectiles conformes au courrier CODEP-DRC-2021-017735 de l'ASN émis dans le cadre de la prise en compte des risques d'agression liés aux tornades pour le dimensionnement des INB [108].

L'IRSN constate d'une manière générale que les épaisseurs des dalles de toiture et des voiles périphériques ainsi que le dimensionnement des ouvrages au séisme (cf. chapitre 4.4.1) et des bâtiments EP1 et VVE au choc d'avion (cf. chapitre 4.4.4) permettent de couvrir les effets des aléas météorologiques ou climatiques extrêmes liés aux températures, à la neige, au vent et à la tornade sur les structures. **Ceci n'appelle pas de remarque.**

4.4.3.2. Foudre (effet direct)

L'Andra indique [51] que des installations extérieures de protection contre la foudre seront mises en place (dispositifs de capture et de descente des courants de foudre). Cependant, l'Andra n'indique pas les bâtiments et équipements qui seront protégés avec ces installations de protection, ni les niveaux de protection retenus le cas échéant. En cours d'instruction, l'Andra a transmis sa démarche générale pour réaliser les analyses de risques liés à la foudre (ARF)¹³⁹ [110]. Elle comprend la déclinaison de la démarche normative (NF EN 62305), complétée par une approche intégrant les risques d'agression d'équipements participant à des fonctions de sûreté par un coup de foudre ou ses effets. L'Andra a également indiqué, au cours de l'instruction, les niveaux de protection retenus pour les systèmes de protection foudre (SPF) des installations de surface de Cigéo. Ainsi, certaines installations de Cigéo¹⁴⁰ ne seront pas pourvues d'un SPF. Pour ces installations, seules des dispositions de protection contre les effets indirects de la foudre sont prévues, **ce qui n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Enfin, une ARF doit être complétée par une étude technique foudre (ETF) pour justifier que les dispositions de protection prévues permettent d'atteindre le niveau de protection requis par l'ARF. La démarche générale retenue par l'Andra pour les ETF des installations du centre Cigéo est décrite dans la note [111]. Cette note est complétée par des notes spécifiques pour chaque bâtiment.

Toutefois, dans le cadre de la présente expertise, l'Andra a uniquement transmis l'ARF et l'ETF réalisées pour le bâtiment santé/sécurité et environnement pour lequel un niveau de protection I est retenu. Ce dernier point est satisfaisant, mais l'IRSN n'est pas en mesure de se prononcer pour les autres installations de surface de Cigéo. **Il appartiendra à l'Andra de justifier, avant les premiers bétons, la maîtrise des risques pour la sûreté liée à la foudre pour l'ensemble de l'installation.**

En tout état de cause, l'IRSN estime que le niveau de protection retenu pour le bâtiment EP1 (niveau IV), qui correspond au plus faible niveau de protection au sens de la norme précitée, n'est pas suffisant au regard de l'enjeu de sûreté associé. En cours d'instruction, l'Andra a indiqué que ce niveau de protection est justifié par l'utilisation des éléments métalliques de la structure comme éléments de protection. L'Andra doit donc démontrer que les dispositions prévues pour ce bâtiment, y compris les éléments de structure potentiellement valorisés, permettent d'atteindre un niveau suffisant de protection. **Par conséquent l'IRSN estime que l'Andra devra justifier, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, que les dispositions prévues pour protéger le bâtiment de surface EP1 contre les effets directs de la foudre permettent d'atteindre un haut**

¹³⁹ L'analyse de risque foudre permet de déterminer le niveau de protection requis pour une cible donnée.

¹⁴⁰ Il s'agit par exemple des locaux pomperies (zones puits et descenderie), de la tête de descenderie de service ou du stockage hydrocarbure en zone descenderie.

niveau de protection. L'adéquation des caractéristiques des éléments de structure éventuellement valorisés, avec le niveau de protection visé, devra être justifiée. Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E44](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

4.4.4. Risques liés à l'environnement industriel, aux voies de communication et à la chute d'aéronef (installations de surface)

Pour l'analyse des risques liés à l'environnement industriel, aux voies de communication et à la chute accidentelle d'un aéronef [51], l'Andra retient comme cibles de sûreté les bâtiments en surface contenant des substances radioactives ou abritant des équipements assurant des fonctions de sûreté ou nécessaires à la mise ou au maintien à l'état sûr des installations. L'IRSN constate que les cibles de sûreté de surface retenues par l'Andra couvrent bien tous les ouvrages assurant ou abritant des fonctions de sûreté de l'INB Cigéo et note que les ouvrages souterrains non directement impactés par ces risques compte tenu de leur profondeur d'implantation, ne sont pas retenus comme cibles. **L'IRSN estime que les cibles de sûreté retenues par l'Andra dans cette analyse de risques sont pertinentes.**

4.4.4.1. Risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication

Pour ce qui concerne les activités industrielles hors du périmètre INB mais présentes sur le centre de stockage Cigéo, l'Andra retient comme source de dangers un accident de camion-citerne transportant respectivement du carburant, du fioul ou du GPL, lors d'une opération de dépotage ou lors des trajets sur les voiries internes au centre de stockage. Compte tenu des distances d'effets évaluées et de l'éloignement des différentes cibles de sûreté telles qu'identifiées à ce stade du projet, l'Andra retient un critère de dimensionnement (flux thermique de 8 kW/m² issu de l'arrêté du 7 février 2012) seulement pour les réservoirs de fioul domestique des centrales de secours 20 kV (en zone puits et en zone descenderie) et de l'usine de ventilation du puits d'air vicié en zone puits (VVT). Pour ce qui concerne les autres cibles de sûreté, l'Andra ne retient aucune exigence à l'égard des effets thermiques et a précisé au cours de l'instruction qu'à ce stade, les cibles de sûreté qui n'ont pas d'exigences de dimensionnement aux effets thermiques externes sont des bâtiments en béton dont la résistance à des flux thermiques inférieurs ou égaux à 8 kW/m² est acquise ; il n'est pas identifié d'installations ou d'équipements susceptibles d'être affectés par les effets d'un incendie car ils sont soit enterrés, soit à l'intérieur d'un bâtiment. Cependant, l'Andra a ajouté que la configuration du centre de stockage pourrait évoluer en termes d'activités industrielles. Par exemple, l'alimentation des cuves de stockage des centrales de secours 20 kV présentes sur le périmètre INB pourraient s'effectuer finalement par des canalisations enterrées à la place de camions depuis un futur emplacement de dépotage, qui n'est pas défini par l'Andra à ce stade. En outre, l'Andra a précisé que la conception et l'analyse de risque associée aux chaudières GPL sont à un stade préliminaire et que des dispositions de conception seront définies dans les phases ultérieures du projet afin de limiter l'impact des potentiels accidents provenant de cette installation. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de mettre à jour, dans la prochaine révision du rapport de sûreté de Cigéo, l'analyse des risques induits par les installations industrielles présentes sur le centre de stockage de Cigéo et de redéfinir les exigences de dimensionnement attendues pour l'ensemble des cibles de sûreté en tenant compte des configurations du site finalement retenues.**

Pour ce qui concerne les canalisations de matières dangereuses présentes dans l'environnement de Cigéo, l'Andra précise dans le DDAC que l'INB Cigéo n'est reliée à aucun réseau de gaz externe et que le réseau GRT gaz le plus proche est situé à 20 km du site. Aucune canalisation de matières dangereuses n'est donc retenue dans l'analyse des risques liés à l'environnement industriel, **ce qui n'appelle pas de remarque.**

Pour ce qui concerne les voies de communication, les risques identifiés sont essentiellement liés à la circulation de camions-citernes pouvant contenir des matières inflammables sur les routes départementales D960 et D175. Les cibles de sûreté les plus proches sont celles de la zone descenderie, situées entre 325 m et 575 m de ces routes. Les cibles de la zone puits se trouvent quant à elles à plus d'un kilomètre des routes externes. D'après les estimations réalisées par l'Andra, seule l'explosion impliquant un camion de GPL sur ces axes routiers conduit à des effets de surpressions sur des cibles de sûreté de la zone descenderie. À cet égard, les modélisations réalisées

par l'Andra pour ce phénomène dangereux considèrent deux brèches (diamètres 50 mm et 80 mm) et la rupture instantanée de la citerne (scénario « brèche majeure » selon l'Andra). Compte tenu des distances d'effets obtenues, l'Andra retient les cas de charge suivants, dont les valeurs sont issues de l'arrêté INB, pour le dimensionnement des cibles susvisées vis-à-vis d'une explosion liée aux voies routières :

- une surpression de 20 mbar¹⁴¹ pour toutes les cibles de sûreté présentes dans la zone descendrie ;
- une surpression de 50 mbar¹⁴² pour le génie civil de la centrale de secours, du poste de distribution 20 kV et ses cuves de fioul, les locaux pomperie incendie (en zone puits et en zone descendrie) et les deux usines de ventilation du puits d'air neuf et du puits d'air vicié (en zone puits).

L'IRSN convient qu'à l'égard des risques d'explosion provenant des voies routières, un UVCE¹⁴³ résultant de l'accident d'un camion-citerne de GPL est le phénomène dimensionnant. Toutefois, dans sa modélisation du scénario représentant le cas de brèche majeure d'une citerne routière de GPL, l'Andra a utilisé le module¹⁴⁴ de calcul d'un logiciel qui, selon l'IRSN, ne permet pas de garantir que les effets de l'UVCE modélisés sont enveloppes des scénarios de brèches majeures pouvant affecter une citerne routière de GPL. A titre d'illustration, l'IRSN a évalué, avec les mêmes hypothèses que l'Andra, en considérant néanmoins un autre module du même logiciel permettant de prendre en compte la brèche majeure de la citerne sous la forme d'une rupture du « trou d'homme » (diamètre de brèche de 407 mm) classiquement retenue pour ce type d'analyse. Avec cette hypothèse, une surpression supérieure à 50 mbar serait ressentie jusqu'à une distance maximale d'environ 700 m, notamment au niveau du génie civil de la centrale de secours en zone descendrie. D'après ces mêmes évaluations, toutes les cibles de sûreté de surface de la zone descendrie situées entre 325 m et 575 m de l'accident pourraient être affectées par une surpression de 100 mbar. La zone puits étant située quant à elle à plus d'1 km de distance, celle-ci ne serait pas impactée par cet accident. Les valeurs de 20 et 50 mbar retenues par l'Andra pour le dimensionnement des cibles de sûreté en zone descendrie n'apparaissent donc pas enveloppes. Aussi, l'IRSN estime que les cas de charges retenus par l'Andra pour le dimensionnement des cibles de sûreté présentes en surface, contre les effets de souffle résultant d'un accident dans l'environnement industriel ou sur les voies de communication autour du centre Cigéo, ne sont pas suffisants. **Par conséquent, l'IRSN estime que, pour le dimensionnement des cibles de sûreté présentes en surface, l'Andra devra retenir, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, une onde de pression dont le caractère enveloppe est justifié au regard des risques liés aux activités industrielles et aux voies de communication dans l'environnement de l'INB Cigéo.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E45](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.



4.4.4.2. Risques liés à la chute accidentelle d'un aéronef

Le présent chapitre porte tout d'abord sur la démarche d'analyse des risques liés à la chute accidentelle d'un aéronef et le cas échéant sur les dispositions retenues à ce titre par l'Andra, autres que le dimensionnement du génie civil à ces risques. Ce dimensionnement fait ensuite l'objet d'un examen spécifique dans la seconde partie du chapitre.

Démarche d'analyse

La démarche d'analyse retenue par l'Andra au regard des risques liés à la chute accidentelle d'un aéronef est menée conformément à la RFS I.1.a [112] sur une base probabiliste en considérant l'aviation générale (avions de moins de 5,7 tonnes), commerciale (avions de plus de 5,7 tonnes), militaire et les hélicoptères. Cette démarche consiste à évaluer, pour chaque famille d'aéronefs, les probabilités de chute sur chacune des cibles de sûreté retenues pour cette agression. Les résultats sont alors comparés aux objectifs probabilistes définis dans la RFS

¹⁴¹ Seuil de destruction significative de vitres.

¹⁴² Seuil des dégâts légers sur les structures.

¹⁴³ Unconfined vapour cloud explosion.

¹⁴⁴ Il s'agit du module « Catastrophic Rupture » du logiciel PHAST.

précitée et, si nécessaire, des dispositions constructives ou d'exploitation sont retenues afin de maîtriser le risque.

En complément des calculs probabilistes demandés par cette RFS, l'Andra a mené des analyses déterministes, pour chacune des cibles de sûreté de surface de l'INB Cigéo, afin d'identifier les dispositions de protection constructives ou d'exploitation à mettre en place vis-à-vis d'une chute d'aéronef. Dans ce cadre, l'Andra détermine un avion de référence sur la base des probabilités calculées : un avion de chasse (aviation militaire) pour le bâtiment nucléaire de surface (incluant le bâtiment EP1, la tête de descenderie colis et le bâtiment ETH) et un avion de type Learjet 23 (aviation générale) pour les autres cibles (tête de descenderie service, terminal ferroviaire nucléaire, centrale de secours, pomperies et réservoirs incendie et puits VVE et VFE).

De manière générale, l'IRSN estime sur la base de ses propres travaux [113] que, pour une installation nouvelle comme Cigéo, la démarche probabiliste de la RFS n'est pas suffisante au regard des enjeux de sûreté auxquels l'installation doit répondre sur une durée séculaire. Toutefois, les aéronefs de référence retenus par l'Andra pour définir des dispositions de protection constructives apparaissent adaptés aux enjeux de sûreté associés à chacune des cibles. Aussi, l'examen de l'IRSN porte uniquement sur l'étude déterministe réalisée par l'Andra en complément des calculs probabilistes.

Pour ce qui concerne les bâtiments nucléaires de surface (incluant le bâtiment EP1, la tête de descenderie colis et le bâtiment ETH), les exigences de comportement et les dispositions retenues contre la chute d'avion sont détaillées dans le chapitre 4.1. **S'agissant de l'exigence de non-introduction de kérosène, l'IRSN rappelle (cf. chapitre 4.3.1.6) que l'Andra devra prendre en compte, à défaut de justification de cette exigence, la combustion des charges calorifiques du bâtiment nucléaire de surface EP1 cumulées à celle de kérosène en cas de chute d'un avion.** Ce point fait partie de l'**engagement 2024-E37** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport (cf. chapitre 4.3.1.6). Le dimensionnement du génie civil à l'impact d'un avion militaire est quant à lui examiné dans ce chapitre (cf. *infra*).

Pour ce qui concerne la tête de descenderie de service, les éventuelles conséquences d'une chute d'avion sur celle-ci seraient, selon l'Andra, uniquement liées à l'écoulement de kérosène enflammé, l'impact mécanique sur cet ouvrage n'ayant pas de conséquences sur la sûreté. Toutefois, l'Andra exclut cette inflammation en raison du faible volume de kérosène potentiellement impliqué (de l'ordre 750 litres) au regard des dimensions de la tête de cette descenderie, de la cinétique d'inflammation rapide de celui-ci et des dispositions constructives incluant une orientation du radier de la tête de descenderie vers l'extérieur (en dehors de la descenderie elle-même). **Ceci est acceptable.**

Pour ce qui concerne le terminal ferroviaire nucléaire, l'Andra considère la présence permanente de deux convois disposés côte à côte et contenant chacun dix emballages. L'Andra a mis en place une exigence d'exploitation visant à écarter les convois d'une distance suffisante pour exclure l'agression concomitante des deux convois. De plus, l'Andra précise que sur un même convoi, l'écartement entre les emballages de transport est d'environ 15 m, distance supérieure à l'envergure de 11 m d'un aéronef type Learjet 23 de l'aviation générale ; la mise en œuvre de ces dispositions par l'Andra vise à se placer dans le cas d'un scénario où un seul emballage de transport serait agressé par l'impact direct d'un aéronef. Au titre de la démarche « déterministe » que l'IRSN considère nécessaire de retenir (cf. *supra*), le déconfinement de l'emballage de transport et des colis primaires qu'il contient doit être postulé. A cet égard, l'Andra a déjà évalué un scénario d'agression d'un emballage de transport avec un tel déconfinement¹⁴⁵. Bien que l'évènement initiateur ne soit pas le même, **l'IRSN considère que le scénario de l'impact direct d'un aéronef sur un emballage de transport est couvert par ce scénario dont les conséquences radiologiques n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.** Outre les effets liés à l'impact direct d'un aéronef sur un emballage de transport, l'IRSN estime nécessaire de postuler des effets indirects thermiques qui pourraient aussi impacter les emballages de transport à la suite de l'impact d'un aéronef (provoquant un feu de kérosène) à proximité de leurs positions. L'IRSN note que les emballages de transports disposent d'une protection liée aux exigences du certificat d'agrément, notamment à l'incendie (800 °C,

¹⁴⁵ Déconfinement d'un emballage de transport et des colis primaires qu'il contient résultant d'une chute dans la fosse du hall de déchargement à la suite d'une défaillance du pont de manutention sécurisé et du matelas amortisseur [51].

30 minutes). Néanmoins, comme indiqué dans le chapitre 4.3.1.4, pour ce qui concerne la maîtrise des effets d'un incendie affectant un emballage de transport, dans la zone de déchargement des emballages de transport, **il appartiendra à l'Andra de démontrer que ces exigences complétées le cas échéant par les DPCI de l'installation sont suffisantes, en particulier dans le cas d'un feu de kérosène à proximité de la position de l'emballage de transport.**

La cible constituée par les « centrales de secours » (une en zone descenderie et une en zone puits, d'architecture identique) est composée de trois bâtiments distincts comprenant le poste de production/distribution électrique 20 kV fournissant l'électricité en secours et les postes de distribution normal/secours 20 kV, voie A et voie B. L'Andra considère non plausible une chute d'avion entraînant la perte concomitante de l'alimentation normale provenant du réseau RTE et des centrales de secours compte tenu de la distance importante séparant ce poste RTE des centrales de secours. **Ceci est acceptable dans le principe.** De plus, l'Andra prévoit de séparer entre eux les trois bâtiments de chacune des centrales de secours par une distance au moins égale à l'envergure d'un aéronef type Learjet 23 soit 11 m. Selon l'Andra, cette distance est suffisante pour garantir la disponibilité d'au moins un poste. Comme pour le terminal ferroviaire, l'Andra se limite à prendre en compte les effets liés au seul impact direct d'un aéronef, ce qui n'est pas suffisant compte tenu de l'agression potentielle de ces ouvrages par les effets indirects thermiques liés à l'impact d'un aéronef à proximité de leurs positions. **Il conviendra que, dans les phases suivantes du projet Cigéo, ceci soit justifié au regard des effets autres que l'impact direct de l'aéronef et de la résistance éventuelle des bâtiments ou équipements à préserver.**

Deux pomperies incendie sont prévues, une en zone descenderie et l'autre en zone puits. Chaque pomperie est reliée à trois réservoirs d'eau indépendants, enterrés, dimensionnés pour assurer unitairement la maîtrise d'un éventuel incendie sur l'INB. Afin d'éviter l'agression simultanée, les trois réservoirs d'eau sont espacés d'une distance minimale de 14,5 m, supérieure à l'envergure d'un aéronef type Learjet 23. **L'IRSN considère que ceci est acceptable dans le principe, le caractère enterré des réservoirs permettant une protection complémentaire.**

Pour ce qui concerne les émergences du puits VVE (usine de ventilation, carneaux de ventilation, tête de puits et émissaire de rejet), l'Andra précise que des dispositions sont mises en place vis-à-vis des conséquences indirectes liées aux vibrations d'ébranlement (les équipements actifs du réseau de ventilation et les équipements nécessaires aux fonctions support resteront fonctionnelles) et à l'incendie induit (liner métalliques, rétentions au droit des ouvrants). **Ceci est acceptable dans le principe. Ces dispositions sont analysées dans le chapitre 4.1.**

En revanche, l'Andra ne prévoit des dispositions équivalentes pour les émergences des puits VFE. Ainsi, en cas de chute d'un aéronef de l'aviation générale, l'apport d'air neuf dans l'installation souterraine assuré par la ventilation de soufflage est perdu. **Les solutions compensatoires mises en œuvre par l'Andra sont analysées au chapitre 4.2.2.**

Enfin, l'Andra indique dans le DDAC [51] que les dispositions de maîtrise des risques retenues dans le cadre de l'analyse de chute d'avion ci-dessus sont suffisantes pour assurer la maîtrise des risques liés aux chutes d'hélicoptère. En effet, au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que les hélicoptères ont des caractéristiques (masse, vitesse) qui conduisent à une force d'impact moins pénalisante que celles générées par un avion de l'aviation générale et militaire. **Ceci est acceptable.**

Résistance du génie civil

L'Andra retient de dimensionner le génie civil de l'émergence du puits VVE à l'impact d'un avion de l'aviation générale et le bâtiment EP1 à l'impact des avions de l'aviation militaire et de l'aviation générale. Leurs exigences de comportement sont détaillées en Annexe T9. L'analyse de la résistance de ces éléments aux sollicitations thermomécaniques fait l'objet de compléments, présentés au chapitre 4.3.1.6 relatif à la résistance du génie civil aux sollicitations thermiques.

Bâtiment EP1

Hypothèses et méthodes de dimensionnement

L'Andra retient, pour le dimensionnement du génie civil des blocs d'EP1, l'impact d'une chute d'avion de type militaire compte tenu du fait que la masse et la vitesse d'impact sont plus élevées que celles de l'aviation générale. L'Andra considère notamment pour l'impact de l'avion militaire sur les parois extérieures un angle d'impact par rapport à l'horizontale égal à 45° pour les dalles et de 27° pour les voiles. Les calculs de dimensionnement et les vérifications structurelles sont réalisés selon les règles Eurocodes [56] complétées de [58] et [59].

L'IRSN signale que, selon l'état de l'art, les trajectoires d'impact de l'avion militaire pour les études des ouvrages sont supposées normales aux parois extérieures (voiles périphériques et dalles de toiture), ce qui n'est pas cohérent avec les hypothèses moins conservatives prises en compte par l'Andra pour les études du bâtiment EP1. Sur ce point, l'IRSN observe que l'Andra fait référence au code ETC-C 2010 de l'AFCEC [114]. Or, ce code préconise des angles de chute normaux aux parois. Il en est de même pour le référentiel IRSN [115], relatif à la prise en compte d'une chute d'aéronef accidentelle. **Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra, pour le dimensionnement du bâtiment EP1, prendre en compte, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, des trajectoires d'impact de l'avion militaire normales aux parois extérieures (dalles de toiture et voiles périphériques) en cohérence avec l'état de l'art.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E46](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Pour ce qui concerne l'exigence de non-perforation, les dalles de toiture et les voiles extérieurs sont renforcés afin de garantir cette exigence ; l'endommagement irréversible de la paroi est accepté. Afin d'assurer cette non-perforation, l'Andra retient un critère de déformation maximale des armatures longitudinales égal à 5 %. L'IRSN estime que dans les zones de recouvrement d'armatures, une déformation de 5 % ne permet pas de garantir le maintien de l'adhérence acier-béton et l'absence d'endommagement important de la paroi. Toutefois, l'IRSN souligne que les valeurs des critères retenues par l'Andra seraient néanmoins compatibles avec des dispositions constructives telles que le manchonnage des armatures par le biais de coupleurs dans les parois périphériques des ouvrages.

S'agissant plus particulièrement des dalles, la rupture des aciers d'effort tranchant est également interdite (déformation des armatures transversales plafonnée à 5 %) afin d'éviter les flèches (déplacements perpendiculaires à la dalle) excessives mais elle est admise pour les voiles. La fissuration et la plastification du béton sont autorisées. La dalle de second rang du concept de coque-avion à double dalle ou la dalle périphérique du concept « dalle-liner » (cf. chapitre 4.1) assurent le maintien de la fonction de confinement et l'absence d'introduction de kérosène dans les locaux contenant des EIP. Pour le concept à double dalle, l'Andra prévoit que les dalles en béton de second rang ne doivent pas subir de déformation irréversible. Pour ces structures, l'Andra retient que les aciers de renforcement restent dans le domaine élastique et le béton ne dépasse pas sa limite de compression afin de satisfaire cette condition. Pour le concept « dalle-liner », des déformations plastiques sont acceptées car le liner est situé en sous-face des dalles impactées. Des calculs complémentaires de vérification au cisaillement sont réalisés suivant des méthodes analytiques. **Cela n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

Concernant les conséquences indirectes d'une chute d'avion [51], l'Andra précise que, pour le bâtiment EP1, les EIP et les équipements susceptibles de les agresser sont dimensionnés à l'égard des vibrations induites par la chute d'avion [55]. Néanmoins, aucune étude d'ébranlement n'a été transmise dans le DDAC et les notes de calculs ne présentent pas de recueil de spectres vibratoires liés au choc d'un avion au droit des EIP principaux et de leurs agresseurs potentiels, alors que ces spectres sont susceptibles d'être enveloppes, pour les hautes fréquences, des spectres sismiques utilisés pour le dimensionnement des EIP et de leurs ancrages, **ce qui n'est**

pas satisfaisant. Aussi l'IRSN considère que l'Andra devra, afin de démontrer la sûreté de l'installation pendant et après la chute d'avion, présenter, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface :

- une analyse fonctionnelle permettant d'identifier les EIP requis en cas de chute d'avions et leurs agresseurs potentiels ;
- les spectres vibratoires induits par la chute d'avion représentatif de l'aviation militaire sur le bâtiment EP1, ainsi que les études d'ébranlement associées aux EIP dimensionnés à la chute d'avion.

Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E47](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant

Pour ce qui concerne les exigences de supportage, l'IRSN souligne que malgré les avancées dans le domaine de la simulation numérique en dynamique rapide, il est difficile de dimensionner les ancrages d'un équipement au droit de l'impact d'un projectile. Aussi, dans la mesure du possible, il est préférable de ne pas fixer d'EIP ou d'équipements susceptibles d'agresser des EIP, sur les parois périphériques recevant l'impact ou sur les parois internes situées à proximité en cas de concept « dalle-liner ». Ainsi, pour les EIP ou agresseurs d'EIP fixés sur les parois périphériques impactées par une chute d'avion ou à proximité, l'Andra pourrait étudier des mesures conservatoires permettant d'atteindre les objectifs assignés sans les faire porter directement par ces équipements.

Il appartiendra ainsi à l'Andra, avant les premiers bétons, de définir les critères limites de déformation des armatures et du béton permettant de garantir le respect des exigences de supportage (e.g. déformation maximale des aciers limitée à 1 ou 2 %) et de présenter :

- pour les EIP ou agresseurs potentiels d'EIP fixés sur les parois périphériques pouvant être impactés par un avion, les mesures conservatoires permettant d'atteindre les objectifs assignés sans les faire porter directement par ces équipements (stabilité de l'équipement avec la perte d'un ou plusieurs supports, protection de l'équipement pouvant être agressé, etc.) ;
- les modalités mises en œuvre pour les EIP situés sur les parois internes à proximité de la zone d'impact (éloignement de la zone d'impact, limitation des conséquences en cas de chute, etc.).

Calculs de dimensionnement

Modélisation et démarche de vérification

L'Andra retient, compte tenu des endommagements attendus au niveau de la zone d'impact, une modélisation non linéaire des matériaux. Sur la base de ces études, l'Andra précise que les structures internes subissant les effets les plus importants d'un impact se situent en contact direct avec les parois externes. Il s'agit des voiles porteurs et des voiles de contreventement de la structure reliés au radier. L'Andra a ainsi étudié l'impact au centre des parois externes maximisant le comportement en flexion de la paroi impactée et au droit des éléments porteurs des structures internes maximisant les efforts tranchants, **ce qui est satisfaisant**.

L'IRSN constate que l'Andra n'a pas étudié l'effet de l'impact sur le comportement à l'égard de l'exigence de confinement de la dalle en second rang du concept de « coque avion » à « double dalle » (cf. chapitre 4.1), **ce qui n'appelle néanmoins pas de commentaire de la part de l'IRSN au stade du DDAC**. En effet, seul le scénario d'impact vertical d'un avion sur la dalle de toiture est susceptible de conduire à l'intrusion massive de kérosène dans le bâtiment EP1. Or dans cette situation les efforts verticaux sont globalement transmis directement au radier par les voiles porteurs en sollicitant faiblement les dalles intérieures intermédiaires de l'ouvrage, engendrant ainsi une déformation irréversible mais réduite affectant faiblement le confinement. **Il appartiendra à l'Andra, avant les premiers bétons, de démontrer le respect des exigences de participation au confinement amélioré de la barrière interne composée par la dalle en second rang et protégée par les locaux « fusibles ».**

En cas d'absence de locaux « fusibles », le confinement est assuré par le concept « dalle-liner » ; la vérification de l'absence de perforation du liner permet d'assurer l'étanchéité et par voie de conséquence le non-écaillage de la dalle, ainsi que la non-introduction de kérosène. L'Andra définit ainsi un critère d'érosion, de manière conservative, à 15 % de déformation pour le liner et à 5 % de déformation pour les goujons. L'IRSN estime que

le critère en déformation de 15 % retenu par l'Andra pour vérifier l'absence de rupture en traction du liner est élevée et ne correspond pas à l'état de l'art français ; il ne permet pas de garantir l'absence de déchirement du liner. **Il appartiendra à l'Andra, avant les premiers bétons, de définir et prendre en compte un critère de déformation limite du liner adaptée à l'état d'endommagement attendu.**

Enfin, à l'instar de ce qui a été dit précédemment pour les études de chute de charge (cf. chapitre 4.3.3.3), l'IRSN rappelle que les calculs réalisés en dynamique rapide ici pour la chute d'avions sont très dépendants des lois de comportement non-linéaires des matériaux et des caractéristiques du modèle et relève l'absence de démonstration du conservatisme des calculs, **ce qui n'est pas satisfaisant sur le principe. Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, réaliser systématiquement des études de sensibilité pour les études du comportement des structures, reposant sur des calculs numériques en dynamique rapide non-linéaire, effectuées à l'égard des impacts d'avions.** Ce point fait partie de l'**engagement 2024-E39** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Résultats des calculs de vérification

L'Andra a effectué des études paramétriques de dimensionnement de l'enveloppe externe pour des dalles et voiles de dimension courante prenant en compte différentes portées de dalles et de voiles ainsi que différentes épaisseurs et sections d'aciers. L'Andra a également étudié l'effet de l'impact d'avion sur des dalles et voiles spécifiques qui ne sont pas couverts par les calculs de la zone courante, avec ou sans liner suivant le concept de « coque avion » retenu en fonction de la localisation des EIP et des colis, ainsi que sur les structures internes avoisinantes. L'Andra présente les résultats suivants :

- les déformations maximales de la dalle pendant toute la durée du calcul et l'évolution de la flèche (en mm) ;
- les déformations plastiques dans les nappes d'aciers longitudinaux supérieures et inférieures et dans les aciers d'effort tranchant des dalles de toiture ou des voiles périphériques et des structures internes, ainsi que dans les liners et les goujons le cas échéant ;
- les déformations plastiques du béton en compression sur la face interne et les déformations principales de traction sur la face externe (indication sur l'état de fissuration).

L'IRSN note que les résultats des calculs présentés ne comprennent pas l'évolution au cours du temps de la force d'impact au contact projectile / dalle, du bilan énergétique et notamment un bilan des énergies fictives d'origine numérique, des contraintes des aciers et de l'état d'endommagement du béton, qui sont pourtant indispensables pour ce type de calcul afin de vérifier la pertinence et la validité des résultats des simulations, d'autant plus que les déformations plastiques maximales des aciers sont proches du critère limite retenu (5 %) dans certains cas. **Avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, il appartiendra à l'Andra, dans le cadre des études de dimensionnement des dalles et voiles soumis à la chute d'avion de présenter en complément des flèches et des déformations, l'évolution temporelle de la force d'impact, le bilan énergétique complet et l'état de contrainte des aciers et d'endommagement du béton.**

Pour ce qui concerne la vérification de la stabilité globale, l'Andra indique que la plupart des blocs constituant le bâtiment EP1 subissent un glissement dans le cas d'un impact d'avion sur les voiles extérieurs, qui sont pour les blocs les plus légers, de l'ordre du centimètre, ce qu'elle juge acceptable en comparaison de la taille des joints inter-bloc de 10 cm. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Pour ce qui concerne les effets d'ensemble, les résultats des calculs de vérification pour les dalles et voiles extérieurs constituant la première barrière ne présentent pas de dépassement des critères de déformation des aciers et du béton malgré un endommagement important des éléments impactés. En l'absence d'études de sensibilité sur les principaux paramètres, l'IRSN considère toutefois que les résultats présentés par l'Andra doivent être considérés avec précaution et uniquement comme des ordres de grandeur.

Pour ce qui concerne les effets locaux, la non-perforation des dalles et voiles extérieurs est justifiée selon l'Andra à partir de calculs explicites en dynamique rapide montrant l'absence de rupture des armatures, **ce qui est**

acceptable dans le principe au stade du DDAC, sous réserve d'avoir procédé à des études de sensibilité tenant compte des incertitudes liées aux méthodes de calculs. L'Andra n'ayant ni effectué de justification de non-perforation à l'aide de méthodes simplifiées éprouvées (e.g. méthode CEB¹⁴⁶), ni effectué d'études de sensibilité, **l'IRSN considère que les justifications de non-perforation sont insuffisantes. Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra démontrer, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, la non-perforation des dalles et voiles extérieurs pour les impacts de l'avion militaire à l'aide de méthodes simplifiées éprouvées. A défaut, l'Andra justifiera l'absence de rupture des armatures en s'appuyant sur une approche numérique plus complète dédiée à la justification de la non-perforation et faisant appel à des études de sensibilité.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E48](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

L'IRSN souligne en outre que les phénomènes localisés (écaillage, perforation) sont généralement appréciés à l'aide de formules empiriques développées à la suite de campagnes d'essais.

Les résultats de calculs pour les liners associés aux goujons montrent que, en cas de choc d'avion, la résistance aux sollicitations mécaniques des liners et des goujons de supportage est vérifiée, **ce qui n'appelle pas de remarque sous réserve de procéder à des études de sensibilité.** Seules les vérifications de non-rupture par traction et cisaillement de l'acier et par extraction-glisement ont été réalisées pour les goujons par l'Andra, les vérifications de non-rupture du béton n'ont pas été effectuées (e.g. arrachement du cône de béton). **Il appartiendra à l'Andra, avant les premiers bétons, de procéder à l'ensemble des vérifications de résistance acier et béton pour les goujons.**

Dispositions constructives

L'Andra précise que lors de la chute d'avion, la reprise des efforts d'impact se produit par un travail en filet des aciers longitudinaux de l'enveloppe externe du bâtiment EP1 jusqu'à la rupture. Cependant, l'IRSN estime que la transmission des efforts entre les armatures ne peut pas être assurée au droit des recouvrements en cas d'écaillage ou de dégradation importantes du béton. Ainsi la mise en œuvre de coupleurs dans la coque avion du bâtiment EP1 est indispensable. Au cours de l'instruction, l'Andra n'a pas explicitement retenu cette disposition. Aussi, en l'absence de mention explicite de la mise en œuvre systématique de coupleurs dans les zones d'impact de l'enveloppe externe, l'IRSN estime que la démonstration de la résistance de la coque avion n'est pas acquise, **ce qui n'est pas acceptable. Aussi l'IRSN considère que l'Andra devra mettre en œuvre des coupleurs dans les dalles et voiles extérieurs au regard de la chute d'avion. Ces coupleurs devront être mentionnés dans les notes et les carnets de dispositions constructives disponibles avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E49](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Emergence du puits VVE

L'émergence du puits VVE est dimensionnée par l'Andra à l'égard de l'aviation générale en statique équivalent¹⁴⁷. **L'IRSN considère que cette approche conservative est satisfaisante.**

Pour les sites qui sont à plus de 5 km d'un aérodrome comme Cigéo, l'Andra considère des trajectoires d'impact d'avion situées dans des plans verticaux perpendiculaires aux parois, l'angle de la trajectoire avec la verticale étant compris entre 0 et 45° conformément à [116], **ce qui n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.** Les points d'impact étudiés sont choisis de façon à déterminer les extrema des sollicitations en flexion et en cisaillement et des impacts sont ainsi considérés au centre et en périphérie des parois, **ce qui est satisfaisant.**

¹⁴⁶ Comité européen du béton en annexe de l'ETC-C présentant des formules empiriques disponibles dans la littérature technique et dont le domaine de validité est applicable à ce type d'impact.

¹⁴⁷ Il s'agit ici de convertir un problème dynamique en problème statique équivalent, technique qui permet des calculs rapides et aisés et en général conservatifs.

Les cas de charges de chute d'avion sont appliqués sur les parois impactées puis combinés avec les cas de charges permanents et d'exploitation. Le dimensionnement des structures pour les différentes combinaisons de charges incluant la chute d'avion est effectué selon une méthode d'analyse élastique linéaire. **Ceci est satisfaisant.**

Concernant l'étude des effets locaux à la chute d'avion, l'Andra vérifie bien l'absence de perforation forfaitairement pour le moteur de l'aviation générale, en application de [114] et [116]. **Ceci est satisfaisant.** En revanche, l'IRSN note qu'aucune vérification analytique de l'absence d'écaillage de la face interne de la paroi impactée n'est présentée. **Il appartiendra à l'Andra, avant les premiers bétons, de procéder aux justifications de non-écaillage en cas de chute d'avion à l'aide des formules empiriques usuelles, ou le cas échéant de démontrer l'absence d'agression des EIP situés à proximité des parois soumises à l'impact des avions de l'aviation générale.**

Pour ce qui concerne la stabilité d'ensemble de l'usine de ventilation, l'Andra considère qu'elle est garantie compte tenu du poids élevé de l'ouvrage en comparaison de la force d'impact, ce qui justifie pour l'IRSN l'absence de démonstration de la stabilité d'ensemble et **n'appelle pas de remarque.** La stabilité d'ensemble de la coiffe est assurée par les pieux de fondation qui sont dimensionnés notamment par l'impact latéral de l'aviation générale, **ce qui est satisfaisant.**

Dans [90], l'Andra fait référence au dimensionnement aux vibrations induites par la chute d'avion des équipements actifs du réseau de ventilation et des fonctions supports associées de l'émergence du puits VVE. Or l'IRSN constate, comme pour le bâtiment EP1, qu'aucune étude d'ébranlement n'a été transmise dans le DDAC et que l'Andra ne présente pas de recueil de spectres d'ébranlement au droit des EIP principaux. **Ceci n'est pas satisfaisant. Aussi l'IRSN considère que l'Andra devra, afin de démontrer la sûreté de l'installation pendant et après la chute d'avion, présenter, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface :**

- **une analyse fonctionnelle permettant d'identifier les EIP requis en cas de chute d'avions et leurs agresseurs potentiels ;**
- **les spectres vibratoires induits par la chute d'avion représentatif de l'aviation générale sur l'émergence de puits VVE, ainsi que les études d'ébranlement associées aux EIP dimensionnés à la chute d'avion.**

Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E47](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

4.5. Evaluation d'impact

Le présent chapitre porte sur l'évaluation des impacts radiologiques et chimiques de Cigéo, sur les personnes et sur l'environnement, en fonctionnement normal (chapitre 4.5.1) puis en situations incidentelles et accidentelles (chapitre 4.5.2). Les objectifs de protection des travailleurs et du public retenus par l'Andra à l'égard des risques radiologiques font l'objet du chapitre 3.7 du présent rapport.



4.5.1. Fonctionnement normal

Ce chapitre décrit tout d'abord les rejets radioactifs et chimiques de Cigéo identifiés par l'Andra en fonctionnement normal [117], puis présente l'examen par l'IRSN des impacts sanitaires et sur l'environnement de ces rejets. Le risque d'exposition des travailleurs en fonctionnement normal est examiné au chapitre 4.2.1.

4.5.1.1. Identification des rejets

Les effluents liquides susceptibles de contenir des substances radioactives proviennent des « zones à production possible de déchets nucléaires » (**ZppDN**). L'Andra estime que leurs volumes annuels sont de l'ordre de 30 m³ pour le bâtiment EP1, provenant majoritairement de la condensation au niveau des unités intérieures de récupération d'énergie et dans une moindre mesure d'effluents issus du local de fermeture des colis de stockage MA-VL clavés, et de 55 m³ pour l'installation souterraine¹⁴⁸, principalement composés des eaux d'exhaure des alvéoles du quartier pilote HA. Leur activité maximale est de l'ordre de 10 Bq/L en α global et 100 Bq/L en β

¹⁴⁸ Pour la phase de fonctionnement précédant la mise en service du quartier de stockage HA (fonctionnement du quartier MA-VL et du quartier pilote HA).

global. L'Andra prévoit de les transporter hors du site vers une station de traitement d'effluents liquides radioactifs, comparable aux stations de traitement d'Orano La Hague ou à l'usine de traitement Cyclife à Marcoule (ex Centraco).

Pour les effluents liquides susceptibles de contenir des substances chimiquement toxiques, l'Andra identifie les eaux pluviales, les eaux de ruissellement des versées, les eaux usées et les eaux issues de l'installation souterraine (par exemple, eaux d'exhaure de puits et eaux liées au fonctionnement du tunnelier). Ces eaux sont susceptibles d'être polluées par des matières en suspension, des métaux lourds, des hydrocarbures et des sulfates. L'Andra prévoit de les collecter et de les traiter sur site, par exemple par décantation ou filtration. Les eaux usées et les eaux issues de l'installation souterraine traitées sont prioritairement réutilisées sur site ; l'éventuel surplus et les eaux pluviales sont rejetés dans les eaux superficielles (Bureau, Orge ou Ormançon). L'Andra n'envisage aucun rejet dans les eaux souterraines. En sortie des filières de traitement, les effluents devront respecter les valeurs limites des paramètres surveillés, qui seront fixées au travers d'une future demande d'autorisation de rejet. A titre d'ordre de grandeur, l'Andra prévoit de rejeter en phase de fonctionnement en moyenne 34 m³/j d'eaux usées et 95 m³/j d'eaux issues de l'installation souterraine dans l'Ormançon, et 44 m³/j d'eaux usées et 92 m³/j d'eaux issues de l'installation souterraine dans la Bureau¹⁴⁹.

Des éléments radioactifs gazeux (³H, ¹⁴C et ⁸⁵Kr) peuvent être relâchés, en très faible quantité, par certains colis MA-VL et des aérosols provenant de traces de contamination labile sur la surface externe des colis primaires peuvent être remis en suspension par la ventilation. L'Andra évalue les rejets radioactifs atmosphériques maximaux, pour la zone souterraine, à environ 300 GBq/an de ³H et de ¹⁴C, 5 000 GBq/an de ⁸⁵Kr, 85 kBq/an de particules émettrices β/γ, 8,5 kBq/an de particules émettrices α et, pour l'installation nucléaire de surface, à environ 3 GBq/an de ³H et de ¹⁴C, 50 GBq/an de ⁸⁵Kr, 600 Bq/an de particules émettrices β/γ, 60 Bq/an de particules émettrices α.

Enfin, comme sources d'émission atmosphérique de substances chimiques toxiques, l'Andra retient la circulation de véhicules sur le site et sur les routes à proximité, le fonctionnement d'engins et la présence de stocks de matériaux à l'air libre (notamment les versées), ainsi que les émissaires des bâtiments de Cigéo. Les deux premiers types de sources émettent des particules, des composés organiques volatils et des polluants de type oxydes d'azote. Les émissaires canalisent quant à eux des poussières, des oxydes de carbone, des oxydes de soufre, du monoxyde de carbone, des hydrocarbures, des dioxines et des furanes.

4.5.1.2. Impact sanitaire des rejets radioactifs et de l'irradiation

Comme indiqué ci-avant, l'IRSN constate que l'Andra ne prévoit aucun rejet d'effluent liquide susceptible de contenir des substances radioactives, étant donné qu'elle prévoit de les transporter dans une station de traitement extérieure¹⁵⁰. Néanmoins, l'IRSN estime qu'il est *a priori* difficile d'exclure toute contamination induite des effluents collectés et traités en vue de leur rejet par la station de traitement de l'installation, dans la mesure où certains radionucléides difficilement retenus, tels que le tritium, sont par exemple susceptibles d'être rabattus, en faible quantité, par la pluie et gérés en tant qu'eau pluviale. L'IRSN attire de ce fait l'attention sur l'importance de la surveillance radiologique autour des installations de Cigéo.

S'agissant des effluents atmosphériques, l'Andra simule leur dispersion en considérant un débit de rejet constant et suivant les données météorologiques locales observées à la station d'Houdelaincourt sur la période 2015-2019. Comme au stade du DOS, les particules émettrices α sont assimilées à du ²³⁹Pu et les particules émettrices β/γ sont assimilées à du ⁹⁰Sr et l'Andra retient les valeurs des facteurs de transfert dans la biosphère recommandées par l'AEIA [118]. Les personnes représentatives de la population sont les habitants des sept villages les plus proches du site de Cigéo (enfants de 1-2 ans, 6-15 ans et adultes), supposées présentes en permanence dans l'aire extérieure de leur lieu d'habitation. Les voies d'exposition considérées par l'Andra dans son évaluation sont l'irradiation externe par le panache et par les dépôts au sol, l'inhalation du panache (et

¹⁴⁹ Ces volumes peuvent différer de ceux estimés pour la phase de construction initiale.

¹⁵⁰ Les conséquences de la prise en charge de ces effluents sur l'impact de ces installations, qu'il appartiendra à l'exploitant de l'installation en charge de leur traitement d'évaluer, ne fait pas partie du périmètre de la présente expertise. En tout état de cause, l'IRSN estime que les caractéristiques de ces effluents ne devraient pas conduire à modifier substantiellement l'impact des installations précitées.

passage transcutané pour le tritium) et la consommation d'aliments contaminés. Les débits respiratoires retenus sont ceux recommandés par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) [119]. Les consommations alimentaires proviennent d'une enquête locale de 2013 [120] complétée par les données de l'enquête INCA3 [121] pour les enfants. Les coefficients de dose par type d'exposition sont ceux de l'arrêté de 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants [64] et de l'US EPA [122]. Sur la base de ses modélisations, l'Andra évalue les doses efficaces les plus élevées, de l'ordre de 1 µSv/an essentiellement due à l'ingestion de ¹⁴C, pour le groupe multi-activités situé à Bure et conclut que cet impact est très inférieur à 1 mSv/an. L'IRSN note que l'Andra ne tient pas compte, dans son analyse de l'impact, des voies d'exposition secondaires que sont l'inhalation de particules déposées au sol puis remises en suspension et l'ingestion involontaire de sol et de poussières. **Aussi, même si cela n'est pas susceptible de remettre en cause l'ordre de grandeur de l'exposition évalué par l'Andra, l'IRSN considère que l'Andra pourrait, dans l'objectif de compléter son étude d'impact, quantifier les voies d'exposition secondaires que sont l'inhalation de particules déposées au sol puis remises en suspension et l'ingestion involontaire de sol et de poussières. A défaut, l'Andra pourrait justifier que ces deux voies d'exposition sont négligeables.**

En outre, l'IRSN constate que, comme au stade du DOS, l'Andra n'a pas justifié le caractère pénalisant de l'hypothèse relative à l'assimilation de toutes les particules à du ²³⁹Pu ou du ⁹⁰Sr. **L'IRSN convient que ces deux radionucléides conduisent à un ordre de grandeur de l'exposition globalement pénalisant du point de vue de la radiotoxicité mais pas nécessairement vis-à-vis des transferts dans l'environnement** (comparativement, par exemple, au ¹⁴C ou au ²²⁶Ra). De plus, il existe dans l'inventaire radiologique de Cigéo quelques radionucléides (par exemple, ²²⁷Ac, ²²⁹Th, ²³¹Pa ou ²⁴⁸Cm) et des formes chimiques du ²³⁹Pu et du ⁹⁰Sr dont les coefficients de dose sont plus élevés que ceux considérés par l'Andra pour le ²³⁹Pu et le ⁹⁰Sr, sous leur forme chimique par défaut. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de justifier que l'hypothèse retenue conduit bien à une estimation pénalisante de la dose**, en tenant compte non seulement des coefficients de dose mais aussi des concentrations relatives attendues des différents radionucléides dans les compartiments de l'environnement et dans les denrées.

S'agissant enfin de l'exposition externe directe aux colis de déchets radioactifs, l'Andra indique que l'impact est négligeable du fait de l'éloignement des populations et des dispositifs de protection prévus. Le débit de dose à la clôture, du fait de la présence de colis dans le bâtiment de surface et dans des emballages de transport sur le terminal ferroviaire, est indiqué comme inférieur à 5 nSv/h. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que, pour le terminal ferroviaire, elle retenait le débit de dose issu de la réglementation transport, ainsi qu'un convoi de 60 m de long et une distance entre le terminal et la clôture de l'ordre de 300 m. L'IRSN note toutefois que l'Andra n'a pas détaillé la méthode d'évaluation du débit de dose lié à la présence de colis dans le bâtiment de surface. **Ainsi, conformément à l'article R. 593-17 du code de l'environnement, il appartiendra à l'Andra de préciser la méthode d'évaluation de l'exposition externe des personnes représentatives de la population, liée à la présence de colis dans le bâtiment de surface, pour confirmer qu'elle est négligeable.**

4.5.1.3. Impact sanitaire des rejets de substances chimiques toxiques

L'Andra ne présente pas, au stade du DDAC, d'étude d'impact des substances toxiques chimiques sur la santé. En revanche, l'Andra indique que, compte tenu des traitements envisagés, les caractéristiques des rejets liquides respecteront les valeurs limites fixées par l'arrêté de 2018 de la classe « bon état » ¹⁵¹ pour les paramètres physico-chimiques généraux des eaux de surface [123] ainsi que les autres normes de rejets applicables ([124][125][126][127], objectifs de qualité mentionnés à l'article D. 211-10 du code de l'environnement). L'Andra en conclut que l'impact sur la qualité des eaux est faible. L'IRSN estime que le respect de certaines limites réglementaires ne peut justifier l'absence d'évaluation quantitative des risques sanitaires au sein de l'étude d'impact. Aussi, au cours de l'instruction, l'Andra a fourni une évaluation quantitative de l'impact chimique associé aux rejets liquides de Cigéo. S'agissant des résultats de son évaluation, l'Andra conclut, sur la base de

¹⁵¹ Concentrations en polluant ne dépassant pas les normes de qualité environnementale définies dans l'arrêté du 27 juillet 2018 [123].

l'estimation de quotients de danger (**QD**¹⁵²) inférieurs à 0,1 et d'excès de risque individuels (**ERI**¹⁵³) inférieurs à 10^{-6} , que les risques correspondants sont non préoccupants. L'examen par l'IRSN des concentrations ajoutées à l'environnement, utilisées pour cette étude, est présenté au chapitre 4.5.1.4. Malgré l'absence de risque important causé par l'exposition aux rejets chimiques de Cigéo, dont l'IRSN convient, l'IRSN constate que le code de calcul utilisé par l'Andra ne permet pas de calculer les niveaux d'exposition aux molécules organiques (en particulier, au benzo(a)pyrène) et que les indicateurs qui y sont renseignés (dose journalière d'exposition (**DJE**), QD et ERI) sont indépendants de la classe d'âge. Or, les molécules organiques (telles que les hydrocarbures dont le benzo(a)pyrène) représentent une part importante des rejets de substances chimiques toxiques prévus pour Cigéo (en provenance par exemple des chaudières ou gaz d'échappement des engins de chantier) et le benzo(a)pyrène est bien identifié par l'Andra comme substance dangereuse pour l'homme. **Aussi, il appartiendra à l'Andra, en lien avec l'évaluation quantitative de l'impact sanitaire des rejets liquides en substances chimiques toxiques de Cigéo** (cf. **Recommandation N°2** ci-dessous), **d'évaluer les niveaux d'exposition de la population aux molécules organiques toxiques, notamment le benzo(a)pyrène**. Par ailleurs, l'Andra pourrait différencier les DJE et QD suivant la classe d'âge des personnes représentatives. Pour l'évaluation de l'ERI sur la vie entière, l'Andra pourrait en outre prendre en compte l'évolution de la DJE et de la valeur toxicologique de référence (**VTR**) avec l'âge pendant les 30 ans d'exposition des personnes représentatives.

S'agissant de l'impact des rejets atmosphériques, l'Andra retient les substances identifiées dans les rejets (cf. *supra*), à l'exception des dioxines et des furanes, en raison de leurs très faibles quantités prévisionnelles dans les émissions, et des hydrocarbures aromatiques polycycliques, du fait du contexte local (peu de chauffage industriel et de transport routier). **Les hypothèses considérées par l'Andra quant aux substances chimiques toxiques retenues pour l'étude d'impact n'appellent pas de commentaire**. L'Andra applique un modèle de dispersion en prenant en compte les conditions météorologiques locales (moyenne sur la période 2015-2019 pour la station d'Houdelaincourt) pour calculer les concentrations atmosphériques moyennes annuelles dans les villages et établissements recevant du public (**ERP**) les plus proches. Celles-ci sont cumulées avec la pollution moyenne mesurée sur la période 2015-2019 et comparées aux valeurs réglementaires de qualité de l'air. Sur la base de ces évaluations, la valeur limite applicable aux poussières apparaît légèrement dépassée dans des zones non habitées et les objectifs de qualité sont atteints ou dépassés dans des zones non habitées pour le benzène et dans des zones d'habitation pour les poussières PM_{2,5}¹⁵⁴ (la pollution préexistante est déjà égale à l'objectif de qualité). L'Andra prévoit d'appliquer des mesures de réduction de l'envol des poussières, notamment par aspersion de la terre lors des travaux et en évitant le soulèvement de terre les jours de grand vent. Les personnes représentatives considérées dans l'évaluation quantitative des risques sanitaires de l'Andra sont les habitants des villages limitrophes (Saudron et Bure), les travailleurs et le public des ERP les plus proches, supposés exposés par inhalation en permanence pendant 70 ans, sans facteur de protection des bâtiments (habitations et lieux de travail de la population). Parmi les substances retenues, seul le benzène et certains composants chimiques des poussières de vers sont associés à des valeurs toxicologiques de référence, pour les effets à seuil et sans seuil¹⁵⁵. Les QD calculés par l'Andra sont inférieurs à 1 (0,5 au maximum pour le dioxyde de titane) et les ERI sont inférieurs à 10^{-5} (de l'ordre de 6.10^{-6} au maximum pour le benzène). L'Andra conclut que les incidences des émissions chimiques atmosphériques de Cigéo sur la santé humaine sont très faibles pendant la phase de fonctionnement, **ce dont l'IRSN convient. Toutefois, vis-à-vis du dépassement des objectifs de qualité de l'air pour les particules, il appartiendra à l'Andra de mettre en place les mesures de réduction de l'émission de poussière qu'elle prévoit**. Par ailleurs, l'IRSN note que l'Anses a publié en 2023 des VTR relatives aux particules de l'air ambiant extérieur (PM_{2,5}) [128]. Etant donné que les évaluations menées à ce stade par l'Andra montrent que les objectifs de qualité sont atteints ou dépassés dans des zones d'habitation pour ces particules PM_{2,5},

¹⁵² QD : Rapport entre la concentration d'exposition et la concentration de référence, utilisé pour caractériser le risque d'effets systémiques à seuil, liés aux substances toxiques (également appelé « indice de risque »).

¹⁵³ ERI : Probabilité que la cible a de développer l'effet associé à une substance cancérigène pendant sa vie du fait de l'exposition considérée.

¹⁵⁴ Particules de l'air ambiant extérieur de diamètre inférieur à 2,5 µm.

¹⁵⁵ Les effets à seuil correspondent à des effets sur la santé n'apparaissant dans la population qu'au-delà d'un certain seuil d'exposition ; les effets sans seuil correspondent à des effets sur la santé dont la probabilité d'occurrence est considérée proportionnelle à l'exposition, sans démonstration de l'existence d'un seuil en-dessous duquel cette probabilité serait nulle.

l'IRSN considère qu'il appartiendra à l'Andra, pour la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique, d'intégrer les VTR relatives aux PM2,5 dans son étude quantitative des risques sanitaires.

4.5.1.4. Impact des rejets radioactifs et de substances chimiques toxiques sur l'environnement

L'exposition des organismes non-humains terrestres aux substances radiologiques dispersées dans l'atmosphère par les rejets est évaluée par l'Andra, en situation normale, sur la base de l'approche ERICA¹⁵⁶. Cette exposition est estimée inférieure à 0,001 µGy/h pour chacune des 14 espèces représentatives retenues, ce qui est inférieur à la valeur repère de 10 µGy/h. L'Andra conclut que l'impact des rejets atmosphériques radioactifs est très faible, **ce dont l'IRSN convient.**

A l'instar de l'évaluation de l'impact sanitaire, l'Andra a fourni au cours de l'instruction une évaluation quantitative de l'impact chimique sur la faune et la flore sauvage associé aux rejets de substances chimiques liquides de Cigéo. L'IRSN constate que, pour réaliser cette évaluation, l'Andra ne calcule pas de concentrations ajoutées dans l'environnement par les rejets envisagés mais utilise les valeurs de Normes de Qualité Environnementale (**NQE**) en faisant l'hypothèse que les rejets respecteront ces valeurs. L'IRSN rappelle que ces limites normées ne constituent pas autorisation de rejets et que, dans le cadre d'une DAC, le futur exploitant se doit de définir ses rejets, les réduire autant que faire se peut et vérifier qu'ils n'ont pas d'impact sur l'homme ou l'environnement. L'IRSN estime ainsi que l'évaluation fournie par l'Andra ne constitue pas un calcul d'impact des rejets. En outre, s'agissant des résultats de l'évaluation fournie, l'IRSN relève que, même si la plupart des QD calculés par l'Andra sont autour de 1, certains atteignent des valeurs élevées (8 pour le nickel, 100 pour l'uranium¹⁵⁷). **Aussi, l'IRSN estime que l'Andra doit fournir une évaluation quantitative de l'impact à la faune et la flore des rejets de substances chimiques toxiques dans les meilleurs délais. Ainsi,**

Recommandation N°2

L'IRSN recommande que, pour la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique, l'Andra fournisse une évaluation quantitative de l'impact sanitaire et à la faune et la flore des rejets liquides en substances chimiques toxiques de Cigéo, sur la base d'une estimation des concentrations rejetées dans l'environnement, afin d'apprécier l'impact de ces rejets.

S'agissant des rejets atmosphériques, l'Andra modélise la dispersion et le dépôt de composés chimiques dans l'environnement afin d'estimer leurs concentrations dans le milieu terrestre. Elle les compare aux valeurs de protection de l'environnement, notamment les « Predicted Non effect Concentration » (**PNEC**)¹⁵⁸. L'évaluation de l'Andra montre que les concentrations estimées par modélisation sont inférieures aux valeurs de protection de l'environnement. L'impact des rejets atmosphériques chimiques est considéré comme très faible. **Ces éléments n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.**



4.5.2. Situations incidentelles et accidentelles

Dans le DDAC, l'Andra évalue les conséquences des situations incidentelles et accidentelles sous l'angle d'une part, des conséquences radiologiques sur les travailleurs et d'autre part, de l'impact sanitaire des rejets radioactifs et des substances toxiques chimiques.

4.5.2.1. Conséquences radiologiques en situations incidentelles et accidentelles pour les travailleurs

Les scénarios incidentels et accidentels du dimensionnement étudiés par l'Andra dans le DDAC (cf. chapitre 3.3 du présent rapport) conduisent à des doses évaluées au maximum à 50 µSv pour les travailleurs [47]. Pour les scénarios accidentels d'extension du dimensionnement, la dose maximale estimée, de l'ordre de 20 mSv, correspond à l'exposition d'un travailleur lors de la chute d'un emballage de transport dans la fosse du hall de

¹⁵⁶ « Environmental Risk for Ionising Contaminants : Assessment and Management », méthode d'analyse fondée sur l'évaluation de l'incidence des rayonnements ionisants sur la faune et la flore. www.ERICA-project.org

¹⁵⁷ Les concentrations estimées dépassent de 8 à 100 fois les valeurs maximales réputées sans effet.

¹⁵⁸ Si la concentration estimée d'un composé ou d'une substance chimique est inférieure à sa PNEC, il est alors considéré que ce composé ou cette substance chimique n'a pas d'effet sur l'environnement.

déchargement et du déconfinement de l'emballage et des colis primaires qu'il contient. Les résultats des contre-calculs réalisés par l'IRSN sont globalement similaires à ceux de l'Andra, qu'il s'agisse des scénarios de dimensionnement ou d'extension du dimensionnement ayant un impact sur les travailleurs (cf. tableau T6-5 de l'Annexe T6). A cet égard, l'IRSN rappelle (cf. chapitre 3.3 du présent rapport relatif aux scénarios retenus par l'Andra) ses réserves à l'égard de la classification des scénarios et notamment ceux d'extension du dimensionnement. Néanmoins, l'IRSN estime que les conséquences radiologiques des situations incidentelles et accidentelles pour les travailleurs sont faibles pour la plupart et constate qu'elles sont toutes inférieures aux objectifs de protection associés au domaine du fonctionnement de Cigéo. L'IRSN rappelle par ailleurs que, depuis la transmission du DDAC par l'Andra, les valeurs de coefficient de dose ont évolué conformément à l'arrêté du 16 novembre 2023, applicable depuis le 1^{er} janvier 2024 [65]. Il appartiendra à l'Andra d'évaluer l'impact de ces nouvelles DPUI en vigueur sur l'estimation des doses pour les travailleurs.

4.5.2.2. Impact sanitaire des situations incidentelles et accidentelles

S'agissant des hypothèses considérées par l'Andra pour l'évaluation des conséquences radiologiques et chimiques des situations incidentelles et accidentelles identifiées dans la démonstration de sûreté, l'Andra retient d'une part un groupe de personnes jugées représentatives, en autarcie alimentaire et présent en permanence dans les villages ou dans les ERP les plus proches de Cigéo, et d'autre part un adulte se promenant en limite du site et exposé au panache de substances radioactives et chimiques toxiques résultant de la situation incidentelle ou accidentelle pendant 2 h. Les conséquences radiologiques sont évaluées à court (24 h), moyen (1 an) et long (50 ans) termes pour les situations d'accident du dimensionnement. En revanche, pour les situations d'accident d'extension du dimensionnement, seules les conséquences radiologiques à court terme sont évaluées. A cet égard, l'IRSN souligne que l'arrêté INB [45] dispose que l'impact radiologique à moyen et long terme doit être évalué pour les « incidents et accidents envisagés ». Aussi, **l'IRSN estime nécessaire que l'Andra évalue l'impact radiologique à moyen et long terme des scénarios d'accident d'extension du dimensionnement.** Les conditions météorologiques retenues sont une stabilité atmosphérique neutre avec et sans pluie et avec des vitesses de vent de 5 m/s et 10 m/s et une atmosphère stable ou très stable avec une vitesse de vent de 3 m/s et sans pluie. Les voies d'exposition, les classes d'âge et les rations alimentaires considérées par l'Andra sont les mêmes que celles qu'elle considère en fonctionnement normal. Les débits respiratoires prennent en compte le niveau d'activité physique supposé. L'Andra évalue ainsi les conséquences du rejet accidentel en prenant en compte l'inventaire radiologique des colis de déchets concernés et 13 substances chimiques (uranium, plomb, mercure, antimoine, cadmium, sélénium, arsenic, nickel, chrome, bore, béryllium, cyanure et amiante). L'IRSN relève que des vitesses de vent faibles, inférieures à 3 m/s, sont régulièrement observées sur le site. A cet égard, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction avoir retenu les conditions météorologiques prescrites par la circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003 [129], ce qui l'a conduite à retenir une vitesse de vent de 3 m/s en atmosphère stable et très stable. L'IRSN rappelle d'une part que cette circulaire n'est pas spécifiquement applicable aux INB, d'autre part que des incertitudes significatives affectent les modèles de dispersion atmosphérique des polluants aux faibles vitesses de vent. Aussi, dans l'attente d'une méthode d'évaluation plus précise ou de compléments permettant de borner l'incertitude, **il appartiendra à l'Andra de justifier le caractère raisonnablement pénalisant des hypothèses retenues à cet égard pour évaluer les conséquences des situations accidentelles.** L'IRSN estime que l'Andra pourrait, par exemple, évaluer la variabilité induite par les différentes modélisations de la dispersion en atmosphère stable à des vitesses de vent inférieures à 3 m/s de façon tenir compte de ces sources d'incertitude dans l'interprétation des résultats. Les autres hypothèses retenues par l'Andra **n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

Pour ce qui est de l'impact radiologique évalué par l'Andra, l'IRSN note que, pour les situations incidentelles et accidentelles de dimensionnement, les conséquences radiologiques estimées par l'Andra, de l'ordre de 50 µSv au plus, sont très inférieures aux objectifs de protection. Pour les situations d'accident d'extension du dimensionnement, celle qui conduit aux expositions les plus élevées pour la population est, à l'instar de celle

conduisant aux conséquences les plus enveloppes pour les travailleurs, la chute d'un emballage de transport dans le hall de déchargement d'ETH. La dose évaluée la plus élevée après 24 h d'exposition est reçue par le promeneur adulte à la clôture du site et est inférieure à 9 mSv [47]. Un scénario de chute similaire dans le hall de déchargement d'EP1 conduit à des conséquences, pour un promeneur dans les mêmes conditions, estimées par l'Andra à 1 mSv. L'IRSN constate que l'évaluation des conséquences des scénarios par l'Andra conduit au respect des objectifs de protection définis à ce stade. Toutefois, le scénario précité de chute d'emballage de transport dans le hall de déchargement d'ETH conduit à des conséquences à court terme proches des objectifs de protection que l'Andra retient. L'IRSN observe que l'évaluation des conséquences radiologiques des scénarios comporte des incertitudes et ne repose pas sur des hypothèses systématiquement pénalisantes. En effet, l'IRSN relève que l'état de l'art pour mener l'étude de situations accidentelles de transport ne retient pas habituellement de facteur de rétention de l'emballage de transport¹⁵⁹. En outre, l'IRSN rappelle que des incertitudes significatives affectent les modèles de dispersion atmosphérique des polluants aux faibles vitesses de vent (cf. ci-dessus). Ainsi, nonobstant le classement de ces scénarios dans le domaine de dimensionnement ou d'extension du dimensionnement, l'IRSN estime que la prise en compte d'hypothèses plus enveloppes pourrait conduire les estimations d'impact sanitaire à dépasser les objectifs de protection. L'Andra n'identifie pas de disposition de conception compensatoire nécessaire au stade du DDAC. **Bien que l'IRSN convienne que les conséquences de tels scénarios ne sont pas rédhitoires, il estime que l'Andra pourrait mener les phases ultérieures de conception de l'installation (études PRO/EXE) de manière à optimiser la conception au regard des conséquences de ce scénario.**

Pour ce qui est de l'impact des substances toxiques chimiques, l'intensité des effets des phénomènes dangereux non radiologiques est définie par rapport à des valeurs de référence exprimées sous forme de seuils d'effets toxiques irréversibles chez l'homme. Pour cela, l'Andra retient en priorité les valeurs seuils de toxicité aigüe française (**VSTAF**) de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (**INERIS**), notamment pour l'arsenic, le bore, le béryllium, le mercure et l'uranium. Lorsque ces valeurs n'existent pas, par exemple pour le cadmium ou le sélénium, elle utilise les Acute exposure guideline levels (**AEGL**) de l'agence de protection de l'environnement des Etats-Unis, qui sont des valeurs de référence définies pour 5 durées d'exposition (10 min, 30 min, 1 h, 4 h, 8 h) et pour 3 niveaux de gravité des effets. Ces valeurs de référence prennent en compte toutes les données disponibles : réactions physico-chimiques des composés, études de toxicologie *in vitro* et chez l'animal, données en conditions contrôlées chez l'homme, observations en situations accidentelles et données épidémiologiques. La procédure de dérivation des AEGL est bien décrite et s'applique à l'ensemble des substances chimiques toxiques retenues par l'Andra dans son évaluation. De plus, la méthodologie utilisée est similaire à celle utilisée dans de très nombreux pays pour dériver des limites d'expositions aux polluants chimiques. En plus d'être basés sur une méthodologie robuste, l'IRSN souligne que les AEGL permettent d'inclure les personnes sensibles, autre que les adultes d'âge moyen en bonne santé, ce qui n'est pas le cas des VSTAF. De fait, l'IRSN suggère que l'Andra considère, au titre d'une analyse de sensibilité de l'évaluation des conséquences non radiologiques des situations accidentelles, l'ensemble des références toxicologiques existantes, dont les AEGL plus protectrices.

De manière générale, les concentrations maximales en substances toxiques chimiques auxquelles seraient exposées les personnes représentatives sont inférieures aux seuils des effets irréversibles sélectionnés par l'Andra d'au moins trois ordres de grandeur. L'IRSN note que de telles concentrations restent a priori inférieures aux seuils de toxicité aigüe précités. Enfin, l'Andra a évalué la contamination des sols à distance croissante de l'installation et s'est assuré que les aliments susceptibles d'être contaminés restaient conformes aux limites de commercialisation Euratom. Cela est satisfaisant.

¹⁵⁹ Dans son évaluation des conséquences radiologiques d'une chute d'un emballage de transport dans un hall de déchargement, l'Andra retient un facteur de rétention de l'emballage de transport de 10⁻¹.

5. SPECIFICATIONS D'ACCEPTATION ET CONTROLES DES COLIS

Les spécifications d'acceptation des colis, générales ou particulières, définissent les critères qu'un colis de déchets doit respecter pour être accepté à Cigéo, de sa réception à sa mise en stockage. Elles portent sur les caractéristiques radiologiques, physiques, thermiques, chimiques et mécaniques des colis primaires. Dans le cadre du GP1 [2], l'IRSN a rappelé que la démarche retenue par l'Andra pour l'élaboration des spécifications d'acceptation, inchangée depuis le DOS de Cigéo, était acceptable et a estimé que leur structuration ainsi que les thématiques faisant l'objet de critères spécifiés étaient pertinentes. Le présent chapitre examine les critères retenus par l'Andra dans les spécifications d'acceptation au regard de l'évaluation de sûreté en phase d'exploitation (cf. chapitre 5.1), puis les contrôles prévus (cf. chapitre 5.2). L'IRSN rappelle en outre, conformément à la décision n°2017-DC-0587 de l'ASN dite « décision conditionnement » [130], que la démonstration du respect des spécifications d'acceptation (sur la base d'essais, de modélisation, etc.) doit être apportée par les producteurs et que l'applicabilité de cette démonstration est évaluée et validée par l'Andra à l'issue de son instruction de la demande d'approbation¹⁶⁰.

Dans le DDAC, l'Andra présente une version consolidée des spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires de l'inventaire de référence [131] et la justification associée [71].



5.1. Spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires

5.1.1. Spécifications générales d'acceptation

Les spécifications générales d'acceptation s'appliquent à tous les colis primaires, quels que soient leur quartier de stockage et leur mode de stockage. Elles portent sur l'inventaire radiologique et chimique, le comportement à long terme, la contamination surfacique, le taux de vide et l'interface de préhension. Les spécifications relatives à l'inventaire radiologique et chimique (radionucléides dont l'activité est à déclarer, substances interdites, etc.), à la contamination surfacique et au taux de vide sont similaires aux spécifications d'acceptation d'autres installations de stockage. Les informations relatives au comportement à long terme sont reprises par ailleurs par l'Andra pour établir les modèles de relâchement des radionucléides [2]. Pour la spécification relative à l'interface de préhension, liée notamment à la possibilité de manutentionner le colis primaire lors des opérations de mise en stockage, et éventuellement dans le cadre de la récupérabilité, l'Andra précise que les producteurs de déchets doivent garantir que le colis primaire, à réception, est manutentionnable *via* la même interface de préhension que celle utilisée pour l'expédition. **Aussi, l'IRSN estime que les spécifications générales d'acceptation retenues par l'Andra, complétées depuis la version présentée en 2017 (objet de l'avis IRSN n°2019-00178 [132]), sont acceptables.**

5.1.2. Spécifications particulières d'acceptation

Les spécifications particulières d'acceptation s'appliquent aux colis primaires en fonction de leur quartier de stockage et de leur mode de stockage. L'IRSN relève que les spécifications, complétées depuis la version présentée en 2017, relatives à la masse et à la géométrie des colis primaires HA et MA-VL ainsi qu'à leur puissance thermique, leur masse de matière fissile et leur débit d'équivalent de dose, au dégagement de gaz inflammables et de radionucléides gazeux des colis primaires MA-VL, au gerbage des colis primaires MA-VL en stockage direct et au dégagement de gaz des colis primaires HA¹⁶¹, sont cohérentes avec la démonstration de sûreté, **ce qui est satisfaisant**. Par exemple, les masses maximales des colis primaires sont pilotées par les limites en charge des moyens de manutention, la géométrie est liée au dimensionnement des moyens de transfert et à la maîtrise de la criticité, le débit d'équivalent de dose des colis primaires MA-VL est lié à la protection des travailleurs contre

¹⁶⁰ Au sens de la décision conditionnement, l'approbation est l'acte par lequel l'exploitant d'une INB de stockage disposant de spécifications d'acceptation des colis de déchets radioactifs matérialise un accord générique sur les dispositions relatives au conditionnement de déchets radioactifs sous la forme d'un colis de déchets radioactifs définitif selon une procédure donnée [130].

¹⁶¹ Les colis primaires HA peuvent générer, par décroissance de radionucléides émetteurs α , quelques litres d'hélium au cours de la durée de fonctionnement de Cigéo. Le producteur doit déclarer la quantité produite sur 150 ans, afin que l'Andra s'assure que les caractéristiques du conteneur de stockage HA ne correspondent alors pas à la définition d'un équipement sous pression nucléaire au sens de l'article R. 557-12-1 du code de l'environnement.

l'exposition aux rayonnements ionisants et celui des colis HA est lié à la maîtrise de la corrosion sous rayonnement, le dégagement de gaz inflammables est intégré à la maîtrise du risque de radiolyse et la puissance thermique est liée au respect de critères de température dans les ouvrages en béton ou au niveau des argilites.

Les autres spécifications particulières appellent les remarques suivantes.

A réception, les colis primaires doivent être pourvus d'un numéro d'identification lisible pendant une durée de 100 ans, ou à défaut, pendant une période au moins égale à la durée de fonctionnement du quartier de stockage concerné, en lien notamment avec l'exigence de réversibilité. **L'IRSN estime que l'Andra pourrait, avant accord de l'ASN sur les spécifications d'acceptation, ajuster la durée de lisibilité de l'identification à un éventuel allongement de la phase de fonctionnement de Cigéo.**

Les producteurs de colis primaires doivent justifier l'absence de dispersion du contenu radioactif des colis pour des hauteurs de chute variables selon leurs hauteurs de manutention (cf. chapitre 4.3.3), en intégrant les effets du vieillissement des colis au cours de leur entreposage. L'Andra a identifié trois familles¹⁶² faisant l'objet d'une spécification particulière, qui n'est pas basée sur une qualification à la chute, mais qui impose le respect d'un potentiel de contamination atmosphérique par remise en suspension. L'IRSN souligne la nécessité de s'assurer que la démonstration fournie par le producteur intègre les effets du vieillissement au cours de l'entreposage des colis primaires, pouvant atteindre pour certaines familles plusieurs dizaines d'années. A ce titre, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que la manière dont les critères de tenue à la chute ou de respect d'un potentiel de contamination atmosphérique seraient vérifiés est à définir dans le cadre de l'approbation des colis. **L'IRSN estime qu'il appartiendra à l'Andra, avant accord de l'ASN sur les spécifications d'acceptation, de préciser la manière dont ces critères pourront être vérifiés** (modélisations, études relatives à l'effet du vieillissement sur les propriétés des matériaux constitutifs des colis, recours à des colis témoins, etc.), **en tenant compte des conditions d'entreposage des colis, en particulier pour les colis primaires en stockage direct pour lesquels aucun conteneur de stockage n'assure la tenue à la chute durant la phase de fonctionnement du stockage.**

S'agissant du comportement en cas de sollicitation thermique due à un incendie, les producteurs de déchets doivent justifier, pour les colis MA-VL en stockage direct, le maintien du colis primaire en un seul bloc (afin de garantir que la remise en suspension de substances radioactives se limite aux gaz et aux radionucléides les plus volatils) ainsi que de la fonction de manutention après sollicitation thermique d'au moins 550°C pendant 30 minutes. L'IRSN relève que la démarche retenue par l'Andra pour les colis primaires en stockage direct diffère de celle appliquée pour les colis primaires en conteneur de stockage, pour lesquels la démonstration repose sur la tenue au feu des conteneurs de stockage (cf. chapitre 4.3.1.4). En effet, la sollicitation thermique retenue est inférieure à celle appliquée aux conteneurs de stockage pour les essais de tenue au feu (courbe ISO 834 correspondant à une montée jusqu'à 927°C en 1 h). Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que la sollicitation de 550°C pendant 30 minutes avait été établie sur la base d'une courbe de feu réel (intégrant notamment des données de dimensionnement du pont stockeur, qui n'étaient pas disponibles au moment de la réalisation des essais de tenue au feu des conteneurs de stockage). **A cet égard, il appartiendra à l'Andra, avant accord de l'ASN sur les spécifications d'acceptation, de démontrer le caractère enveloppe de la sollicitation thermique retenue, sur la base des équipements effectivement mis en œuvre dans les alvéoles de stockage.** En outre, l'IRSN relève l'absence, dans les spécifications d'acceptation, de critères quantitatifs relatifs au maintien du confinement pour les colis primaires en stockage direct soumis à une sollicitation thermique. Aussi, l'IRSN s'interroge sur la manière dont l'Andra s'assurera du respect de cette spécification d'un point de vue opérationnel. A cet égard, l'IRSN rappelle les faibles marges mises en exergue dans les études de sensibilité en cas de feu en cellule de manutention d'alvéole MA-VL pour les colis en stockage direct par rapport à un critère de vulnérabilité retenu de 200°C (cf. chapitre 4.3.1.4). L'IRSN note que ce critère correspond à l'exigence définie associée aux conteneurs de stockage, classés EIP, pour protéger les colis primaires sans matrice, l'exigence définie pour protéger les colis primaires avec matrice étant de 400°C [49]. **Aussi, il appartiendra à l'Andra, avant accord de l'ASN sur les spécifications d'acceptation, de retenir un critère opérationnel par typologie de colis (avec ou sans matrice notamment) pour la spécification relative au comportement des colis en stockage direct en cas de sollicitation**

¹⁶² Il s'agit de trois familles de colis primaires du CEA, qui sont à ce jour les seules familles produites ne disposant pas de qualification à la chute.

thermique. Par ailleurs, l'IRSN note que les colis primaires de type CSD-C, pourtant envisagés par l'Andra en stockage direct en paniers, ne sont pas compris dans cette spécification. L'IRSN convient du maintien en un bloc de ces déchets en cas de sollicitation thermique, compte tenu de leur nature (déchets métalliques compactés). Pour ce qui concerne leur caractère manutentionnable, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que des calculs avaient été réalisés sur des paniers de stockage, montrant que, pour une sollicitation de 450°C, la tenue des paniers et la capacité de les manutentionner étaient conservées. L'IRSN relève que la température retenue pour ces calculs est inférieure à celle retenue pour les autres colis en stockage direct (550°C). **A cet égard, il appartiendra à l'Andra de démontrer le caractère enveloppe de la température de sollicitation des paniers de stockage sur la base des équipements effectivement mis en œuvre dans l'alvéole et leur tenue à cette sollicitation.**

Enfin, s'agissant de la spécification relative au confinement des colis primaires assurant, éventuellement avec le conteneur de stockage, le premier système de confinement statique (cf. chapitre 4.2.2.1), le producteur doit démontrer la durabilité du ou des composant(s) portant la fonction de confinement sur une période de 100 ans (ou à défaut une période au moins égale à la durée de fonctionnement du quartier dans lequel est stocké le colis). Le cas échéant, la démonstration doit intégrer les effets de l'entreposage du colis. Le producteur doit également identifier les substances présentes dans les colis (sels solubles, acides, etc.) susceptibles d'agresser le composant portant la fonction de confinement. Des éléments sur le suivi des colis en entreposage (plans de contrôle, conditions d'environnement en entreposage, etc.) et sur les éventuels écarts aux référentiels de production des colis sont également attendus par l'Andra. L'Andra présente trois options de démonstration du maintien du confinement statique, au choix du producteur :

- option dite « épaisseur suffisante », consistant au respect d'une épaisseur de barrière de confinement, établie par l'Andra et qui s'affranchit autant que possible des caractéristiques propres de chaque colis ;
- option dite « épaisseur adaptée », consistant également au respect d'une épaisseur de barrière de confinement, établie pour chaque colis. Les valeurs et justifications associées sont proposées par le producteur ;
- option dite « alternatives », correspondant à l'utilisation de critères autres qu'une épaisseur de barrière de confinement.

L'Andra précise que dans le cas où le producteur n'est pas en mesure d'apporter la justification du maintien du confinement sur une durée suffisante, les colis primaires concernés pourront être mis en conteneurs de stockage renforcés vis-à-vis du confinement (couvercle clavé).

Pour l'option « épaisseur suffisante », le producteur doit démontrer le respect d'une épaisseur de barrière, qui dépend du matériau constitutif de cette barrière et des modes de stockage (Tableau 4), par mesure ou en s'appuyant sur le procédé de fabrication si celui-ci permet de s'assurer de l'épaisseur. Dans le cas où des agresseurs internes sont identifiés, leurs dommages potentiels doivent être évalués par le producteur, et traduits en une épaisseur équivalente qui s'ajoute, au cas par cas, à l'épaisseur suffisante à considérer définie par l'Andra. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que les épaisseurs suffisantes qu'elle retient se basent sur la nature des matériaux utilisés et les pathologies auxquelles ils peuvent être soumis dans les conditions d'environnement de Cigéo, sur les connaissances acquises par l'Andra dans le cadre de ses travaux sur la durabilité des matériaux ainsi que sur les normes et recommandations pour le génie civil. Pour le cas particulier des colis en stockage direct, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que les différences pouvant survenir entre les phénomènes à prendre en compte, par rapport aux colis primaires mis en conteneur de stockage (dessiccation, apport d'oxygène, etc.), se traduiraient par des différences d'épaisseurs suffisantes. Pour les colis primaires en stockage direct, dont la barrière de confinement est constituée de béton ou de mortier, l'Andra précise que l'épaisseur à respecter, encore en cours de définition (cf. case « variable » dans le Tableau 4), dépend fortement de la formulation des matériaux cimentaires et des conditions d'entreposage. De manière générale, l'IRSN note que l'Andra n'a pas justifié, au cours de l'instruction, les épaisseurs suffisantes retenues, par exemple sur la base de modélisations ou d'essais dédiés intégrant les propriétés des matériaux (nuance d'acier, formulation des bétons) pouvant constituer la barrière de confinement des colis primaires en conditions d'environnement des alvéoles de stockage pendant la phase de fonctionnement. L'IRSN souligne que ceci est d'autant plus important pour les colis

primaires en stockage direct, étant donnée l'absence de conteneur de stockage pouvant faire office de tampon chimique et préservant les propriétés de confinement des colis primaires vis-à-vis de certaines pathologies (par exemple, corrosion des aciers ou carbonatation des bétons liée à la présence de dioxyde de carbone dans l'environnement des colis). Aussi, **l'IRSN considère que l'Andra devra, avant accord de l'ASN sur les spécifications d'acceptation, justifier, sur la base notamment des conditions d'environnement des alvéoles de stockage et des propriétés des matériaux constitutifs des colis primaires, les épaisseurs qu'elle retient pour l'option « épaisseur suffisante » de la spécification d'acceptation relative au maintien du confinement statique.** Ce point fait l'objet de l'**engagement 2024-E50** de la lettre CG-AMOA-LET-24-0033 rappelée en annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Tableau 4. Epaisseurs de la barrière de confinement définies par l'Andra en l'absence d'agresseurs internes [133].

Matériau	Conditions d'environnement	Epaisseur de barrière de confinement en tout point autour des déchets (mm)	
		Colis primaire en conteneur de stockage	Colis primaire en stockage direct
Béton/mortier	Avec protection (présence d'un composant entre la barrière de confinement et l'environnement, tel qu'un fût métallique ou un conteneur de stockage)	12	12
	Sans protection	Ne s'applique pas	Variable
	Sans protection mais avec présence d'armatures métalliques (béton armé)	40 (enrobage des armatures)	40 (enrobage des armatures)
Acier		2	3
Acier inoxydable		1	2

Pour l'option « épaisseur adaptée », le producteur précise l'épaisseur de matériau nécessaire pour démontrer le maintien du confinement et fournit les démonstrations pour justifier le choix et l'atteinte de cette épaisseur. Enfin, pour l'option « alternatives », les critères retenus par le producteur doivent permettre d'obtenir un niveau de performance du colis équivalent aux options relatives aux épaisseurs de barrière de confinement. Ces deux options (« épaisseur adaptée » et « alternatives ») sont également possibles pour les colis primaires en stockage direct ; les phénomènes supplémentaires pouvant être rencontrés dans ce cas doivent être intégrés à la démonstration du producteur. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que l'option « alternatives » pouvait être utilisée dans le cas où le confinement est porté par la matrice de confinement ou lorsque l'épaisseur en tout point de la barrière ne peut être garantie, à la production du colis primaire et sur la durée d'exploitation de Cigéo. L'Andra a précisé, à titre d'exemple, que pour les colis 870 L FI et 500 L MI, la barrière de confinement pressentie est le mortier d'enrobage des déchets, ne présentant pas nécessairement une épaisseur constante autour des déchets. A cet égard, l'IRSN rappelle avoir recommandé, dans son avis relatif à la demande d'accord de conditionnement des colis 870 L FI, que « *le CEA définit l'épaisseur minimale de mortier nécessaire pour assurer l'atteinte des performances attendues du colis (notamment en termes de confinement)* » [134]. L'IRSN avait également recommandé, dans son avis relatif à la demande d'accord de conditionnement des colis 500 L MI, que « *le CEA propose un paramètre garanti associé à l'épaisseur minimale de mortier en parois latérales du colis et définit les dispositions permettant de garantir le respect de ce paramètre* » [135]. Des éléments complémentaires transmis par le CEA à ce sujet sont en cours d'instruction. En tout état de cause, **l'IRSN considère qu'un colis primaire pour lequel le confinement reposerait sur une barrière (matrice ou enveloppe) dont le maintien de l'épaisseur ne pourrait être garanti, à date de production ou pendant la durée d'exploitation de Cigéo, devrait faire l'objet d'un stockage en conteneur renforcé vis-à-vis du confinement.**

Ainsi, l'IRSN relève qu'à ce stade, l'Andra n'a pas présenté de critère opérationnel permettant de s'assurer du maintien du confinement statique pour tous les types de colis primaires, la démonstration étant laissée à la main du producteur des colis primaires sur la base de plusieurs options possibles. Concernant l'option « épaisseur

adaptée », l'IRSN convient par exemple que le développement de nouvelles matrices de conditionnement, plus performantes ou plus durables, pourrait conduire à des barrières de confinement d'épaisseurs moindres que celles retenues aujourd'hui pour les barrières en béton ou en acier. En revanche, si cette option venait à être utilisée pour des colis déjà produits avec des matériaux (bétons ou aciers) plus performants que ceux retenus par l'Andra dans le cadre de l'option « épaisseur suffisante », l'IRSN considère que l'Andra dispose dès à présent des connaissances pour intégrer les épaisseurs associées à ces matériaux dans le tableau de l'option « épaisseur suffisante ». **Aussi, l'IRSN considère que le recours à l'option « épaisseur adaptée » doit être limité à la définition d'épaisseurs pour des matériaux n'apparaissant pas dans le cadre de l'option « épaisseur suffisante ».**

En tout état de cause, l'IRSN estime, eu égard à l'importance revêtue par la première barrière de confinement statique des colis primaires dans la maîtrise du risque de dissémination des substances radioactives (cf. chapitre 4.2.2.1), que l'Andra devra, avant accord de l'ASN sur les spécifications d'acceptation, retenir un critère opérationnel, par exemple une épaisseur minimale de matériaux, pour la spécification relative au confinement statique. Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E51](#) de la lettre CG-AMOA-LET-24-0033 rappelée en annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

En conclusion, l'IRSN considère que les thématiques faisant l'objet de spécifications d'acceptation sont bien identifiées par l'Andra et que le choix des critères, pour la plupart des spécifications, est pertinent et cohérent avec la démonstration de sûreté de Cigéo. Toutefois, l'IRSN estime que les spécifications d'acceptation devront être revues en vue de leur validation par l'ASN, notamment pour intégrer les éléments mentionnés ci-avant, relatifs à la tenue à la chute et à une sollicitation thermique ainsi qu'au confinement statique.



5.2. Contrôles des colis

Dans le DDAC, l'Andra présente des éléments relatifs à la maîtrise de la qualité des colis, qui consiste notamment à vérifier que les colis primaires sont produits dans les conditions décrites par les producteurs et qu'ils respectent les spécifications d'acceptation. Celle-ci est déclinée suivant plusieurs processus complémentaires [40] :

- la maîtrise de la connaissance des colis, sur la base d'un recueil d'informations (transmission des dossiers de connaissances des familles de colis primaires et éléments capitalisés par l'Andra dans différents cadres, comme les demandes d'accords de conditionnement) et de l'évaluation par l'Andra de ces informations (complétude, robustesse, etc.) ;
- l'acceptation¹⁶³ des colis, qui comprend l'approbation de la famille de colis, l'accord de prise en charge des colis et l'accord de livraison. Elle consiste pour l'Andra à vérifier en amont de l'expédition des colis à Cigéo, que ceux-ci sont conformes aux spécifications d'acceptation, sur la base notamment des éléments transmis dans ce cadre par les producteurs de déchets et des éléments dont l'Andra dispose par ailleurs (maîtrise de la connaissance des colis, cf. *supra*). Cette étape consiste également à définir le programme de contrôle réalisé par l'Andra pour la famille de colis (chez le producteur ou à réception à Cigéo), à établir un processus de gestion des colis non conformes et à tracer les informations ;
- le programme de surveillance élaborée pour chaque famille de colis (audits, inspections, contrôles à réception à Cigéo, etc.), afin de vérifier que les producteurs de déchets mettent en œuvre les dispositions de maîtrise de la qualité des colis décrites dans leurs référentiels et que les colis sont conformes aux spécifications d'acceptation ;
- la gestion des écarts aux conditions d'une approbation.

Dans ce cadre, l'Andra prévoit notamment des contrôles systématiques réalisés à réception à Cigéo pour chaque colis primaire (cf. chapitre 5.2.1) et, en complément, des contrôles dits « hors flux » réalisés sur certains colis primaires uniquement (cf. chapitre 5.2.2).

¹⁶³ Au sens de la décision conditionnement, l'acceptation est l'acte par lequel l'exploitant d'une INB de stockage matérialise son accord pour le stockage dans son installation d'un colis de déchets radioactifs donné [130].

5.2.1. Contrôles systématiques à réception à Cigéo

A l'arrivée à Cigéo, des contrôles sont réalisés systématiquement sur chaque emballage de transport et chaque colis primaire au sein du bâtiment de surface EP1 [35][40] :

- C1 – contrôle administratif (notamment, vérification de la déclaration faite par le producteur avant envoi) ;
- C2 et C3 – contrôles externes de l'emballage de transport (par exemple, mesures de contamination surfacique labile et de débit de dose, contrôle visuel) ;
- C4 – contrôle de la cavité interne des emballages de transport (mesure de l'activité globale, pression, etc.) ;
- C5 – contrôle du colis primaire livré. La cellule dédiée au contrôle C5 permet de réaliser des contrôles dimensionnels et de masse, ainsi que de l'identification du colis. Elle comprend également une sonde pour les mesures de débit de dose, un dispositif rotatif pour réaliser des frottis et une enceinte blindée pour réaliser les comptages α et β sur les frottis.

Une fois les colis de stockage constitués, l'Andra réalise les contrôles suivants [35][40] :

- C6 (MA-VL) – contrôle de la bonne mise en place du couvercle des conteneurs de stockage MA-VL ;
- C6 (HA) – contrôle de la soudure des conteneurs de stockage HA ;
- C7 – contrôle des colis de stockage (incluant les colis primaires seuls en cas de stockage direct) avant mise en hotte, consistant à vérifier des critères similaires au contrôle C5 (masse, débit de dose, contamination surfacique, etc.).

L'IRSN relève que les contrôles C1 à C7 sont identiques à ceux envisagés au stade du DOS. En complément, l'IRSN note que des critères quantitatifs, associés à une partie des spécifications d'acceptation, ont été précisés pour le contrôle C5, ce qui est satisfaisant sur le principe. En revanche, l'IRSN constate que certaines spécifications d'acceptation de nature quantitative, telles que la quantité de matière fissile ou le dégagement de gaz inflammables, ne font pas l'objet de contrôles systématiques à réception. A cet égard, l'IRSN convient de la difficulté de contrôler systématiquement l'ensemble des critères relatifs aux spécifications d'acceptation et rappelle que l'adéquation entre les caractéristiques des colis et les spécifications d'acceptation ne repose pas uniquement sur la complétude des contrôles systématiques à réception à Cigéo, mais également sur les autres éléments de la maîtrise de la qualité des colis (cf. *supra*), telles que les données collectées par l'Andra dans d'autres cadres et les audits réalisés par l'Andra dans les installations de production ou d'entreposage de déchets. **L'IRSN estime ainsi acceptable que les contrôles systématiques ne couvrent pas l'intégralité des critères relatifs aux spécifications d'acceptation. Pour autant, l'IRSN estime que la fiabilité limitée des données pour certaines familles (par exemple, colis MA-VL produits sans dispositions d'assurance de la qualité) ou le vieillissement en entreposage (cf. [2]), ainsi que les enjeux de sûreté particuliers associés à certaines familles (dégagement d'hydrogène, puissance thermique élevée, etc.) ou encore les écarts ou non-conformités identifiés par l'Andra dans le cadre de ses missions de surveillance dans les installations de production et d'entreposage de colis, justifient une attention particulière et la nécessité de mettre en œuvre des contrôles hors flux dédiés.**

5.2.2. Contrôles hors flux

Les contrôles dits « hors flux », par opposition aux contrôles systématiques, sont des contrôles pouvant être réalisés sur les sites des producteurs ou à Cigéo [40]. A ce stade, les contrôles hors flux ne sont pas encore définis précisément. L'Andra indique que les fréquences et les modalités de réalisation de ces contrôles seront définies au moment de l'approbation de chaque famille de colis primaires, au regard notamment des spécifications d'acceptation et des caractéristiques des colis primaires [35]. Les contrôles hors flux envisagés à ce stade par l'Andra consistent par exemple à :

- identifier et quantifier l'activité des radionucléides mesurables dans certains colis primaires (spectrométrie γ) ;

- mesurer les gaz relâchés par certains colis primaires MA-VL ;
- réaliser une image des éléments constitutifs de certains colis primaires MA-VL (rayons X haute énergie) ;
- mesurer la puissance thermique dégagée par certains colis primaires ;
- déterminer la perte d'épaisseur d'acier par corrosion de l'enveloppe de certains colis primaires.

Dans le cas où les contrôles hors flux sont effectués à Cigéo, ils sont réalisés dans les installations de surface, par prélèvement de colis primaires dans le flux. L'Andra précise que le dimensionnement de l'installation permet de contrôler environ 5 % des colis primaires qui arrivent à Cigéo, et que le choix d'un prélèvement est *a priori* aléatoire¹⁶⁴. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que le taux de prélèvement de 5 % s'appuyait sur le retour d'expérience du CSA et était un compromis entre chronique de livraison et besoin de contrôle associé aux enjeux de sûreté identifiés. En outre, l'Andra a précisé que ce taux moyen n'était ni un objectif, ni une exigence, mais le résultat d'hypothèses et de données d'entrée pour les études de flux. Par exemple, l'Andra indique à titre indicatif [55], pour les différentes typologies de déchets prévus d'être stockés à Cigéo, des taux de prélèvement de 2 % à 10 %, ainsi que des proportions de colis prélevés faisant l'objet de chaque type de contrôle hors flux prévu (cf. liste ci-avant). L'Andra précise par ailleurs que le développement de procédés de contrôle et l'évaluation de leurs performances seront poursuivis après le dépôt du DDAC (mesure de puissance thermique, détection de la perte d'épaisseur d'acier par corrosion, etc.) [52]. Durant la phase pilote, l'Andra prévoit de poursuivre la qualification des procédés de contrôle retenus et de mener une veille active afin d'identifier d'éventuels nouveaux moyens de mesure.

L'IRSN relève que la sélection et le développement des contrôles hors flux se poursuit. En particulier, l'IRSN considère que le développement d'un procédé de contrôle de la perte d'épaisseur d'acier par corrosion serait de nature à conforter la démonstration relative au maintien du confinement des colis primaires MA-VL (cf. chapitre 5.1.2). L'IRSN convient également que les taux de prélèvement et contrôles hors flux retenus doivent être proportionnés aux enjeux de sûreté propres à chaque famille (par exemple, mesure du taux de dégazage pour les familles présentant un dégagement important de gaz de radiolyse) et au niveau de fiabilité des données déclarées par les producteurs (plus faible pour certaines familles, par exemple pour les colis anciens produits hors assurance qualité). De plus, l'IRSN estime que les modes de stockage retenus (stockage direct ou en conteneur de stockage) doivent être pris en compte dans la définition des contrôles hors flux. S'agissant de la définition précise des contrôles hors flux et des taux de prélèvement associés, l'IRSN relève que celle-ci est prévue par l'Andra au moment de l'approbation des familles de colis. Si cette temporalité est cohérente avec la décision conditionnement [130], l'IRSN estime toutefois que les contrôles hors flux retenus devront être stabilisés à l'échéance de la demande de mise en service de Cigéo *a minima* pour les familles de colis prévues d'être stockées pendant la phase pilote. Aussi, **il appartiendra à l'Andra, pour la demande de mise en service de Cigéo, de définir et justifier les contrôles hors flux (taux de prélèvement, grandeurs mesurées, critères à respecter, technique de mesure, etc.) pour chaque famille de colis prévue d'être stockée pendant la phase pilote.**

A cet égard, l'IRSN estime que la phase pilote constitue une phase de tests de mise en œuvre des modalités d'approbation et, à ce titre, du choix des types de contrôles hors flux et de leur fréquence pour chaque famille, ainsi que de leur réalisation dans l'installation EP1. Aussi, l'IRSN considère que le retour d'expérience acquis au cours de la phase industrielle pilote pourra être utilisé par l'Andra pour définir les contrôles hors flux relatifs aux familles de colis stockées après cette phase.

Par ailleurs, l'IRSN souligne qu'il paraît complexe, à ce stade, de s'assurer de la suffisance des types de contrôles hors flux prévus par l'Andra. Par exemple, le conditionnement de certains colis primaires reste à définir, et il n'est pas exclu que les conditionnements *in fine* retenus nécessitent d'autres types de contrôles hors flux, à réception à Cigéo, que ceux envisagés à ce stade par l'Andra. A cet égard, **il appartiendra à l'Andra de s'assurer, avant la construction des cellules dédiées aux contrôles hors flux, que la zone de contrôles hors flux de l'installation EP1 est modulable et que, le cas échéant, d'autres postes de contrôles pourraient être ajoutés.**

¹⁶⁴ L'Andra précise qu'il peut également être lié à une anomalie détectée lors d'un contrôle systématique pour permettre un contrôle plus poussé.

5.2.3. Gestion des écarts

L'Andra présente dans le DDAC [35][55] sa gestion des colis non conformes, consistant notamment à les entreposer dans une zone tampon, appelée « entreposage pour colis détectés non conformes » dans l'attente du traitement de la non-conformité, qui peut être de plusieurs types :

- colis primaires qui ne répondent pas aux caractéristiques attendues (mauvaise identification, écarts entre déclaration et mesure, colis contaminés, etc.) ;
- colis de stockage produits dans l'installation de surface qui ne sont pas conformes aux contrôles réalisés à la suite des opérations de fermeture des conteneurs de stockage MA-VL ou HA (contrôles C6 et C7).

En cas de non-conformité sur un colis primaire, celui-ci peut être accepté en dérogation pour des non-conformités mineures ou après certaines opérations réalisées à Cigéo (par exemple, décontamination) ; pour des non-conformités nécessitant une analyse et un échange avec les producteurs et/ou l'ASN, le colis est placé en zone tampon. En cas de non-conformité majeure, le colis peut être mis dans un conteneur de stockage (s'il était initialement prévu en stockage direct) éventuellement renforcé vis-à-vis du confinement ou, si la non-conformité ne peut être corrigée à Cigéo, l'Andra envisage de réexpédier le colis vers son installation d'origine. En cas de non-conformité d'un colis de stockage, celui-ci est réorienté vers les cellules de réouverture des colis de stockage. S'agissant du dimensionnement de la zone dédiée aux colis non conformes, consistant en un local fermé avec des caractéristiques de confinement améliorées (classe C2), deux palettes (soit l'équivalent de deux colis de stockage MA-VL ou huit colis de stockage HA0) peuvent être entreposées. L'IRSN relève que l'Andra a, depuis le DOS, précisé les dispositions à mettre en œuvre à la suite de la détection d'un colis non conforme. **Ces dispositions sont satisfaisantes sur le plan des principes au stade du DDAC. L'IRSN s'interroge toutefois sur la suffisance du nombre d'emplacements dans la zone tampon vis-à-vis du maintien des cadences de stockage prévues. A cet égard, il appartiendra à l'Andra de s'assurer de la suffisance du nombre d'emplacements dans la zone tampon pour la gestion des colis non conformes.**

6. DEVELOPPEMENT DE CIGEO



6.1. Organisation du programme Cigéo et anticipation de la maîtrise des risques

Le développement progressif de Cigéo sur une durée d'ordre séculaire va conduire l'Andra à des évolutions de son organisation pour s'adapter aux contraintes spécifiques liées aux différentes phases du programme (conception, construction initiale, fonctionnement, démantèlement et fermeture, surveillance). A cet égard, une évolution majeure de l'organisation de l'Andra a démarré en 2022, lors de la finalisation du DDAC, en vue d'optimiser la préparation des travaux préalables et la réalisation des études complémentaires de conception, marquant le passage du « projet » au « programme » Cigéo, qui comprend l'ensemble des projets complémentaires qui conduiront à sa construction puis à son exploitation. Le programme Cigéo est ainsi piloté par phases qui s'étendent sur plusieurs décennies, génèrent des enjeux de coactivité (phases de construction et d'exploitation simultanées) et reposent sur une organisation qui se doit d'être durablement apprenante (gestion des compétences et prise en compte du retour d'expérience par de nombreuses parties prenantes sur plusieurs générations).

Au cours de son expertise, l'IRSN a mené 32 entretiens (dont plusieurs entretiens collectifs) avec le personnel de l'Andra, impliquant 42 salariés à différents niveaux de responsabilités et au sein de toutes les directions, ainsi qu'avec des parties prenantes extérieures (Comité technique souterrain (CTS), EDF (comité technique Andra/Producteur)...). L'IRSN a également réalisé 7 séquences d'observation relatives au projet Cigéo sur les différents sites de l'Andra.

6.1.1. Principaux changements organisationnels du programme Cigéo

L'évolution organisationnelle récente de l'Andra liée au passage de la phase de conception (avant-projet sommaire, APS et avant-projet détaillé, APD) à une phase industrielle de préparation au démarrage de la construction et du fonctionnement de Cigéo a été précédée, en 2019, par la mise en place d'une étape de priorisation, appelée « *gare de triage* », ayant deux objectifs principaux : recenser l'ensemble des sujets techniques, structurés en 14 groupes thématiques, qui nécessitaient des reprises d'études, et prioriser les sujets les plus en lien avec le jalonnement prévu pour réaliser la première tranche du programme. Ainsi, la « *gare de triage* » préfigure le travail d'identification et de rationalisation d'exigences dites « de haut niveau » que l'Andra doit valider pour mener à bien la réalisation de Cigéo et le déploiement de la structure projet hiérarchisée en support au programme Cigéo.

Pour l'IRSN, cet exercice de « *gare de triage* » constitue une phase clé dans le déroulement du projet Cigéo et a permis à l'Andra de valoriser le retour d'expérience de la phase APD en vue d'identifier les sujets prioritaires pour la structuration du programme Cigéo, ainsi que la manière dont ils devaient être traités en interne.

L'évolution récente de l'organisation du programme Cigéo s'est traduite par quatre changements majeurs relatifs à l'internalisation de la maîtrise d'ouvrage, au déploiement de l'ingénierie système, à l'internalisation de la gestion de configuration¹⁶⁵, au renforcement de la planification et du pilotage de projet, et au déploiement de la politique liée à la protection des intérêts. L'expertise par l'IRSN de ces changements et de l'anticipation des futures évolutions d'organisation est présentée ci-après.

¹⁶⁵ La gestion de configuration est un processus de gestion de projet. Il se découpe en 5 macroactivités : organiser et planifier la gestion de configuration, identifier la configuration, gérer les évolutions, enregistrer la configuration, vérifier la configuration. La configuration se définit comme l'ensemble des caractéristiques (spécifications fonctionnelles, physiques...) qui définit un produit ou un livrable final.

Internalisation de la maîtrise d'ouvrage

Avant le dépôt du DDAC, les principaux objectifs du projet Cigéo portaient, d'une part, sur la production d'une conception en support à la constitution du DDAC et, d'autre part, sur l'élaboration de divers autres dossiers réglementaires, telle que la déclaration d'utilité publique du projet. L'Andra a donc fait appel à différentes maîtrises d'œuvre (**MOE**) système et sous-systèmes et s'est appuyée en partie sur une prestation d'assistance à la maîtrise d'ouvrage (**MOA**). Plusieurs sujets sont restés de la responsabilité directe de l'Andra, notamment la conception des conteneurs de stockage, ainsi que les études en lien avec la phase d'après fermeture, en particulier celles relevant de la sûreté. En matière de protection des intérêts, la direction de la sûreté, l'environnement et la stratégie de filières (**DISEF**) avait déjà en charge la rédaction du rapport préliminaire de sûreté et des spécifications en support au DDAC sur la période 2020-2022.

L'évolution récente suite au dépôt du DDAC s'est accompagnée de plusieurs changements organisationnels et de management de projet ainsi que d'une montée en puissance en tant que MOA. Pour ce faire, l'Andra a fait le choix d'adopter depuis 2022 une organisation matricielle structurée autour de deux nouvelles entités :

- la direction du programme Cigéo (**DIRPROG**), portant le management global du programme Cigéo, responsable de la synthèse et des arbitrages techniques et programmatiques sur tous les sujets structurants et stratégiques, avec une vision intégratrice sur les plans technique, scientifique, de planification et de gestion financière ;
- la direction opérationnelle (**DIROP**) en charge de la conduite du programme sur le périmètre de la première tranche de réalisation du centre de stockage (T1) (outils d'intégration système, gestion de la configuration et des exigences, marchés d'études et de réalisation/construction).

Par ailleurs, l'organisation du programme Cigéo a également évolué en une décomposition dite « Work Breakdown Structure » (**WBS**) (cf. Annexe T19) hiérarchisée en « lots » couvrant l'ensemble des activités nécessaires de MOA. Enfin, des instances de gouvernance se réunissant périodiquement et des comités de travail ont été déployés en vue de faciliter les interfaces entre les pilotes de lots et des référents thématiques (sûreté, santé/sécurité, exploitation..., cf. *infra*).

L'IRSN relève que l'internalisation de la MOA permet à l'Andra de développer sa capacité de synthèse et d'intégration, de garantir la cohérence et l'avancement du projet Cigéo, et de renforcer les outils de pilotage du projet (gestion de configuration, gestion du planning, cf. *infra*). En revanche, à travers les entretiens réalisés, l'IRSN souligne que la mise en œuvre opérationnelle des instances de gouvernance et des comités de travail a conduit à augmenter le nombre de réunions, à complexifier la prise de décisions, et à mobiliser fortement certains pilotes de lots, ce qui peut constituer une limite organisationnelle à l'atteinte des objectifs et à la profondeur d'analyse des sujets. Aussi, **l'IRSN considère qu'il appartiendra à l'Andra d'ajuster les interfaces entre les différentes instances de gouvernance et comités de travail de la MOA afin de mieux identifier, hiérarchiser et arbitrer les choix techniques à enjeux de Cigéo.**

Internalisation de l'ingénierie système et de la gestion de configuration

Un second axe de la transformation de l'Andra est d'internaliser l'ingénierie système et la gestion de configuration, désormais portée par le département « intégration système » au sein de la DIROP. L'enjeu de cette internalisation est de garantir la cohérence de la conception progressive de Cigéo au fil des modifications, en maîtrisant les différentes configurations d'un point de vue technique (exigences, données, évolutions), documentaire (architecture, référentiels, livrables), et spatial (maquette numérique 3D).

Sur ce point, l'IRSN estime que le gréement d'une ingénierie système intégrée au sein de l'Andra, soutenu par le recrutement d'experts en gestion de configuration constitue un nouveau champ de compétences pour l'Andra et contribue au renforcement de la MOA et de la maîtrise des risques de Cigéo. Toutefois, sur la base des entretiens réalisés au cours de l'expertise, l'IRSN considère que des difficultés demeurent pour certains salariés impliqués dans le programme en termes d'appropriation du management de projet, des processus, et de certains référentiels qui ont modifié les pratiques de travail, les interfaces, les réseaux de communication et d'acteurs. En particulier, la note d'organisation de la DISEF, intégrant notamment les interfaces avec les DIROP et DIRPROG

nouvellement créées, et le plan de management de projet¹⁶⁶ n'ont pas été formalisés. Or, l'absence de formalisation de ces documents peut induire une mauvaise circulation de l'information entre les acteurs et des prises de décision en conséquence inappropriées. **Par conséquent, l'IRSN estime que l'Andra devra compléter son référentiel de projet en lien avec le système de management intégré, en formalisant une note d'organisation de la DISEF et un plan de management de projet du programme Cigéo. Par ailleurs, le processus de gestion de la configuration et des modifications associées devra être finalisé.** Ce point fait l'objet de l'**engagement 2024-E53** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant. L'Andra a transmis la note d'organisation de la DISEF en amont de la réunion préparatoire, qui n'a pas été versée à la présente instruction.

Renforcement de la planification et du pilotage de programme

L'Andra a souligné au cours de l'instruction que l'enjeu de respect du planning avait pu être considéré, en amont du DDAC, comme secondaire au regard d'autres enjeux, tels que l'atteinte d'un niveau suffisant de maturité technique de Cigéo, conduisant à certaines faiblesses en matière de pilotage du projet par la MOA, d'appropriation des exigences par le personnel Andra et de capacité d'intégration des éléments produits. Sur ce point, l'ASN a identifié lors d'une inspection sur le management du projet Cigéo [136] des axes d'amélioration en matière de gestion des plannings, de gestion des risques et opportunités, et de contrôle du projet Cigéo. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction sa volonté de renforcer significativement la maîtrise des délais du programme Cigéo, ce qui se traduit actuellement par une évolution de la culture d'entreprise et de projet d'une part, et par la révision du processus de maîtrise des délais et de ses modalités de mise en œuvre d'autre part. De plus, afin d'optimiser la planification de Cigéo, l'Andra s'appuie sur un comité extérieur composé d'experts dont l'expérience couvre un ensemble de domaines techniques (ouvrages miniers, travaux souterrains et nucléaires), afin de capitaliser un retour d'expérience en lien avec la gestion de travaux et le déroulement de chantiers souterrains. L'IRSN estime qu'une telle initiative relève d'une bonne pratique. Enfin, l'IRSN souligne que, lorsque de fortes contraintes liées au respect des délais pèsent sur les projets industriels, leur niveau de sûreté peut s'en trouver dégradé. Ainsi, les accidents survenus au WIPP en 2014 ont mis en évidence une dégradation progressive des dispositions de sûreté alors que les exigences liées à la performance économique avaient augmenté. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de s'assurer qu'en contrepoint à cette logique de renforcement du planning, la maîtrise des risques reste un enjeu prioritaire.**

Déploiement des dispositions en lien avec la protection des intérêts

L'Andra prévoit de doter progressivement le programme Cigéo de ressources dédiées supplémentaires, *via* le rattachement de référents thématiques au directeur de la DIRPROG et la mise en place de filières d'audit interne dédiées. Ces référents ont pour missions principales d'être garants de la protection des intérêts et d'apporter un regard métier dans les domaines de la sûreté, de la santé-sécurité, de l'environnement, de l'exploitation, des inventaires colis/chroniques et de la qualité. Ils s'assurent en particulier de la mise en œuvre du référentiel des AIP et des EIP, en participant aux comités de pilotage du programme et en s'appuyant sur des ressources de la DIROP et de la DISEF. A ce titre, ces référents de la DIRPROG constituent des points de contact privilégiés pour faciliter l'intégration de la protection des intérêts dans les activités du programme. **L'IRSN estime que l'émergence des référents au sein de la DIRPROG, assurant la cohérence de leur thématique au sein des différents lots du programme et l'intégration des enjeux de sûreté, est de nature à renforcer la maîtrise des risques au sein de la MOA.**

Dans le cadre de son expertise des facteurs organisationnels et humains (FOH), l'IRSN s'est plus particulièrement focalisé sur l'analyse des rôles et missions de deux référents : le référent sûreté et le référent exploitation.

A l'issue de son analyse, l'IRSN relève que le périmètre d'action du référent sûreté est très large, comprenant en particulier la cohérence globale du référentiel de sûreté et les enjeux liés à la radioprotection. Ses missions sont en particulier de piloter la réalisation des études de sûreté transverses, d'assurer la maîtrise des EIP/AIP en lien

¹⁶⁶ Le plan de management de projet est la feuille de route d'un projet, définissant les grandes étapes, les activités, moyens et ressources (y compris intervenants extérieurs) en regard des objectifs fixés. C'est un document de référence pour la MOE, partagé avec les différentes parties prenantes.

avec la sûreté dans le programme Cigéo et la cohérence des doctrines de l'Andra, d'assurer le pilotage et la cohérence globale du référentiel sûreté. La présence du référent sûreté est par ailleurs requise dans les principaux comités de pilotage, de décision, et de gouvernance du projet Cigéo et il est plus spécifiquement en charge d'animer le comité de pilotage dédié à la sûreté nucléaire. L'Andra a fait part de la nécessité de répartir cette charge de travail importante sur un second ingénieur sûreté en renfort du référent sûreté. **Ceci n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

En support au référent sûreté, des correspondants sûreté issus de la DISEF et de la DIROP ont été identifiés pour chaque sous-lot du WBS. Toutefois, leur rôle n'apparaît pas clairement dans les notes d'organisation communiquées. **A ce titre, l'IRSN estime que l'Andra pourrait formaliser l'organisation de la protection des intérêts pour Cigéo avec, au-delà des référents, la mise en place de réseaux de correspondants au sein des différents lots de la WBS et en interface avec la DISEF.**

Enfin, les enjeux de radioprotection pour les travailleurs sont actuellement inclus dans le périmètre du référent sûreté. Or, pour l'IRSN, ils doivent être pris en compte dans les dispositions de conception et d'exploitation de Cigéo (par exemple, dans le pilotage des interfaces avec le génie civil et le procédé de stockage des colis afin d'optimiser les postes de travail selon le débit de dose attendu) de manière lisible à ce stade de l'organisation. En effet, l'IRSN souligne que l'organisation du programme a un rôle important pour soutenir la prise en compte de ces enjeux ; dans la mesure où les exigences liées à la radioprotection des travailleurs, parfois antagonistes avec d'autres aspects de la conception et de l'exploitation (par exemple, pour faciliter le passage des gaines de ventilation du bâtiment EP1, des ouvertures béantes dans les voiles défavorables à la radioprotection pourraient être proposées) devront faire l'objet d'une forte coordination multidisciplinaire. **Ainsi, l'IRSN considère que l'Andra devra évaluer, en vue de la mise à jour du dossier de DAC prévue avant l'enquête publique, l'intérêt de nommer un référent radioprotection des travailleurs dans la structure organisationnelle actuelle en vue de renforcer la prise en compte des enjeux de radioprotection dans le programme Cigéo.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E54](#) de la lettre CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est acceptable.

En ce qui concerne le référent exploitation, ses missions sont de couvrir de manière transverse l'ensemble des aspects relatifs à l'exploitation de Cigéo dans ses dimensions stratégique et programmatique, notamment dans le cadre de l'instruction du DDAC et de la préparation de la réalisation de la première tranche. Il doit en particulier animer le processus de définition de l'organisation opérationnelle de Cigéo sur un plan qualitatif (chaîne de commandement, domaines de responsabilité...) et sur un plan quantitatif (effectif requis...), incluant les activités d'exploitation du procédé nucléaire, de maintenance, et de surveillance. Il intègre également les éléments liés aux facteurs organisationnels et humains dans l'attente d'un recrutement d'un référent FOH. A cet égard, l'Andra a indiqué au cours de l'expertise envisager la constitution d'une cellule exploitation pilotée par le référent exploitation.

L'IRSN constate que le périmètre du référent exploitation est également très large et sa charge de travail afférente élevée. L'IRSN estime que le projet de constitution d'une cellule exploitation autour du référent exploitation est une solution à étudier plus précisément, afin de favoriser un collectif de travail pérenne, la confrontation de points de vue complémentaires et ainsi d'aborder plus efficacement l'ensemble des enjeux liés à l'exploitation de Cigéo et leur articulation avec la maîtrise des risques. **Afin de mieux appréhender la diversité des enjeux liés à l'exploitation et leur articulation avec la maîtrise des risques, l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, en vue de la mise à jour du dossier de DAC prévue avant l'enquête publique, la feuille de route d'une cellule d'exploitation ou d'une alternative organisationnelle le cas échéant, ainsi qu'un premier bilan des travaux réalisés.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E54](#) de la lettre CG-AMOA-LET-24-0033 rappelée en annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est acceptable et souligne l'intérêt qu'il y aurait pour l'Andra à établir un bilan des travaux réalisés.

Par ailleurs, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction avoir mis en place en 2023 deux dispositifs d'audit interne, à savoir une filière indépendante, composée de l'Inspection générale (IG) et de la Filière indépendante de protection des intérêts (FIPRI). L'IG, qui rend compte au directeur général de l'Andra, a pour mission d'apprécier

l'état de la protection des intérêts au sein de l'Andra. Les objectifs poursuivis par la FIPRI, rattachée au directeur de la DISEF, sont de s'assurer que les enjeux et les exigences relatifs à la protection des intérêts sont correctement identifiés et pris en compte au sein de l'Andra, à travers des vérifications programmées (dans le cadre d'un plan de surveillance annuel, notamment), ou des vérifications réactives (à la suite d'un évènement significatif, alerte ou auto-saisine). **L'IRSN estime que la mise en place d'une filière indépendante au sein de l'Andra constitue une disposition pertinente pour vérifier la prise en compte des enjeux de sûreté.** Parmi les thématiques à auditer, l'IRSN souligne que l'évaluation, par cette FIPRI, de la maîtrise de l'impact des évolutions organisationnelles significatives au sein de l'agence pourrait être intéressante. Toutefois, du fait de sa création récente, l'IRSN a bien noté que les résultats de la surveillance exercée par la Filière indépendante de l'Andra ne sont pas encore établis et que l'efficacité des pratiques d'audit reste à consolider. **A ce titre, l'IRSN considère que l'Andra pourrait établir un bilan des modalités d'exercice des surveillances et des résultats obtenus par thématique.**

6.1.2. Démarche d'identification des besoins et des compétences

L'identification des ressources et des compétences à mettre en œuvre au sein de l'Andra pour faire face aux besoins actuels et anticiper les besoins futurs du projet Cigéo est un enjeu important pour une maîtrise des risques durable. Afin d'accompagner la montée en puissance des effectifs¹⁶⁷ du programme Cigéo ainsi que la nécessaire évolution et transformation de ses compétences en interne, l'Andra a initié en 2023 le Comité d'évaluation des dynamiques et des ressources des emplois (CEDRE).

La démarche du CEDRE pour identifier à plus long terme les besoins en ressources, compétences et formation

Le CEDRE comprend un axe stratégique et deux axes opérationnels. Le CEDRE-S, pour « stratégique », travaille sur les orientations de la prospective moyen terme et long terme, et identifie les sujets à travailler et la manière de les gérer. Au niveau opérationnel, le CEDRE-R, pour « ressources », désigne le comité du plan dit « d'armement des ressources », et le CEDRE-F, pour « formation », désigne le comité du plan annuel de développement des compétences dont la mission principale est de déterminer les grandes orientations de formation en lien avec le plan d'armement du CEDRE-R à 5/7 ans.

A travers l'organisation du CEDRE et ses missions, l'Andra a ainsi pu mettre en évidence un certain nombre de métiers considérés comme porteurs de compétences rares ou sensibles, qui font ainsi l'objet d'un suivi spécifique par les ressources humaines (RH) de proximité et d'une vigilance particulière au sein de l'agence. Ces métiers peuvent nécessiter un renfort de compétences (en particulier en sûreté d'exploitation, dans la conception et la réalisation des travaux souterrains, en management de projet de même qu'en contrôle de gestion, achats et stratégie d'allotissement), ou une veille pour maintenir le dimensionnement des effectifs (en sûreté long terme).

L'IRSN estime que la mise en œuvre de cette démarche d'identification des ressources et des compétences est **satisfaisante dans son principe**, et encourage l'Andra à la poursuivre, la pérenniser et la formaliser. L'IRSN souligne l'importance de coordonner les ressources humaines et les directions opérationnelles pour pourvoir aux besoins du programme Cigéo. **Aussi, l'IRSN estime que l'Andra pourrait, en lien avec la montée en puissance des effectifs et les jalons stratégiques du programme Cigéo, inscrire la démarche du CEDRE dans le cadre d'une concertation entre les directions métiers et la direction des ressources humaines, de manière à décliner sa stratégie sur les compétences et les effectifs au sein des différentes entités, et en transmettre le bilan une fois formalisé.**

Le travail d'acculturation, d'accompagnement et de formation au sein de l'Andra

Historiquement animé d'une mission de recherche scientifique, le programme Cigéo de l'Andra a peu à peu vu son besoin en compétences évoluer vers des métiers davantage tournés vers la réalisation industrielle, la sûreté d'exploitation, et la gestion de projet. Cette évolution, qui selon l'IRSN peut être vécue par certains salariés

¹⁶⁷ Concernant les évolutions d'effectifs, l'Andra a indiqué que, sur un effectif total Andra de 700 personnes, environ 70 % du personnel de l'agence soit 485 personnes, étaient en 2023 affectées au programme Cigéo. La projection en 2027 est de 650 personnes. Cette évolution représente une croissance de 30 % en 4 ans. Cette augmentation est parfois localement encore plus sensible au sein de certaines directions. Ainsi à la DIROP (périmètre T1), dotée de 50 personnes en 2024, il est prévu un quasi doublement des effectifs avec une cible à 90 personnes en 2026 (soit une croissance de 45 % en 2 ans).

comme une expérience déstabilisante, a conduit l'Andra à identifier le besoin d'acculturer tous les acteurs du projet Cigéo aux grands enjeux de la sûreté en phase d'exploitation, au management de projet, à l'ingénierie système et à la gestion de configuration. Celle-ci passe par des actions de sensibilisation et de formation à l'utilisation des outils et du vocabulaire associés, en vue d'assurer ses fonctions de MOA et pilote de MOE, en particulier en interface avec les sous-traitants.

Cependant, si ce besoin de formation et d'acculturation est clairement identifié au sein de l'Andra, il ne fait à ce jour l'objet d'aucune formalisation. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de préciser les référentiels de formation et les dispositifs d'acculturation associés, tels que les communautés de pratiques, en précisant les défis du programme Cigéo en phases de construction et d'exploitation auxquels ils se rattachent (culture de sûreté, pilotage de contrat, suivi de fabrication et de chantier, gestion de projet, gestion de configuration...).**

Par ailleurs, l'IRSN note qu'au-delà des formations aux nouveaux outils (WBS, Product Lifecycle Management ¹⁶⁸, planning...) déjà initiées par l'Andra, l'agence fait face à une évolution voire une mutation des métiers avec de nouvelles méthodes et pratiques (liées au renforcement de la planification) à acquérir au sein des différentes entités du programme Cigéo. Ces changements de pratiques professionnelles vont intervenir dans une période d'accroissement conséquent des effectifs avec du personnel parfois faiblement expérimenté dans certains nouveaux champs de responsabilité et provenant de domaines de métiers diversifiés. Pour l'IRSN, l'absorption de ressources faiblement expérimentées au sein d'une unité, relativement à la rareté des ressources expérimentées, pourrait avoir une incidence directe sur la capacité opérationnelle des équipes, du fait d'un important délai d'assimilation de la complexité liée au projet Cigéo.

Enfin, en plus des besoins de montée en compétences, le contexte d'une exploitation qui s'inscrit sur une durée séculaire comporte des enjeux de transmission des compétences entre générations d'exploitants et de renouvellement des effectifs. **Par conséquent, il appartiendra à l'Andra d'intégrer la dimension « capacité à former et compagneonner » dans sa stratégie d'identification des ressources et des compétences de façon à accompagner la montée en compétences et la mutation des métiers au sein de ses directions.**

Intégration de la compétence FOH dans le programme Cigéo

La prise en compte des dimensions organisationnelles et humaines du projet constitue un enjeu crucial pour l'exploitation de la future INB. A cet égard, l'Andra a montré depuis plusieurs années sa volonté de se doter en interne de compétences spécifiques en FOH dans le domaine de la sûreté nucléaire et a pris la décision de créer un poste de « Référent / Ergonome FOH – Cigéo » [137], qui devra porter un rôle d'intégrateur, avec une vision de la sûreté tournée vers la construction et l'exploitation opérationnelle de la future INB. **L'IRSN considère que cette décision est pertinente pour la bonne prise en compte des enjeux liés aux FOH du programme.**

Toutefois, au stade du DDAC, l'IRSN relève que la mission d'élaborer le futur projet de Plan d'intégration des facteurs organisationnels et humains (PIFOH) pour Cigéo et d'analyser les « activités sensibles » par poste de travail est attribuée au référent exploitation. L'IRSN considère que la délégation de cette mission à des acteurs non spécialistes du domaine peut à terme conduire à une mauvaise prise en compte de ces enjeux pour la sûreté de la future installation qui nécessitent, en outre, la mise en place de processus de travail collectif, en particulier *via* des réseaux pérennes d'acteurs spécialisés et sensibilisés aux FOH. **Par conséquent, l'IRSN estime que les dispositions prises par l'Andra au stade du DDAC en matière de prise en compte des FOH ne sont pas suffisantes au regard des enjeux de sûreté et de complexité associés à la construction et à l'exploitation de la future INB Cigéo. Ainsi, en lien avec les conclusions présentées *supra* relatives au déploiement des dispositions en lien avec la protection des intérêts, l'IRSN estime que l'Andra devra renforcer et concrétiser, pour la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique, les modalités d'organisation de la maîtrise des risques du programme Cigéo. A ce titre, l'Andra devra notamment favoriser la constitution d'un réseau d'acteurs sensibilisés aux FOH autour du référent FOH.**

¹⁶⁸ La gestion du cycle de vie du produit est le processus stratégique de gestion du parcours complet d'un produit depuis sa conceptualisation, son développement, sa mise en service. C'est le système d'information technique du projet dans lequel on trouve les documents et l'outillage des évolutions de Cigéo.

Ce point fait l'objet de l'**engagement 2024-E54** de la lettre CG-AMOA-LET-24-0033 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est acceptable et considère que l'Andra pourrait favoriser la déclinaison de la feuille de route par le recours à un réseau FOH et le pilotage par un référent FOH.

6.1.3. Anticiper les risques liés à la conception, à la construction et à l'exploitation

Identification des activités sensibles et des AIP

L'Andra a transmis dans le DDAC la démarche d'analyse des risques sous l'angle FOH prévue pour le programme Cigéo, dont les étapes sont d'identifier les activités sensibles pour la future exploitation de l'INB par type d'opérations (maintenance, process nucléaire...), d'analyser les défaillances humaines et organisationnelles potentielles associées ainsi que les causes, les conséquences, et les principales dispositions prévues pour maîtriser les risques associés à ces activités. Selon l'Andra, cette étape préliminaire pose les bases d'une future analyse qui détaillera les dispositifs à mettre en œuvre pour garantir la sûreté de la future INB Cigéo et répondre aux exigences associées (sûreté, radioprotection, ...). Toutefois, l'IRSN estime que cette première étape reste incomplète puisqu'elle ne tient pas compte de manière suffisamment approfondie :

- de l'ensemble des acteurs (rôles et responsabilités) mobilisés lors des phases de préparation et de réalisation d'une activité d'exploitation ;
- des exigences particulières de réalisation des actions (précision et rapidité d'exécution notamment) ;
- des moyens et conditions d'intervention ;
- des défaillances potentielles d'origine humaine et leurs conséquences pour la sûreté et la radioprotection ;
- ainsi que du programme FOH prévu pour valider les dispositions d'ordre technique, humain et organisationnel dans les phases à venir du projet.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra n'a pas apporté, à ce stade, les éléments permettant de se prononcer sur la complétude de sa démarche d'analyse des risques, en particulier son PIFOH. Il appartient à l'Andra de compléter son analyse détaillée des activités sensibles en lien avec la future cellule exploitation, en particulier la conception détaillée de la salle de conduite du futur bâtiment EP1, et d'y associer des exigences.

Par ailleurs, l'IRSN rappelle que les dimensions organisationnelles et humaines de la maîtrise des risques en phase d'exploitation incluent, au-delà de l'analyse des activités opérationnelles sensibles et de l'organisation du travail des opérateurs de « première ligne », la fiabilisation du travail des ingénieurs et des managers au sein de processus organisationnels (par exemple, le système de management intégré, la gestion prévisionnelle des emplois et compétences, l'animation de la culture de sûreté...) intégrant la maintenance, le management des configurations et du vieillissement de l'infrastructure, les fonctions support ou encore la relation contractuelle entre l'Andra et le futur opérateur industriel (si ce schéma organisationnel est retenu). **Il appartiendra ainsi à l'Andra d'intégrer cette dimension dans son PIFOH.**

Enfin, l'Andra présente succinctement les trois grandes catégories d'AIP identifiées en phase de conception initiale (cf. chapitre 3.4.3 du présent rapport). L'IRSN constate que, d'une part, l'Andra n'a pas présenté de déclinaison détaillée des différentes AIP (par exemple, sur la salle de conduite du futur bâtiment EP1) et que, d'autre part, l'identification des AIP a été réalisée indépendamment de celle des activités sensibles. Or, l'IRSN considère qu'elles doivent être étudiées de manière conjointe afin de constituer une donnée d'entrée à l'analyse globale des dispositions organisationnelles et humaines de la maîtrise des risques. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de réaliser l'analyse des activités sensibles conjointement à celle des AIP en synergie avec la cellule exploitation (cf. *supra*), et que celle-ci soit mise en cohérence avec le PIFOH.**

Apprendre du passé pour identifier des enjeux de la maîtrise des risques

Retour d'expérience d'exploitation des autres installations Andra et des phases antérieures du projet Cigéo

En prévision des phases de construction et d'exploitation de Cigéo, l'Andra s'appuie sur le retour d'expérience (**REX**) de ses autres installations (CSA, Cires, CSM et CMHM), en termes de conception, de creusement,

d'exploitation, de gestion des activités sous-traitées ou encore de maintien de la mémoire de la future installation.

De son expérience d'exploitant du CSA, l'Andra retient en particulier le principe de construction en chantiers clos et indépendants, qui consiste à cloisonner la partie en construction d'un ouvrage de sa partie en exploitation afin de limiter au maximum la coactivité entre activités de construction et activités d'exploitation (cf. chapitre 4.3.5 du présent rapport), ainsi que le principe de construction progressive, qui consiste à construire de manière échelonnée dans le temps les différents quartiers de stockage MA-VL et HA. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que le REX du CSA est également mobilisé actuellement, ainsi que celui du Cires, pour aider les équipes du projet Cigéo à définir plus précisément les modalités de contractualisation avec les futurs prestataires de maintenance, de suivi et de contrôle de ces activités sous-traitées (réunions quotidiennes et hebdomadaires pour gérer la coactivité sur le centre en présence des opérateurs de construction, d'exploitation et de maintenance, planification de réunions mensuelles de suivi, présence quotidienne de l'exploitant sur place pour suivre au plus près les activités des prestataires, ...). Enfin, le dispositif de gestion de la mémoire pour Cigéo est pour sa part en partie inspiré des dispositifs déjà mis en place sur le CSM (« dossier synthétique de mémoire » et « dossier détaillé de mémoire »). Les enjeux liés à l'élaboration du dispositif de gestion de la mémoire sont examinés par l'IRSN dans le cadre du GP3 relatif à l'évaluation de sûreté après fermeture.

Par ailleurs, l'expérience accumulée depuis plus de 20 ans dans le laboratoire souterrain du CMHM a également permis de faire émerger un REX important en matière de maintenance et d'exploitation des ouvrages souterrains, comme indiqué par l'Andra au cours de l'instruction. A titre d'exemple, la conception et le fonctionnement de la salle de conduite centralisée au CMHM, depuis laquelle toutes les activités du laboratoire souterrain sont surveillées, le fonctionnement des ascenseurs est piloté, et les flux montants et descendants de personnel entre le souterrain et la surface sont contrôlés, constituent une base référentielle pour concevoir la salle de conduite centralisée de Cigéo.

Pour l'IRSN, le REX interne constitué par l'Andra constitue une base de référence pertinente en vue de la définition des points saillants liés aux FOH à intégrer dans la construction et l'exploitation de Cigéo. Néanmoins, les entretiens menés durant l'expertise de l'IRSN ont montré que ce REX, riche en enseignements, n'est à ce stade pas formalisé, ce qui pourrait rendre plus difficile la constitution de la mémoire et son utilisation par les futures générations. En particulier, la traçabilité des enseignements retenus et de leur utilisation pour certaines justifications des choix de conception pourrait être renforcée. **En particulier, l'IRSN souligne que ce REX interne n'a pas été spécifiquement élaboré sur le plan des dimensions organisationnelles et humaines d'exploitabilité des futures installations de Cigéo.**

REX d'autres projets nucléaires et souterrains

L'Andra s'est également appuyée sur le REX de nombreux projets nucléaires et souterrains en France et à l'international [51] : l'EPR de Flamanville, le chantier de construction du Grand Paris, le chantier du TELT (projet de section transfrontalière Lyon-Turin), ou encore les projets de creusement et d'exploitation de mines d'uranium. Ce REX externe s'est appuyé sur le recrutement de salariés ayant déjà acquis une expérience des grands projets nucléaires et souterrains, ainsi que sur plusieurs instances de discussion et de concertation (collaboration avec EDF pour bénéficier du REX de la construction de l'EPR de Flamanville, revue de cohérence entre l'Andra et les trois principaux producteurs de déchets (EDF, Orano et le CEA), CTS qui réunit dix personnes issues d'entreprises du monde du souterrain, des mines et des tunnels).

Pour l'IRSN, ce REX externe témoigne de la volonté de l'Andra de monter en compétences sur la gestion de grands projets industriels nucléaires et souterrains, à la fois sur des aspects techniques mais aussi de pilotage de projet, de planification, de gestion des coûts et des risques, et s'inscrit de manière cohérente dans sa stratégie de montée en puissance en tant que maître d'ouvrage du programme Cigéo. En outre, la prise en compte de REX d'univers industriels différents est de nature à renforcer la capacité de l'Andra à mener à bien la réalisation de l'INB Cigéo. **Toutefois, comme pour le REX interne examiné ci-avant, l'IRSN souligne que ce REX externe n'a pas non plus été élaboré sur le plan des dimensions organisationnelles et humaines d'exploitabilité des futures installations de Cigéo. Par conséquent, l'IRSN considère que l'Andra doit renforcer la formalisation de son REX**

(interne et externe), y compris sur les dimensions organisationnelles et humaines, afin d'en faciliter son appropriation d'une part et de constituer une ressource mobilisable pour la maîtrise des risques pour le projet Cigéo d'autre part. Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E55](#) de la lettre CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.



6.2. Phase industrielle pilote

L'Andra prévoit, conformément à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, de démarrer Cigéo par une phase industrielle pilote¹⁶⁹. Cette phase pilote débute à la délivrance du décret d'autorisation de création et comprend deux périodes : une période de construction du stockage et d'essais en « inactif » (sans colis de déchets réels), dite « phase pilote inactive » suivie, après l'autorisation de mise en service partielle¹⁷⁰, d'une période d'essais de démarrage en « actif » puis de stockage de colis de déchets radioactifs, dite « phase pilote active ». A l'issue de cette phase industrielle pilote, l'Andra déposera un rapport en présentant les résultats en vue de l'autorisation de mise en service complète de l'installation. Au cours de la réunion préparatoire au GP2 tenue le 7 octobre 2024, l'Andra a indiqué que la durée de cette phase pourrait atteindre une trentaine d'années, avec environ 25 ans de phase inactive et l'ordre de 5 à 10 ans de phase active.

Objectifs et critères de la phase pilote

Les objectifs de la phase industrielle pilote sont présentés par l'Andra dans le DDAC [42] et ont été précisés au cours de l'instruction [138], en réponse à la demande du GPD [4], dans une note [138] qui préfigure, « *sans prétendre être exhaustif à ce stade* », les propositions que l'Andra remettra à la fin de l'année 2024 au titre de l'action HAMAVL.6 du PNGMDR. Les objectifs techniques généraux identifiés par l'Andra pour cette phase, en cohérence avec l'article L. 542-10-1 précité, sont (i) de « *conforter in situ, dans les vraies conditions [...] d'environnement, de construction et de fonctionnement industriel de l'INB Cigéo, les données utilisées pour sa conception et pour sa démonstration de sûreté* » et (ii) de « *prendre en main progressivement l'exploitation de l'INB Cigéo* ». Ces objectifs techniques généraux sont ensuite déclinés en objectifs, auxquels l'Andra associe des exemples de critères de réussite et de moyens [138] pour former des « *premiers éléments d'objectifs* ». Ces objectifs sont, pour l'objectif technique général (i) précité, de conforter les caractéristiques initiales du site et en particulier de la couche du COX, de conforter le comportement des ouvrages souterrains au regard du maintien de leurs fonctionnalités, de préparer la fermeture de l'installation souterraine, de mettre en œuvre la stratégie de surveillance et de conforter la réversibilité de Cigéo (flexibilité, récupérabilité...). Pour l'objectif technique général (ii), les objectifs identifiés par l'Andra sont de confirmer en conditions réelles les méthodes industrielles de creusement, de qualifier les EIP du procédé nucléaire, de préparer la réception des familles de colis pour tester les modalités de stockage et de consolider l'organisation de l'exploitant. Par ailleurs, l'Andra indique [42] que les opérations de réception, de préparation, et de mise en stockage de colis de déchets radioactifs seront menées pendant quelques années après la mise en service afin « *d'acquérir un retour d'expérience solide du fonctionnement* » de Cigéo (phase dite « *d'exploitation industrielle* » de la phase pilote [138]).

L'IRSN considère que ce travail préliminaire, basé sur des objectifs techniques généraux qu'il estime pertinents, constitue une première étape utile en vue de définir le programme des travaux à mener lors la phase industrielle pilote et encourage l'Andra à poursuivre la démarche engagée. Toutefois, l'IRSN observe que la nature des critères donnés comme exemples par l'Andra (critères génériques, qualitatifs, parfois peu précis et confondus avec les objectifs ou les moyens) ne permettra pas, pour la plupart d'entre eux, d'apprécier les travaux à réaliser au cours de la phase pilote pour les atteindre. L'IRSN considère donc qu'une attention particulière devra être portée, lors du développement de cette démarche, à la définition de ces critères de réussite. **Ainsi, l'IRSN estime qu'il appartiendra à l'Andra de préciser sa démarche d'identification des objectifs et critères de réussite de la**

¹⁶⁹ Article issu de la loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde.

¹⁷⁰ Calendrier de demande d'autorisation de mise en service limitée à la phase industrielle pilote en cours de mise à jour, et avec un horizon actuellement autour de 2050.

phase pilote et de compléter ceux-ci en vue de fonder, sur cette base, le programme de travaux à mener en phase pilote inactive et active.

A cet égard, l'IRSN rappelle que des compléments relatifs aux données de base retenues pour l'évaluation de sûreté de Cigéo, à apporter au cours de la phase industrielle pilote, ont été identifiés à l'issue de l'expertise GP1 afin de consolider ces données (notamment programme de reconnaissance du COX à l'aplomb des structures détectées dans le Trias au droit de la partie nord du futur quartier de stockage HA, programme de recherche sur la corrosion en présence du MREA, démonstration *in situ* de scellements) [2]. La présente expertise de l'évaluation de sûreté en phase d'exploitation met également en exergue des compléments nécessaires en vue de la demande d'autorisation de mise en service de l'INB. L'IRSN convient que, au regard des spécificités de Cigéo en comparaison d'autres INB, certains de ces compléments de démonstration mériteraient des essais *in situ* en installation souterraine, dans les conditions d'environnement et de fonctionnement industriel tenant compte des changements d'échelle par rapport à des essais en surface ou au LSMHM, comme ceux relatifs à la maîtrise de l'atmosphère des alvéoles HA (cf. chapitre 4.3.2.2 du présent rapport) ou aux dispositions de surveillance en alvéoles MA-VL (cf. chapitres 3.5 et 4.2.2). En outre, des essais de qualification prévus par l'Andra seront à mener notamment en surface (procédés nucléaires prévus dans EP1, tenue des conteneurs de stockage au feu et à la chute...) et en installation souterraine (génie civil, ventilation, dispositions de détection incendie et de désenfumage, manutention, récupérabilité...). Ainsi, l'IRSN considère que le programme à mener pendant la phase industrielle pilote doit non seulement permettre de conforter, mais également de compléter la démonstration de sûreté en phase d'exploitation. **En conséquence, l'IRSN estime que l'Andra devra intégrer, dans les prochaines révisions de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, le programme des travaux à réaliser en phase pilote « inactive », au regard des compléments à apporter à la démonstration de sûreté.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E52](#) de la lettre CG-AMOA-LET-24-0033 rappelée en annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est acceptable dans la mesure où il s'entend comme un programme qui visera bien à compléter et à conforter la démonstration de sûreté. Ce programme pourra accompagner les éléments que l'Andra transmettra avant le creusement des LSF.

Périmètre de la phase pilote

Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué qu'elle prévoyait de stocker environ 6 000 colis au cours des 5 premières années suivant la mise en service de la phase pilote (entre 600 et 1 400 colis stockés par an) et a précisé les chroniques de livraison de ces colis (cf. annexe T20) au sein des 4 premiers alvéoles du quartier MA-VL et de celles du quartier pilote HA, sans toutefois conférer à ces éléments un caractère intangible. Elle prévoit [42] que toutes les infrastructures nécessaires à l'exploitation de Cigéo soient construites dès la phase pilote, ce qui permet d'après l'Andra la continuité de l'exploitation durant la phase transitoire envisagée entre la fin de la phase industrielle pilote et la mise en service complète de l'installation. A cet égard, elle indique [42] qu'un arrêt du fonctionnement de l'installation serait susceptible de générer des risques au moment de la reprise de l'activité, les phases de redémarrage étant des « *phases sensibles [...] devant être évitées si elles ne sont pas justifiées* ». En outre, l'Andra indique [42] ne pas exclure la construction, voire la mise en service, d'alvéoles MA-VL supplémentaires pendant la phase pilote pour répondre à des besoins particuliers, sous réserve d'autorisation.

S'agissant en premier lieu du nombre de colis prévus par l'Andra en phase pilote active, l'IRSN rappelle [2] qu'il estime que les choix de type de colis retenus par l'Andra sont pertinents dans l'objectif de tester les opérations et modes de stockage. Toutefois, l'IRSN constate que le nombre de colis estimé pour ce faire (environ 6 000 colis) est plus élevé que celui qu'elle envisageait lors de la première estimation présentée en 2015 (3 700 colis) [24]. L'IRSN estimait alors [24] que ce nombre reflétait davantage un passage en exploitation courante qu'une vérification de la capacité de l'installation à atteindre une cadence industrielle. L'IRSN relève que l'Andra n'a pas apporté depuis d'éléments de justification relatifs au nombre de colis à stocker durant la phase industrielle pilote en lien avec le confortement de la démonstration de sûreté. En outre, l'IRSN constate que le rythme de stockage de chaque type de colis prévu par les chroniques annuelles prévisionnelles de stockage des colis pour les cinq premières années de la phase pilote active est élevé dès le démarrage des opérations de stockage et n'est ainsi pas cohérent avec une montée en puissance progressive de l'installation. A cet égard, l'IRSN estime que

l'estimation du nombre et du rythme de stockage de colis nécessaires durant la phase pilote active doit être basée sur les besoins d'un programme d'essais des processus de mise en stockage (essais « unitaires » de ces processus, essais des processus à leurs interfaces, essais d'ensemble, essais de retrait), en tenant compte des spécificités des colis. En outre, l'IRSN estime que cette estimation doit également tenir compte du nombre de colis nécessaires pour la mise en œuvre de la totalité de la chaîne de mise en stockage, à un rythme visant à démontrer la capacité de l'installation à fonctionner à la cadence nominale visée. A cet égard, l'IRSN convient que les arrêts et redémarrages d'une installation sont des phases sensibles en termes de sûreté et que la continuité des opérations nucléaires est donc à rechercher. Toutefois, les méthodes d'exploitation peuvent être éprouvées à un rythme jusqu'à celui visé pour l'exploitation courante sans maintenir celui-ci pendant plusieurs années. Par ailleurs, l'IRSN considère que la construction d'alvéoles MA-VL supplémentaires doit pouvoir bénéficier du retour d'expérience de la construction et de l'exploitation de ceux prévus au titre de la phase pilote industrielle, potentiellement accessible avant l'élaboration du rapport précité présentant les résultats de la phase pilote. **Ainsi, l'IRSN rappelle que le nombre de colis à stocker durant la phase pilote, ainsi que le rythme des opérations de stockage, doivent être évalués sur la base du programme des essais en actif relatifs aux étapes du processus de mise en stockage et de retrait des colis et estime qu'il n'est pas acceptable de construire des alvéoles de stockage des tranches ultérieures de l'installation au cours de la phase pilote avant d'avoir établi un retour d'expérience associé à la construction et à l'exploitation ce type d'ouvrage.**

S'agissant de la chronologie de la phase pilote, l'IRSN estime en première approche qu'une durée de l'ordre de 25 ans à partir de la délivrance du décret d'autorisation de création semble à ce stade raisonnable pour que les essais en phase pilote inactive puissent apporter les compléments nécessaires à la démonstration de sûreté et conforter celle-ci. En outre, une durée de l'ordre de quelques années semble également suffisante pour que les essais en phase pilote active permettent de confirmer la capacité de l'installation à fonctionner de façon sûre. A cet égard, l'IRSN estime que le rapport relatif aux résultats de la phase pilote pourrait être transmis simultanément au dossier de fin de démarrage, appelé par l'article R. 593-34 du code de l'environnement, qui comprend notamment un rapport de synthèse sur les essais de démarrage, en y intégrant le bilan des essais non dédiés au fonctionnement (e.g. relatifs aux scellements).

6.3. Opérations de démantèlement - fermeture

Conformément au code de l'environnement (article R. 593-16) et au guide n°6 de l'ASN relatif à l'arrêt définitif, au démantèlement et au déclassement des installations nucléaires de base, le DDAC de Cigéo comporte un plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance de l'installation [82] qui présente les principes méthodologiques, les étapes et les délais envisagés pour : (i) démanteler les parties de l'installation qui ne seront plus nécessaires à l'exploitation du stockage, (ii) fermer l'installation souterraine et (iii) surveiller l'installation après fermeture. Ce chapitre aborde la stratégie de démantèlement-fermeture retenue par l'Andra (chapitre 6.3.1) puis présente l'examen par l'IRSN des principales opérations qui y sont liées dans les installations de surface et dans l'installation souterraine (chapitre 6.3.2) ainsi que du scénario prévisionnel de fermeture retenu au stade du DDAC (chapitre 6.3.3). La surveillance qui sera mise en place après la fermeture définitive de l'installation souterraine, qui concerne les différents compartiments de l'environnement, le milieu géologique et potentiellement les ouvrages souterrains, est à ce stade décrite de façon sommaire et n'appelle pas de remarque particulière de l'IRSN.

6.3.1. Stratégie retenue

L'Andra précise [82] que le plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance de l'installation sera mis à jour lors de la mise en service de Cigéo ainsi que lors de toute modification de décret d'autorisation et, si besoin, lors des réexamens périodiques de sûreté.

La stratégie de démantèlement-fermeture retenue par l'Andra prévoit [82] des opérations de fermeture partielle, par quartier de stockage, réalisées avant la fermeture définitive de l'installation. Les fermetures partielles consistent à démonter des équipements d'exploitation et à construire des ouvrages de fermeture (remblais et scellements). En même temps que ces fermetures partielles, les installations de surface devenues

inutiles seront démantelées. Ainsi, au stade du DDAC, la principale opération de démantèlement présentée avant la fermeture définitive de Cigéo concerne le bâtiment EP1, actuellement envisagée vers 2100, avec la fermeture du quartier MA-VL. La fermeture définitive de Cigéo consiste à sceller et remblayer les ouvrages souterrains, notamment les liaisons surface-fond, ainsi qu'à démanteler les dernières installations de surface support aux opérations de stockage (e.g., EP2 prévu pour les colis HA1/HA2). L'Andra précise que ces étapes de fermeture partielle et définitive feront l'objet d'une procédure d'autorisation adaptée tenant compte de la sûreté en exploitation et après fermeture, ainsi que de l'évolution des besoins industriels des parties prenantes. La procédure complète est illustrée par la Figure 30.

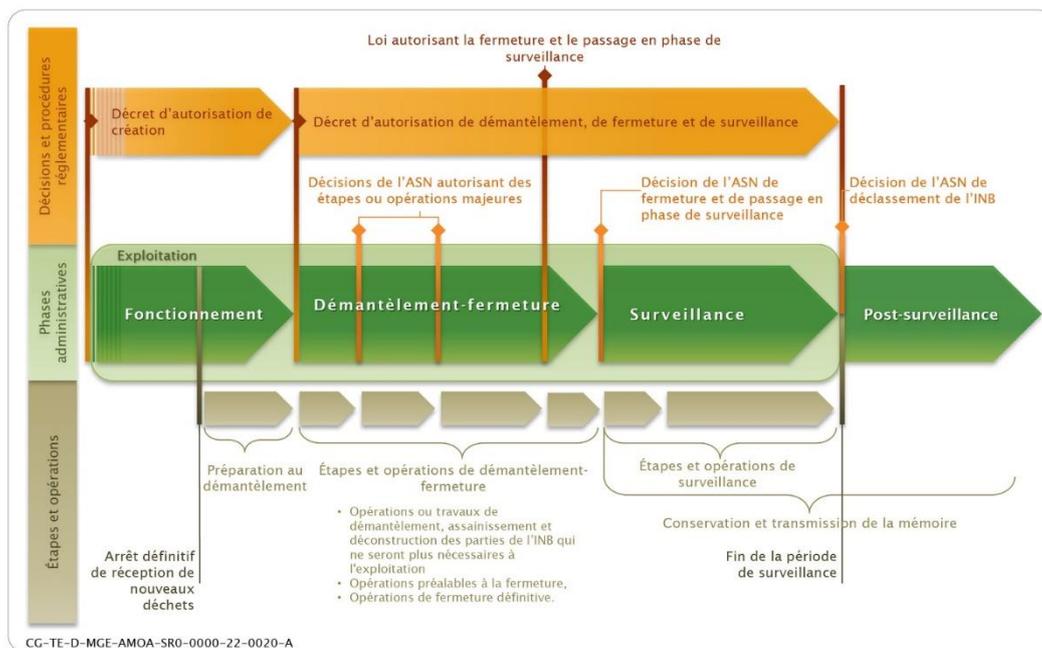


Figure 30. Procédures et étapes des opérations de démantèlement-fermeture et de surveillance envisagées par l'Andra [82].

L'IRSN rappelle que le code de l'environnement prévoit une mise en œuvre de la stratégie de démantèlement dans un délai « aussi court que possible » et estime que l'échéancier présenté par l'Andra au stade du DDAC, qui sera amené à être précisé lors d'échéances futures, répond à ce principe en prévoyant le démantèlement de l'installation EP1 dès la fin des opérations de remplissage du quartier de stockage MA-VL, à l'horizon 2100. Les principales opérations de démantèlement-fermeture et le scénario prévisionnel de fermeture sont examinés ci-après.

6.3.2. Principales opérations de démantèlement-fermeture

6.3.2.1. Installations de surface

L'Andra indique [82] que des dispositions sont prises dès la phase de conception initiale de l'installation de surface et que des opérations sont menées tout au long de son fonctionnement pour en faciliter le démantèlement et l'arrêt définitif. Les principales dispositions prises concernent :

- la limitation des quantités de déchets induits par le démantèlement, grâce à un zonage optimisé et des moyens d'évacuation aisés vers la zone centralisée de traitement/conditionnement du bâtiment EP1 ;
- la protection contre la contamination par interposition de différentes barrières de confinement (colis primaires, ventilation nucléaire), par la limitation des risques pendant la manutention de colis et par la mise en place de revêtements décontaminables sur les sols, parois, ou équipements selon le zonage ;
- la protection contre l'activation, grâce à l'utilisation de parois en béton, acier ou polyéthylène et de surépaisseurs faciles à enlever sur les structures de génie civil.

L'IRSN considère que les dispositions prises en amont par l'Andra pour limiter les quantités de déchets, ainsi que les dispositions de protection contre la contamination, l'activation et la pollution des sols sont suffisamment décrites pour le bâtiment EP1 au stade du DDAC et **n'appellent pas de remarque particulière à ce stade.**

L'Andra précise [82] que les opérations de démantèlement sont préparées pendant la phase de fonctionnement et qu'elles démarrent à partir du décret d'autorisation de démantèlement (cf. Figure 30). Ces opérations comprennent alors principalement deux types d'activités :

- le démantèlement des équipements activés ou potentiellement contaminés et la gestion des flux de déchets induits ;
- l'assainissement du génie civil visant à l'élimination de la radioactivité restante (ou de toute autre substance dangereuse) en vue du déclassement des locaux en zone non réglementée.

À cet égard, l'Andra indique [82] que les meilleures techniques disponibles seront envisagées et privilégiées à ce stade les méthodes de démolition mécaniques (pelles mécaniques, brise-roches hydrauliques, cisailles à béton pour découper les armatures, crocs ou grappins hydrauliques pour séparer les armatures du béton...). L'IRSN estime que ces techniques sont relativement classiques dans le domaine de la déconstruction, mais note que l'Andra se réfère peu au retour d'expérience issu du démantèlement d'installations de surface en France ou à l'étranger. **Aussi, il appartiendra à l'Andra de conforter la démonstration de faisabilité du démantèlement de ses installations de surface au stade de la demande de mise en service à l'aide du retour d'expérience existant.**

L'Andra identifie dans le DDAC [82] des ZppDN et indique que les déchets qui en seront issus seront de très faible activité et devront faire l'objet d'une gestion adaptée. L'Andra évalue la masse totale de déchets issus du démantèlement des bâtiments EP1 (respectivement ETH) à environ 5 000 (respectivement 1 550) tonnes à l'horizon 2100, et 1 550 tonnes issues d'EP2 vers 2150. Ces déchets seront triés et orientés vers les filières adéquates. **Ceci n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

Enfin, l'Andra présente également dans le DDAC une description sommaire de l'état final visé en vue du déclassement des locaux et prévoit de maintenir un bâtiment sur chacun des deux sites « descenderie » et « puits » (distants de quelques kilomètres) afin de pouvoir réaliser les différentes activités conservées au cours de la phase de surveillance (accueil du public, activités liées à la mémoire, sécurité, maintenance et entretien du site, surveillance de l'environnement...), en précisant qu'une évolution pourrait conduire à ne conserver qu'un seul bâtiment sur l'un des deux sites. L'Andra prévoit également que les verses non utilisées pour le remblaiement seront replantées durablement et précise que la surveillance post-démantèlement sera « *dans la continuité* » de la surveillance en phase de fonctionnement (qualité de l'air, qualité des eaux, surveillance des verses...). A cet égard, **il appartiendra à l'Andra d'affiner la description de l'état final visé au stade de la mise en service.**

6.3.2.2. Installation souterraine

Dispositions préalables à la fermeture

Comme pour les installations de surface, l'Andra [82] indique des dispositions prises dès la conception de l'installation souterraine pour en faciliter la fermeture, notamment dans la cellule de manutention MA-VL où il est prévu :

- en cas de contamination, de pouvoir décontaminer les surfaces du génie civil et de « vinyler » les équipements avant leur transfert en surface pour décontamination ;
- de pouvoir transférer les équipements de la cellule de manutention MA-VL vers la surface par la descenderie de service sans nécessiter de les découper au fond.

En complément de ces dispositions, l'Andra prévoit également pour l'installation souterraine des dispositions destinées à préparer les opérations de fermeture, en particulier :

- la mise en place, dès la phase pilote, de démonstrateurs de fermeture (remblais, coupure hydraulique, scellements) en vue d'acquiescer un retour d'expérience suffisant pour la fermeture définitive de Cigéo,

ainsi que la réservation de linéaires à des emplacements spécifiques permettant de favoriser l'efficacité et la redondance des scellements ;

- la conservation de verses en surface et l'anticipation des moyens nécessaires (bâtiment dédié au traitement préalable, convoyeur tubulaire...) pour les réacheminer au fond, principalement par la descendrière de service ;
- des dispositions de surveillance visant à vérifier l'adéquation des conditions initiales à la fermeture (conditions d'ambiance des alvéoles, éventuelles déformations des alvéoles et des colis, composition chimique de l'eau en tête d'alvéole HA, corrosion... cf. chapitre 3.5).

L'Andra prévoit [82] également des opérations préalables à la fermeture menées au niveau des alvéoles de stockage. Ainsi, pour les alvéoles MA-VL, un mur de radioprotection composé d'un ensemble de blocs préfabriqués est construit au fur et à mesure de la mise en place des nappes de colis et lorsque l'alvéole est rempli, un contrôle de non contamination est réalisé dans la cellule de manutention ; l'alvéole est ensuite mis « sous cocon », ce qui signifie que les équipements qui ne sont plus utilisés et qui ne nécessitent pas de maintenance sont mis en veille et que ceux qui nécessitent de la maintenance sont retirés (ceux participant à la sûreté, notamment la ventilation et la surveillance, restent actifs). Pour les alvéoles HA, dès la fin du remplissage de l'alvéole, les conteneurs de fermeture, qui assurent aussi une fonction de radioprotection, sont insérés dans l'alvéole ; puis la bride est refermée et un premier inertage est réalisé, qui sera renouvelé en tant que de besoin jusqu'à la fermeture définitive de l'alvéole (cf. chapitre 4.3.2.2).

L'IRSN considère que les dispositions prises par l'Andra en vue de préparer la fermeture des installations souterraines, telles que la possibilité de décontamination préalable au fond, le vinylage sur place avant transfert en surface, la limitation des découpes, etc., sont de nature à limiter la quantité de déchets radioactifs produits, **ce qui est satisfaisant**. Par ailleurs, l'IRSN souligne que la mise en place de démonstrateurs de fermeture dans Cigéo est nécessaire afin de consolider la démonstration de sûreté après fermeture mais rappelle [2] que la définition de ces ouvrages est encore très préliminaire.

Opérations de démantèlement-fermeture

L'Andra indique [20] que les opérations de fermeture consistent dans un premier temps en des opérations pouvant s'apparenter à des opérations de démantèlement, à savoir démonter des équipements qui n'ont pas vocation à rester en place, soit parce qu'ils sont valorisables, soit parce que leur quantité, nature ou géométrie pourraient être préjudiciables à la sûreté à long terme (production de gaz, de complexants, création de chemins préférentiels de transfert...). Dans un deuxième temps, l'Andra indique que les ouvrages de fermeture (remblais, scellements) sont progressivement mis en place selon le séquençage suivant : (i) obturation des alvéoles, (ii) fermeture des galeries d'accès, (iii) fermeture des galeries de liaison et (iv) fermeture des zones de soutien logistique et des liaisons surface-fond [82].

S'agissant des opérations de démantèlement, celles prévues par l'Andra dans les quartiers HA de l'installation n'appellent pas de remarque particulière. S'agissant du quartier MA-VL, l'Andra précise [82] que le démantèlement de l'installation souterraine produit très peu de déchets radioactifs et qu'ils sont principalement issus du quartier MA-VL, notamment du déséquipement de sa ventilation nucléaire. L'IRSN convient que, hors scénario accidentel, la fermeture du quartier MA-VL est susceptible de produire la plus grande part de déchets issus du démantèlement de l'installation souterraine (équipements de manutention et de ventilation nucléaire dans la galerie de retour d'air). À cet égard, l'IRSN souligne que les premières étapes de fermeture (obturation des alvéoles et fermeture des galeries d'accès), mêlant activités de génie civil et de démantèlement, sont aussi les plus sensibles (enjeux liés à la coactivité et à des contraintes d'exploitation importantes, telles que le démontage d'équipements lourds et l'arrêt de la ventilation de l'alvéole MA-VL). Pour les opérations nécessitant un confinement, l'IRSN observe que l'Andra prévoit de les réaliser par tronçons de galerie, sous sas ventilés, notamment de type nucléaire pour le déséquipement de la jonction de retour d'air MA-VL où l'Andra envisage l'utilisation d'un caisson mobile THE avec contrôle de l'air au point d'extraction et une balise de radioprotection au point de rejet. **L'IRSN estime que ces dispositions sont satisfaisantes sur le principe, mais qu'il conviendra que l'Andra justifie le dimensionnement des sas ventilés prévus (filtration, taux de renouvellement,**

surveillance) en amont de leur mise en œuvre au regard du risque de contamination lors des opérations conformément à la norme NF EN ISO 16647. L'IRSN note que ces dispositions permettent d'évaluer à 9 tonnes la quantité de déchets attendue du démantèlement du quartier MA-VL à l'horizon 2100, ce qui est effectivement très inférieur aux 8 100 tonnes attendues du démantèlement des installations de surface.

S'agissant des flux de fermeture au sein de l'installation souterraine, l'IRSN observe qu'à l'exception des galeries « travaux » situées à l'est du quartier MA-VL et dont les flux passent par le puits MMT, tous les autres flux de fermeture passent par la descenderie de service et donc par le carrousel d'exploitation pour aller vers les quartiers HA (hors HA pilote) ou MA-VL. Dans le cas des galeries dites « travaux », le personnel passe par le puits VFT et les chantiers sont indépendants de l'exploitation des quartiers HA, **ce qui est satisfaisant**. En revanche, pour les autres galeries, l'Andra a bien identifié [82] que le transit de flux de fermeture par le carrousel peut « créer des perturbations plus ou moins importantes » sur le fonctionnement, liées aux temps de transit, aux créneaux disponibles et à la propreté des installations après le passage de ces flux. L'Andra indique [82] que cette difficulté sera gérée par l'interdiction du passage de flux de fermeture dans le carrousel pendant les heures de fonctionnement du procédé nucléaire. Pour faire face aux contraintes que cette interdiction pourrait induire, l'IRSN observe que l'Andra [86] n'exclut pas la possibilité d'un puits supplémentaire dédié aux opérations de fermeture ou d'éventuels forages d'utilités pour amener des matériaux et fluides au fond (béton, fuel). L'IRSN convient que ces dispositions pourraient conduire à lever certaines contraintes mais considère qu'elles pourraient aussi en engendrer d'autres, notamment pendant leur creusement. En outre, l'IRSN estime que cette possibilité nécessite d'anticiper la localisation de ces ouvrages ainsi que d'évaluer leur impact en termes de sûreté après fermeture. **Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra justifier, avant le début des opérations de creusement, que l'architecture de Cigéo permet de concilier les flux relatifs aux activités nucléaires et aux activités de fermeture sans impact sur la maîtrise des risques.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E56](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant. **Il appartiendra en outre à l'Andra d'estimer l'impact sur les durées de fonctionnement des éventuelles dispositions compensatoires (limitations de passage au niveau du carrousel...) qu'elle envisage.** Ces éléments sont repris au chapitre 6.5 relatif à la flexibilité.

S'agissant des opérations de fermeture, les principaux risques identifiés par l'IRSN à ce stade sont ceux liés à l'explosion et à la co-activité, examinés respectivement aux chapitres 4.3.2 et 4.3.5 du présent rapport.

6.3.3. Scénario prévisionnel de fermeture

Comme au stade du DOS, l'Andra retient au stade du DDAC [82] un scénario prévisionnel de fermeture établi sur la base d'une analyse multicritère (sécurité/sûreté en exploitation, surveillance, progressivité, impact sur le service industriel, optimisation technico-économique) similaire à celle transmise au cours de l'instruction du DOS et considérant trois échéances possibles pour l'obturation des alvéoles de stockage : au plus tôt après le remplissage, à la fin du remplissage de chaque quartier et à l'issue de la phase de fonctionnement. Le scénario prévisionnel retenu en référence est très similaire à celui proposé au stade du DOS et prévoit l'obturation à la fin du remplissage de chaque quartier, jalonné par trois grandes étapes de taille et de complexité croissantes :

- fermeture du quartier pilote HA vers 2080¹⁷¹ (au lieu de 2070 au stade du DOS), après environ 40 ans de fonctionnement et de surveillance ;
- fermeture du quartier de stockage MA-VL vers 2100 à l'issue de son remplissage, après environ 60 ans de fonctionnement et environ 20 ans après la fermeture du quartier pilote HA ;
- fermeture du quartier de stockage HA vers 2150 à l'issue de son remplissage, après environ 70 ans de fonctionnement et environ 50 ans après la fermeture du quartier de stockage MA-VL.

L'Andra précise que ces étapes visent la construction des premiers scellements vers 2100 pour la fermeture du quartier MA-VL, avec une fermeture définitive vers 2150 [82]. Pour l'Andra, ce scénario prévisionnel constitue à ce stade un optimum du point de vue industriel mais n'est pas figé.

¹⁷¹ Ces dates, présentées dans le DDAC, n'ont pas été actualisées suite au changement de calendrier de la phase pilote présenté par l'Andra au cours de la réunion préparatoire du 7/10/2024 (cf. chapitre 2.6).

Comme au stade du DOS, l'IRSN estime que la stratégie de fermeture progressive proposée par l'Andra apparaît comme un compromis acceptable à ce stade entre les différents critères identifiés et pourrait permettre l'acquisition d'un retour d'expérience de la première phase de fermeture pour les suivantes, puis pour celle de fermeture définitive du stockage. Toutefois, l'IRSN rappelle que la possibilité de rouvrir un alvéole MA-VL fermé n'est pas démontrée à ce stade et que la fermeture de ces alvéoles peut conduire à un risque ATEX (cf. chapitre 4.3.2.1).

6.4. Récupérabilité

L'Andra définit dans le DDAC [139] la récupérabilité comme « *la capacité pratique à retirer les colis stockés en formation géologique profonde* ». Comme au stade du DOS, l'Andra reconduit deux types de scénarios impliquant la mise en œuvre de retrait de colis :

- les scénarios dits de « retrait d'exploitation », qui correspondent à un retrait de colis d'un alvéole en exploitation (i.e. avant la fermeture de celui-ci) et qui font partie intégrante de l'exploitation courante. L'Andra indique que ces scénarios ne présentent pas de risques différents de ceux associés aux opérations de mise en stockage, excepté pour les opérations de retrait d'un colis HA depuis sa position de stockage jusqu'à la tête d'alvéole (cf. ci-dessous) ;
- les scénarios dits de « retrait hypothétique », qui ne font pas partie de l'exploitation courante du stockage et qui correspondent à des scénarios envisagés au titre de :
 - la réversibilité : retrait complet et réexpédition de tous les colis d'un alvéole MA-VL (colis non contaminés) ou du quartier pilote HA (colis contaminés par des produits d'activation de l'acier) non fermés (sous cocon, le cas échéant), remontée de tous les colis stockés en raison de la non poursuite du projet suite à la phase pilote, réouverture des galeries et des alvéoles puis retrait et expédition d'une famille de colis MA-VL ou des colis du quartier pilote HA ;
 - la gestion post-accidentelle : retrait d'un colis MA-VL ou HA contaminé « manutentionnable ».

Pour ces scénarios, l'Andra présente essentiellement une esquisse des moyens techniques envisagés et indique que la démonstration de sûreté serait présentée, le cas échéant, si une telle décision venait à être prise.

L'examen de l'IRSN porte sur (i) la robustesse et la durabilité des principaux composants du stockage (colis, alvéoles et équipements liés à la récupérabilité), (ii) les dispositions conservatoires prises lors de la construction des ouvrages et de l'exploitation afin de faciliter les opérations de retrait (comprenant les dispositions de surveillance), (iii) les scénarios de retrait retenus par l'Andra et (iv) les essais de retrait réalisés et prévus par l'Andra au stade du DDAC.

Robustesse et durabilité des composants

L'Andra présente dans le DDAC les éléments de justification de la robustesse et de la durabilité des colis et alvéoles de stockage [139].

S'agissant des alvéoles MA-VL, l'Andra indique que les essais relatifs aux colis de stockage sont à un stade avancé mais ne détaille pas le programme prévu pour qualifier les conteneurs sur une durée séculaire. L'IRSN rappelle à cet égard que le programme de qualification de ces conteneurs, considérés comme des EIP inaccessibles durant la phase de fonctionnement, doit être transmis par l'Andra (cf. engagement 2024-E21). Par ailleurs, la stabilité de l'alvéole est assurée par un revêtement dont la durabilité est examinée aux chapitres 4.1 et 6.5 du présent rapport.

S'agissant des alvéoles HA, l'Andra identifie la possibilité que la corrosion des matériaux métalliques constitue un obstacle au retrait des colis. Dans ce cadre, le DDAC présente des simulations numériques visant à conforter le dimensionnement des composants métalliques. D'une part, l'Andra a vérifié [39] la résistance mécanique des composants (patins en céramique, interface de préhension, zone de soudure entre le conteneur et son couvercle) à la traction exercée par le robot de retrait (cf. chapitre 4.2.2.1). D'autre part, l'Andra a étudié [39] le risque de flambement du chemisage soumis à une corrosion généralisée et à la sollicitation mécanique du Callovo-Oxfordien [140][141]. L'Andra évalue ainsi une épaisseur critique équivalente de flambement

pénalisante comprise entre 14 mm et 18 mm aux jonctions entre les tronçons de chemisage qui serait atteinte après 350 ans en considérant une vitesse de corrosion moyenne de 10 µm/an pendant toute la période. L'Andra a précisé en cours d'instruction que des travaux complémentaires étaient en cours pour évaluer l'influence d'une corrosion généralisée hétérogène sur l'épaisseur critique de flambement et la durée nécessaire pour l'atteindre. L'IRSN considère que ces travaux permettront à l'Andra d'évaluer l'influence d'un ou plusieurs défauts sur le processus de flambement mais rappelle [2] que les dispositions techniques présentées par l'Andra au stade du DDAC pour les alvéoles de stockage HA (géométrie et formulation du MREA) ne permettent pas d'exclure la possibilité de phénomènes de corrosion localisés (piqûration et/ou corrosion sous dépôt, corrosion sous contrainte) répétés sur plusieurs zones de la surface du chemisage. **Ainsi, il appartiendra à l'Andra de réévaluer ces conclusions à la lumière des résultats qui seront obtenus dans le cadre de son programme de travaux prévu en réponse à son engagement 2024-E12.**

Principales dispositions conservatoires prises pour le retrait

Les principales dispositions conservatoires prévues par l'Andra à ce stade concernent (i) les capacités d'entreposage nécessaires en surface, (ii) les dispositifs de retrait de colis, (iii) les dispositions prises pour pouvoir ramener en surface un colis HA supposé contaminé et (iv) les dispositions de surveillance liées à la récupérabilité.

L'Andra indique que les capacités d'entreposage nécessaires en surface dépendent directement des scénarios de retrait considérés. Les espaces d'entreposage au sein des bâtiments EP1 et EP2 ne pouvant accueillir qu'un nombre limité de colis retirés, l'Andra indique que des emprises foncières sont prévues en zone descendrière pour construire les bâtiments qui seraient nécessaires. L'Andra ne prévoit donc pas d'entreposage pérenne pour accueillir, parmi les installations de surface de Cigéo, un grand nombre de colis retirés [42]. **L'IRSN convient que les capacités d'entreposage en surface doivent être dimensionnées en premier lieu pour les scénarios de retrait d'exploitation et que la décision d'augmenter ces capacités pour la gestion de scénarios hypothétiques le cas échéant pourra être prise en temps voulu.** A cet égard, l'IRSN rappelle qu'il s'interroge sur la suffisance du nombre d'emplacements dans la zone tampon (cf. chapitre 5.2.3 du présent rapport).

Concernant les dispositifs de retrait de colis MA-VL, l'Andra retient, comme au DOS, un pont stockeur muni de fourches spécifiques capables de s'adapter pour reprendre un colis qui aurait subi une rotation d'une dizaine de degrés. En outre, l'Andra prévoit un espace réservé en cellule de manutention pour d'éventuels robots de contrôle et/ou de fixation de la contamination, qui seraient mis en place dans le cas d'un retrait hypothétique d'un colis contaminé, pour contrôler par frottis le colis retiré et le traiter par pulvérisation d'un vernis, avant de le remonter en surface vers le bâtiment EP1. L'IRSN relève que la mise en œuvre de ces dispositions n'est pas prévue dans le cadre des scénarios de retrait d'exploitation. Or, comme au stade du DOS [26], l'IRSN estime que cette opération, qui permettrait de préserver la propreté radiologique de la hotte et des locaux amenés à recevoir le colis de stockage, devrait également être prévue pour ce type de scénarios, dans la mesure où l'absence de contamination anormale d'un colis MA-VL ne peut être garantie (atmosphère susceptible d'être contaminée au sein de l'alvéole MA-VL, stockage de colis MA-VL anciens susceptibles d'être contaminés...). **Par conséquent, l'IRSN considère qu'une bonne pratique pourrait consister à prévoir un contrôle et le cas échéant la fixation d'une éventuelle contamination en cellule de manutention avant chaque retrait de colis.**

Concernant les dispositifs de retrait des colis HA, leur retrait depuis leur position de stockage jusqu'à la tête d'alvéole se fait par un robot de retrait spécifiquement conçu. Pour éviter le blocage d'un colis lors de ces opérations de retrait, l'Andra développe [84] un système de nettoyage de l'alvéole par brossage et raclage de l'intrados du chemisage pouvant collecter les produits de corrosion dans un cendrier disposé en galerie au niveau de la hotte du robot de nettoyage. Par ailleurs, compte tenu du dimensionnement de la tête de préhension, de la faible puissance du robot de retrait, de la vitesse limitée du colis en mouvement ainsi que du limiteur de couple associés à la robustesse des colis HA, l'Andra exclut le risque d'endommagement du colis HA par traction excessive. **L'IRSN convient du bien-fondé des principes de conception du robot de retrait et de l'interface de préhension du colis mais rappelle que des essais devraient être réalisés par l'Andra afin de vérifier que la zone soudée de la gorge de préhension conserve bien des propriétés mécaniques suffisantes après corrosion.**

Concernant les dispositions prises pour ramener en surface un colis HA supposé contaminé (cf. scénario hypothétique *infra*), l'Andra indique que les opérations consistent en trois étapes : (i) transfert du colis de l'alvéole vers la hotte, (ii) cheminement de la hotte vers la surface et (iii) transfert du colis de la hotte vers la cellule de mise en hotte du bâtiment EP1 (ou EP2).

Pour la première opération (transfert alvéole-hotte), l'Andra prévoit [139] la création d'une zone de confinement temporaire autour de l'alvéole concerné en mettant en place des sas, des filtres THE et en agissant sur la ventilation des galeries attenantes. La zone concernée est préalablement protégée avec du vinyle (sols, parois, équipements...) pour en faciliter une possible décontamination ultérieure. L'IRSN constate que l'Andra a vérifié l'adaptabilité du système de ventilation de l'installation pour créer cette zone de confinement dans les différentes configurations envisageables (alvéole du quartier pilote HA, alvéole du quartier de stockage HA, alvéole situé au fond d'une galerie d'accès...), **ce qui est satisfaisant**.

Pour la seconde opération (cheminement de la hotte vers la surface), l'Andra prévoit le confinement de la galerie d'accès à l'alvéole sur toute sa longueur (pour le quartier pilote HA) ou à l'échelle d'un module (pour le quartier de stockage HA) avec la mise en place de sas temporaires aux extrémités afin de permettre le contrôle et l'assainissement éventuel de la hotte avant que celle-ci ne rejoigne les autres galeries jusqu'à la surface [139]. L'Andra prévoit également d'étanchéifier la porte de la hotte ainsi que son intérieur avec du vinyle en vue d'une possible décontamination ultérieure. L'IRSN note que, mise à part la galerie d'accès ou les modules, les autres galeries (y compris les descenderies) ne sont pas confinées pour le transit de la hotte HA jusqu'à la surface. Même si la hotte HA est assainie en sortie de la zone confinée, l'IRSN rappelle qu'elle n'est pas conçue pour être étanche. A cet égard, l'IRSN estime que le vinyle ne permet pas de l'étanchéifier, mais vise principalement à faciliter les opérations de décontamination. Sa mise en place ne permet donc pas d'exclure un risque de contamination des ouvrages traversés par des aérosols remis en suspension dans la hotte. **L'IRSN estime que l'Andra pourrait présenter des dispositions conservatoires afin de justifier l'absence de contamination de l'ensemble des ouvrages souterrains parcourus par une hotte contenant un colis HA ayant perdu son confinement.**

Pour la troisième opération (transfert hotte-cellule), l'Andra prévoit d'utiliser un sas mobile placé par-dessus la hotte une fois celle-ci positionnée devant la façade d'accostage de la cellule et avant son ouverture. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

S'agissant enfin des dispositions de surveillance, l'Andra indique pour les alvéoles MA-VL qu'en complément du contrôle des conditions d'ambiance (température et hygrométrie), des moyens mobiles visant à contrôler l'état des colis de stockage seront mis en œuvre. A cet égard, l'IRSN rappelle que la faisabilité technique du suivi de l'état d'un colis de stockage MA-VL avec un dispositif mobile n'est pas démontrée à ce stade (cf. chapitre 4.2.2 relatif aux risques de dissémination). En outre, l'Andra prévoit également de s'appuyer sur la surveillance déportée en alvéole témoin pour le contrôle de la durabilité du revêtement de l'alvéole et du vieillissement du béton et de l'acier sur des colis fictifs. S'agissant des dispositions prévues pour les alvéoles HA, l'IRSN rappelle que la faisabilité du dispositif de prélèvement/inertage prévu par l'Andra n'a pas encore été montrée (cf. chapitre 4.3.2 relatif aux risques d'explosion) et que la surveillance par fibre optique de la température au sein d'un alvéole HA n'appelle pas de remarque particulière (cf. chapitre dissémination). En outre, l'Andra indique qu'un relevé géométrique sera réalisé pour établir la rectitude des alvéoles et mesurer le diamètre intérieur au moment de la recette de chaque alvéole, puis avant le stockage du premier colis (un alvéole pouvant rester en attente de chargement pendant une durée de l'ordre de 20 ans). Enfin, l'IRSN note que l'Andra prévoit, comme pour les alvéoles MA-VL, de s'appuyer sur une surveillance déportée en alvéole témoin, en particulier pour suivre la déformation du chemisage, selon des modalités qui restent à définir (cf. engagement 2024-E20).

Scénarios étudiés

L'IRSN note que les scénarios de retrait retenus par l'Andra intègrent désormais, conformément aux conclusions de l'examen du DOS, des scénarios de retrait hypothétique de colis de déchets HA « *contaminés par des produits d'activation de l'acier* », et des scénarios de retrait hypothétique « *sûreté/post-accidentel* » de colis MA-VL ou HA contaminé, **ce qui est satisfaisant**. De façon plus générale, l'IRSN estime que le choix des scénarios hypothétiques couvre de façon acceptable les différentes situations qui pourraient être rencontrées, en vue

d'identifier les dispositions conservatoires à mettre en place dès la conception, mais rappelle qu'une situation de contamination notable de l'installation souterraine devrait également être considérée, selon l'IRSN, afin d'identifier les moyens de gestion accidentelle et post-accidentelle associés (cf. Recommandation N°1, chapitre 3.6.1 du présent rapport). S'agissant des retraits d'exploitation, l'IRSN constate que, comme au stade du DOS, l'Andra préserve la possibilité de déplacer des colis dans d'autres alvéoles. Aussi, **l'IRSN estime que l'Andra pourrait préciser comment la disponibilité de cette capacité d'entreposage en alvéole MA-VL sera gérée au cours de l'exploitation.**

Parmi les scénarios de retrait hypothétiques de colis retenus, l'Andra considère des retraits après la fermeture partielle du stockage : alvéole MA-VL sous cocon (ventilé), alvéole HA fermé, quartier MA-VL fermé, quartier HA pilote fermé. Ces scénarios de réouverture de certaines parties du stockage impliquent, pour certains d'entre eux, le déblaiement de galeries et la déconstruction d'ouvrages de scellement. L'IRSN observe que ces travaux s'apparentent à des travaux de construction initiale (excavation, marinage, restauration de revêtements et de radiers...) qui, s'ils sont faisables, nécessitent des moyens lourds (i.e. des engins de chantier). Au regard de l'examen du risque d'explosion après la fermeture partielle des alvéoles (cf. chapitre 4.3.2), l'IRSN considère que la démonstration de faisabilité des scénarios hypothétiques de récupérabilité ne pose pas de difficulté majeure tant que les alvéoles ne sont pas fermés. Par contre, **concernant les alvéoles fermés (i.e. après arrêt de l'inertage des alvéoles HA ou de la ventilation des alvéoles MA-VL), le risque ATEX qui suit la fermeture n'est pas encore suffisamment maîtrisé à ce stade pour envisager leur réouverture de manière sûre.**

Essais de retrait

Au stade du DOS, l'Andra présentait des essais de retrait de colis factices MA-VL et HA sur bancs d'essai qui permettaient, selon l'IRSN, d'apporter une première réponse à l'efficacité des dispositions de retrait de colis de déchets [26]. L'Andra présentait aussi des essais à échelle 1 de retrait d'un conteneur de stockage d'un ouvrage représentant un chemisage d'alvéole HA au moyen d'un prototype de robot de retrait [39][142] dans des conditions sévères et représentatives de plusieurs dizaines d'années de stockage (brouillard salin, température de 100°C et hygrométrie saturée). Ces essais ont permis à l'Andra d'évaluer une épaisseur de corrosion de l'ordre du millimètre et de valider le principe d'un système de nettoyage du chemisage et de son mode opératoire (cf. partie ci-dessus). Au stade du DDAC, l'IRSN note que l'Andra a développé un système de nettoyage incluant la possibilité d'évacuer de l'alvéole HA les produits de corrosion susceptibles de gêner un retrait de colis, **ce qui est satisfaisant.**

L'Andra prévoit des tests supplémentaires en inactif puis en actif au cours de la phase pilote, dans le démonstrateur du quartier pilote HA puis dans les alvéoles courants, en vue de valider le processus de retrait jusqu'à la surface et de transfert vers un autre alvéole HA courant. À cet égard, l'Andra indique que les équipements de maintenance spécifiques au retrait prévus pour les alvéoles HA courants seront testés au cours de la phase pilote dans le démonstrateur du quartier pilote HA. Par ailleurs, l'Andra a testé la faisabilité technique de mise en place et de retrait de colis MA-VL à l'aide d'un prototype de pont stockeur. L'Andra a néanmoins précisé au cours de l'instruction que le démonstrateur d'alvéole MA-VL de la phase pilote ne sera pas équipé de moyens de maintenance de colis et que par conséquent, les moyens de retrait, notamment le système à fourches télescopiques en conditions de stockage, seront testés directement dans chacun des 4 alvéoles de la tranche 1 au cours de la phase pilote, en inactif puis en actif. **L'IRSN considère que la mise en œuvre par l'Andra d'un programme d'essais de retrait progressif (inactif puis actif) dans les alvéoles de la phase pilote est satisfaisant.**

6.5. Flexibilité et adaptabilité

6.5.1. Flexibilité

Dans le DDAC [78], l'Andra indique que la flexibilité de Cigéo se définit comme sa capacité à permettre des variations liées à l'inventaire de référence (telles que des évolutions du nombre, du conditionnement ou des modes de stockage de colis primaires), des modifications des chroniques de livraison, ou encore des changements de stratégie de fermeture. Elle ajoute que le déploiement progressif de l'installation contribue à

sa flexibilité, avec la possibilité d'intégrer les progrès technologiques, les évolutions de connaissances ou de potentielles modifications d'exploitation.

S'agissant de la flexibilité relative aux évolutions de l'inventaire de référence, l'Andra indique disposer de marges intégrées à l'évaluation des nombres de colis primaires de l'inventaire de référence (cf. Annexe T3), de grandeurs caractéristiques¹⁷² couvrant la diversité des colis, de conteneurs de stockage pour l'ensemble des colis primaires (y compris ceux au cas où des colis primaires actuellement prévus en stockage direct devraient être placés en conteneurs de stockage), ou encore de possibilités de co-stockage de colis MA-VL (voir chapitre 2.4.2 du présent rapport) et de création de 4 alvéoles MA-VL supplémentaires dans la « boucle » dite MA-VL (galerie de liaison entourant le quartier MA-VL et premier ouvrage construit de ce quartier), au-delà des 22 alvéoles initialement prévus. En outre, l'Andra précise que les deux options relatives au stockage des déchets bitumés (stockage en l'état ou traitement pour neutraliser la réactivité, cf. chapitre 4.3.1.5) sont prises en compte dans le DDAC au titre de la flexibilité. Pour la flexibilité relative aux chroniques de livraison des colis, l'Andra indique que les opérations liées aux procédés nucléaires dans l'INB sont en mesure de s'adapter à des évolutions de livraison, notamment grâce (i) aux capacités de la zone de réception des emballages de transport et de l'entreposage tampon dans le bâtiment EP1, dans la limite toutefois des flux admissibles dans les installations¹⁷³ et (ii) au dimensionnement de ces procédés au niveau des alvéoles de stockage (ventilation et/ou protections radiologiques suffisantes, etc.). L'Andra précise qu'un changement au cours du remplissage d'un alvéole, qui modifierait tout ou partie de l'inventaire des colis prévus pour le remplissage de cet alvéole, nécessiterait en amont une analyse de son impact sur l'organisation globale de l'exploitation, en tenant compte des règles de co-stockage.

L'IRSN convient que les leviers mentionnés par l'Andra concourent au caractère flexible de l'installation Cigéo, tant que les spécifications d'acceptation des colis et le domaine de fonctionnement de l'installation peuvent être respectés. S'agissant de l'inventaire de référence, l'IRSN rappelle, comme indiqué dans son rapport d'expertise du GP1 [2], que les marges retenues pour l'évaluation du nombre de colis correspondent à celles fournies par les producteurs des déchets, sans analyse complémentaire par l'Andra de leur caractère enveloppe, et qu'elles ne couvrent pas nécessairement les incertitudes sur les modes de conditionnement. Par exemple, les hypothèses retenues par l'Andra pour la famille COG-430 (boues de STE2) dans l'inventaire de référence sont associées à un mode de conditionnement, abandonné par le producteur, qui intégrait une étape de compactage. Le recours à des procédés de conditionnement avec des taux d'incorporation plus faibles, comme la cimentation, pourrait conduire à la production de quelques dizaines de milliers de colis primaires. A cet égard, l'Andra s'est engagée, à l'issue du GP1, à quantifier les incertitudes, notamment en termes de conditionnement, pouvant impacter le nombre et le volume de colis primaires (cf. engagement 2024-E2). L'IRSN estime, au vu des incertitudes mises en évidence pour la famille COG-430, qu'une évolution de leur conditionnement pourrait conduire, à elle seule, à occuper une part importante des 4 alvéoles supplémentaires dédiés à la flexibilité du quartier MA-VL. Par ailleurs, l'Andra considère que le niveau de flexibilité vis-à-vis des types de colis MA-VL ou de leurs chroniques de livraison est maximal tant que les aménagements internes ne sont pas réalisés et que leur déploiement progressif permet des optimisations relatives à leur nombre et à leur longueur, ce dont l'IRSN convient. L'IRSN observe toutefois que l'augmentation éventuelle de la longueur de l'ensemble des alvéoles MA-VL nécessite une modification de l'emprise de la boucle MA-VL et doit être identifiée avant la construction initiale. **Aussi, l'IRSN considère que le niveau de flexibilité de Cigéo pourrait s'avérer insuffisant vis-à-vis de l'inventaire de référence des colis MA-VL, dont la gestion nécessiterait alors de compléter l'architecture de référence de Cigéo une fois construite.** A cet égard, l'IRSN observe que l'Andra envisage, au titre de l'adaptabilité aux inventaires de réserve, 4 alvéoles MA-VL dans une autre boucle, dite FA-VL. Néanmoins, cette option pourrait contraindre la stratégie de fermeture

¹⁷² En exploitation, les grandeurs caractéristiques des colis primaires de l'inventaire de référence, utilisées notamment par l'Andra pour dimensionner Cigéo, sont définies par type de colis de stockage, au regard des fonctions suivantes : protéger les personnes contre l'exposition aux rayonnements ionisants (inventaire radiologique), confiner les substances radioactives (LDCA), maîtriser le risque de criticité (masse de MF), évacuer la puissance thermique des déchets (puissance thermique) et évacuer les gaz formés par radiolyse ou par corrosion (débit d'hydrogène) [40].

¹⁷³ 500 déchargements d'ET par an dans EP1 ; 400 colis de stockage pour le quartier pilote HA par an ; 1 100 colis de stockage MA-VL par an.

des alvéoles de la boucle MA-VL en raison de galeries communes aux deux boucles (cf. chapitre 6.5.2 ci-après relatif à l'adaptabilité de Cigéo).

Par ailleurs, s'agissant du caractère progressif du déploiement de Cigéo, l'IRSN convient que cette spécificité concourt par nature à la flexibilité de l'installation, en termes de possibilités d'intégration de nouvelles connaissances, de progrès technologiques et d'évolutions de l'exploitation. A cet égard, l'IRSN rappelle par exemple la nécessaire prise en compte des effets potentiels du changement climatique, qui a fait l'objet de l'engagement 2024-E8 pris par l'Andra à l'issue de l'expertise GP1, visant notamment à suivre l'évolution des connaissances sur le sujet et à identifier des éléments relatifs à la capacité d'adaptation de l'installation afin d'assurer une protection face à des niveaux d'aléas susceptibles d'évoluer. En outre, l'IRSN note que l'Andra envisage la création d'un puits supplémentaire dans le cadre des opérations de fermeture (cf. chapitre 6.3). L'IRSN estime que ce puits pourrait s'avérer également utile, au cours de la phase de fonctionnement de Cigéo, vis-à-vis par exemple de l'efficacité de l'intervention en situations d'incendie (cf. engagement 2024-E35 au chapitre 4.3.1.4). Si un puits supplémentaire n'est néanmoins pas considéré justifié avant le début des opérations de creusement (cf. engagement 2024-E56 du chapitre 6.3.2), des dispositions pour préserver la possibilité de cette option, par exemple l'identification et la conservation de la mémoire de localisations possibles pour son implantation, pourraient être prises pour ne pas l'obérer ultérieurement en faveur d'une autre évolution d'architecture, sans en avoir analysé les pertinences respectives. Par ailleurs, en lien avec son expertise des contrôles des colis et de la gestion des écarts (cf. chapitre 5.2 du présent rapport), l'IRSN souligne le bénéfice qui pourrait être tiré de l'anticipation de futurs besoins d'exploitation, en conférant un caractère modulaire à certaines zones du bâtiment EP1, comme les différentes zones d'entreposage afin d'en augmenter plus facilement la capacité, ou la zone de contrôles hors flux (ajout de cellules ou modifications de l'agencement de cellules) afin d'intégrer de nouveaux contrôles rendus possibles par les évolutions des techniques de mesure.

En revanche, l'IRSN observe que certains choix peuvent conduire à réduire le niveau de flexibilité de l'installation vis-à-vis de nouvelles connaissances ou de progrès technologiques. Par exemple, comme indiqué au chapitre 3.5 ci-avant, la surveillance des alvéoles MA-VL déportée en un unique alvéole témoin, qui pourrait de plus être le démonstrateur MA-VL (premier alvéole MA-VL construit à des fins de démonstration), contraint, pour des raisons de représentativité, la construction et la conception des alvéoles MA-VL de la phase pilote, puis celles des tranches ultérieures si d'autres témoins ne sont pas mis en place. D'autres orientations qui concourent intrinsèquement à la flexibilité, comme celle de la possibilité de changement de stratégie de fermeture, pourraient impacter le fonctionnement (mise en stockage) lorsqu'une option sera retenue, comme décrit aux chapitres 4.3.5 et 6.3 du présent rapport relatifs à la coactivité et aux opérations de fermeture.

Ainsi, le déploiement de Cigéo implique des choix techniques, qui vont nécessairement impacter son niveau de flexibilité, dans un sens ou dans l'autre, à des degrés plus ou moins importants. L'IRSN estime que ces choix doivent être fondés sur des analyses d'ensemble, multicritères (sûreté en exploitation et après fermeture, impact sur le service industriel, flexibilité/progressivité, optimisation technico-économique...), afin d'éclairer leurs impacts sur la poursuite de l'exploitation et sur la sûreté du stockage après sa fermeture. De manière plus générale, l'IRSN considère que l'architecture et la conception de référence ainsi que les procédés d'exploitation considérés au stade du DDAC feront, sans préjuger de leur bien-fondé à ce stade, très vraisemblablement l'objet d'évolutions notables au cours de la phase d'exploitation. **A ce titre, le principe de flexibilité retenu par l'Andra doit constituer une caractéristique fondamentale du déploiement de l'installation afin de préserver la capacité d'une gestion sûre des déchets HA et MA-VL de l'inventaire de référence. La mise en œuvre de ce principe doit être associée à des dispositions organisationnelles et matérielles concrètes, visant à assurer la faisabilité des options envisagées et la prise en compte des besoins prévisibles.** A cet égard, l'IRSN estime qu'il importe de porter une attention particulière à la maîtrise des risques en exploitation qui sont sensibles aux dimensions spatiales (par exemple, dissémination, intervention en cas d'incendie) et temporelles (par exemple, vieillissement des composants), ainsi qu'à l'absence d'incidence significative sur la sûreté à long terme (par exemple, puits supplémentaire). **Ainsi, l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, pour la prochaine révision du rapport de sûreté, les dispositions organisationnelles et matérielles prises pour s'assurer du caractère flexible de Cigéo.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E59](#) de la lettre CG-AMOA-LET-24-0033 appelée

en annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant. En tout état de cause, l'IRSN estime que le caractère flexible de Cigéo est essentiel à sa sûreté et mérite d'être approfondi, de manière spécifique, dans les prochaines révisions du rapport de sûreté.

6.5.2. Adaptabilité

L'ASN a demandé à l'Andra, s'agissant de l'adaptabilité de Cigéo, de « justifier qu'il n'y a pas d'élément rédhibitoire au stockage des déchets de [l']inventaire de réserve » [28]. Les études et justifications, jointes au DDAC, 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 ». L'IRSN rappelle qu'une modification du décret d'autorisation de Cigéo, sur la base notamment d'une démonstration de sûreté, serait nécessaire dans le cas où il serait envisagé d'y stocker tout ou partie des déchets de l'inventaire de réserve.

Pour rappel [2], l'inventaire de réserve présenté dans le DDAC intègre des colis primaires HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (scénario SR1), des combustibles usés (CU) non recyclés (scénario SNR enveloppe) provenant d'EDF et du CEA et des colis de déchets FA-VL (principalement des déchets de graphite, des déchets issus du traitement de combustibles UNGG et des déchets bitumés) pour intégrer les incertitudes liées à la mise en place d'une filière de gestion dédiée aux déchets FA-VL. L'inventaire de réserve « augmenté » intègre quant à lui les déchets issus du projet NNF (mise en service de six EPR2) et d'un prolongement de l'exploitation de l'ensemble du parc actuel à 60 ans. Il s'agit, selon les stratégies de recyclage, de déchets HA et MA-VL (scénario « SR1 augmenté ») ou de CU (scénario « SNR enveloppe augmenté »). L'IRSN rappelle que ces déchets ne sont pas intégrés par l'Andra à l'inventaire de réserve transmis dans le DDAC, mais qu'ils seront intégrés dans sa mise à jour avant l'enquête publique.

L'expertise par l'IRSN des données réunies par l'Andra relatives aux déchets de l'inventaire de réserve (connaissances des colis primaires, inventaire radiologique, etc.), réalisée dans le cadre du GP1, a conclu à leur caractère suffisant pour fonder les études d'adaptabilité. Pour les déchets de l'inventaire de réserve augmenté, l'IRSN a estimé que l'évaluation préliminaire des volumes et des caractéristiques de ces déchets nécessitait une mise à jour sur la base des données apportées par les producteurs de déchets. L'IRSN a également relevé que les déchets des huit EPR2 en option, ainsi que des réacteurs SMR en projet ne sont pas pris en compte dans l'inventaire de réserve augmenté.

Le présent chapitre porte sur les éléments joints par l'Andra au DDAC, au titre de l'adaptabilité, relatifs aux évolutions possibles de la conception de Cigéo en cas de stockage de colis des inventaires de réserve, à l'analyse préliminaire des risques associés et à l'allongement de la durée de fonctionnement de Cigéo.

6.5.2.1. Evolutions de conception de Cigéo

Les modifications de conception de Cigéo envisagées par l'Andra [143][144] pour, le cas échéant, prendre en charge des déchets des inventaires de réserve, concernent les installations de surface et/ou l'installation souterraine. S'agissant du stockage des colis de déchets HA et MA-VL supplémentaires, qui présentent les mêmes caractéristiques que les colis de l'inventaire de référence, l'Andra n'envisage pas de modification des bâtiments de surface, ni du procédé de stockage des colis, mais prévoit si nécessaire leur stockage dans des alvéoles supplémentaires¹⁷⁴ ainsi qu'un possible allongement des galeries d'accès du quartier HA. S'agissant du stockage des CU (cf. Annexe T21), dont les colis de stockage sont de conception similaire aux HA, l'Andra prévoit leur prise en charge au sein d'un « bâtiment EP2 mutualisé », commun aux déchets HA et aux CU, un concept de hotte de transfert adapté aux caractéristiques radiologiques et thermiques des CU, une modification du procédé de transfert de la hotte en raison de son gabarit plus important, ainsi qu'un stockage dans un quartier dédié, dit quartier de stockage CU, de conception similaire au quartier de stockage HA (cf. Figure 31) avec des galeries et des alvéoles adaptés aux CU (dimensions et puissance thermique notamment). S'agissant enfin de la prise en charge des déchets FA-VL, dont les caractéristiques sont proches de déchets MA-VL, l'Andra estime que leur

¹⁷⁴ S'agissant des déchets MA-VL, l'Andra prévoit actuellement de construire 22 alvéoles pour le stockage des colis MA-VL de l'inventaire de référence, auxquelles pourraient s'ajouter, dans la même boucle, 4 alvéoles au titre la flexibilité. Par ailleurs, l'Andra prévoit, au titre de l'adaptabilité, de construire dans une autre boucle 14 alvéoles pour le stockage des colis FA-VL et 4 alvéoles pour des colis MA-VL du scénario SR1 augmenté.

gestion depuis les installations de surface jusqu'au transfert en hotte pourrait être réalisé avec les mêmes équipements que les colis MA-VL, avec des adaptations liées aux masses et dimensions particulières des CS4-graphite et CBFK-B (installation d'une cloche de plus grande dimension et d'un pont roulant d'une capacité adaptée). L'Andra envisage de stocker les colis FA-VL dans 14 alvéoles, en extension de la zone de stockage MA-VL vers l'est (cf. Figure 32). Les évolutions de conception envisagées en cas de stockage de déchets HA et MA-VL supplémentaires ou de déchets FA-VL et de CU, telles que décrites ci-avant, appellent les remarques suivantes.

En premier lieu, s'agissant de l'évolution de l'architecture de Cigéo liée au quartier FA-VL, l'IRSN constate que l'Andra envisage, au stade du DDAC, la fermeture du quartier MA-VL et notamment de ses galeries d'accès, à l'horizon 2100. Toutefois, l'IRSN estime que certains déchets nécessitant d'être stockés, au titre de l'adaptabilité, dans le quartier MA-VL ou dans le quartier FA-VL pourraient ne pas être livrés à Cigéo avant cette échéance (par exemple, les colis CSD-C issus du retraitement des derniers combustibles chargés dans les EPR2 ou les colis C1PG^{SP} issus de leur démantèlement, ou encore des colis FA-VL). Dès lors, l'IRSN considère que le stockage des déchets FA-VL et des colis MA-VL de l'inventaire de réserve augmenté pourrait ne pas être compatible avec le scénario prévisionnel retenu à ce stade en référence par l'Andra pour la fermeture du quartier MA-VL.

En second lieu, l'IRSN considère que ses conclusions relatives à la faisabilité des alvéoles HA tels que conçus actuellement sont, de manière générale, transposables aux alvéoles de stockage de CU puisque de conception similaire, ainsi que celles relatives à la démonstration de sûreté du stockage des déchets MA-VL vis-à-vis des déchets FA-VL. **Il appartiendra donc à l'Andra de tenir compte, dans les prochaines étapes du projet, des éventuelles évolutions de la conception de référence dans ses études d'adaptabilité.**



Figure 31. Illustration du quartier de CU de l'inventaire de réserve [144].

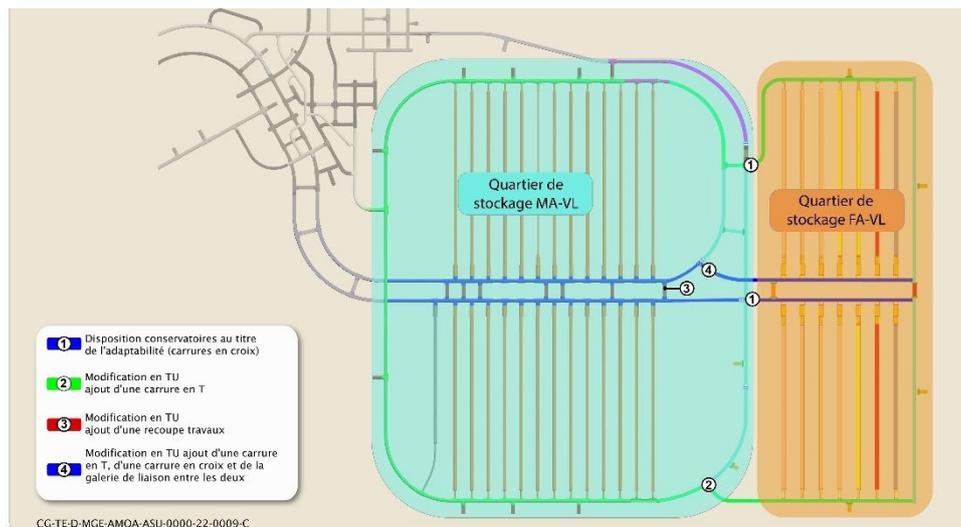


Figure 32. Illustration du quartier de stockage des déchets FA-VL de l'inventaire de réserve [144].

De manière plus générale, les dispositions que l'Andra pourrait mettre en œuvre dans le cadre de l'adaptabilité, tout comme de la flexibilité, nécessitent d'être anticipées afin d'assurer leur compatibilité avec le déploiement de l'installation, certains choix de conception, de construction initiale ou d'exploitation pouvant impacter les niveaux de flexibilité et d'adaptabilité futurs. Or, l'IRSN constate que Andra n'a pas identifié, à ce stade, les étapes clés du déploiement progressif de Cigéo susceptibles de limiter les possibilités d'évolution de l'installation. **Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra présenter, pour la prochaine révision du rapport de sûreté, les évolutions du niveau de flexibilité et d'adaptabilité au regard des étapes possibles du déploiement de l'installation.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E59](#) de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 rappelée en annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

6.5.2.2. Analyse préliminaire de sûreté durant la phase d'exploitation

L'Andra présente dans le DDAC une analyse préliminaire des risques liés au stockage des déchets de l'inventaire de réserve. Pour la sûreté en fonctionnement, cette analyse porte sur les risques internes nucléaires (dissémination, exposition des travailleurs, criticité, dégagement thermique), sur les risques liés aux agressions internes (notamment manutention, incendie, explosion, pyrophoricité) et externes (notamment séisme, aléas météorologiques), ainsi que sur les risques liés à la coactivité. Cette analyse a pour objectif de montrer que la mise en œuvre des évolutions de conception identifiées ci-avant et la mise en stockage des colis de l'inventaire de réserve ne remettraient pas en cause la sûreté du stockage. Etant données les similitudes entre les colis de déchets MA-VL et HA des inventaires de référence et de réserve, l'examen par l'IRSN de cette analyse préliminaire ne porte que sur les CU et les déchets FA-VL, et se base sur les études d'adaptabilité jointes au DDAC [143][144] complétées, pour les CU, par les éléments transmis au cours de l'instruction relatifs aux caractéristiques des colis de l'inventaire de réserve augmenté.

Prise en charge des colis de CU

Pour ce qui concerne la prise en charge de colis de CU, l'analyse préliminaire par l'Andra des risques liés à l'exposition des travailleurs, au dégagement thermique, à la coactivité, à la manutention, au séisme et aux aléas météorologiques **n'appelle pas de commentaire particulier de l'IRSN**, outre ses conclusions relatives à l'inventaire de référence (cf. chapitre 4 du présent rapport), étant données les similitudes entre les colis de déchets HA et de CU ainsi que le caractère préliminaire de l'analyse pour les inventaires de réserve.

S'agissant du risque de criticité en alvéole de stockage, l'Andra a réalisé une analyse de sûreté-criticité en considérant des hypothèses spécifiques aux CU (configurations, milieux fissiles de référence, etc.). En particulier, dans ses études de criticité, l'Andra retient pour les différents types de CU des MFR spécifiques (assemblages de plaques, aiguilles ou crayons gainés, boîtes de matières sous forme « vrac » constitués d'oxydes, carbures ou métaux...), **que l'IRSN considère pertinents** notamment en termes de dimensions ou de compositions

isotopiques. Au cours de l’instruction, l’Andra a indiqué que les analyses relatives aux CU en exploitation peuvent être complétées en s’appuyant sur les études des CU après fermeture. A partir de l’examen de ces études, l’IRSN constate une modération quelconque¹⁷⁵ par de l’eau, quels que soient les types de CU et les situations traitées (scénario d’évolution normale ou altérée), et que les critères d’admissibilité (identiques à ceux retenus pour l’inventaire de référence, soit $k_{\text{eff}} \leq 0,95$ en conditions normales et 0,97 en situations anormales) sont, dans le cas général, respectés. L’IRSN considère que ces études sont globalement satisfaisantes, mais appellent les remarques suivantes. En premier lieu, l’IRSN relève que l’Andra ne tient pas compte dans ses études en conditions normales de l’absence éventuelle d’une partie des crayons (CU de types REP URE¹⁷⁶ et MOX) ou des aiguilles (CU de type Superphénix), correspondant par exemple aux cas de retrait de crayons ruptés, et qu’elle ne présente pas d’étude prenant en compte les CU issus de la propulsion navale. En second lieu, pour des conditions pouvant relever, selon l’IRSN, de la phase d’exploitation, l’IRSN note que les études d’une ruine partielle des MF ou de la déformation des assemblages, présentées par l’Andra pour certains CU (dont les CU REP URE), ne sont pas prises en compte pour d’autres types de CU qu’elles pourraient concerner (CU REP MOX et Superphénix) et estime qu’il serait également pertinent de les étudier ou, à défaut, de montrer qu’elles peuvent être exclues. Enfin, pour les CU REP URE, les situations de corrosion des gaines des crayons ou de l’épaisseur d’acier du conteneur primaire, ou de ruine partielle des crayons, conduisent d’après les calculs de l’Andra à des k_{eff} inférieurs à 1, mais supérieurs à 0,97 (critère d’admissibilité retenu en situations anormales en phase d’exploitation). **Par conséquent, dans l’objectif de justifier l’absence de point rédhibitoire au stockage des CU, il appartiendra à l’Andra d’approfondir, lors des prochaines mises à jour des études d’adaptabilité, son analyse de la sûreté-criticité du stockage des CU en alvéole en tenant compte des remarques formulées ci-avant.** En surface (bâtiment EP2 mutualisé), les CU seront mis en conteneurs étanches. A cet égard, l’Andra prévoit de mettre en place des dispositions pour détecter et éteindre un incendie de façon à ne pas remettre en cause cette étanchéité. **Il n’apparaît donc pas, à ce stade, de point rédhibitoire concernant la prise en charge des CU en surface, du point de vue de la sûreté-criticité,** même si l’analyse de sûreté-criticité prévoit d’éventuelles limites de modération pour certains types de CU et d’éventuelles dispositions associées telles que le maintien de l’installation de surface hors d’eau si cela s’avère nécessaire.

S’agissant du risque de dissémination de substances radioactives, l’Andra indique que l’exploitation du quartier de stockage CU nécessite des débits de ventilation plus importants que celle du quartier de stockage des déchets HA de l’inventaire de référence, en raison notamment de l’extension de la zone de stockage HA/CU et donc de l’augmentation du volume des galeries à ventiler, qui conduit à une augmentation de la perte de charge à l’extraction. Au cours de l’instruction, l’Andra a précisé qu’une augmentation du débit de ventilation de l’ordre de 60 % par rapport à celui du quartier HA de l’inventaire de référence serait nécessaire, ce qui correspond à une augmentation de 15 % du débit maximal de l’installation souterraine et ne constitue pas un point rédhibitoire d’après l’Andra. En effet, une telle augmentation de débit pourrait être mise en œuvre, au cours de l’exploitation, par exemple par une augmentation de la section de retour d’air et/ou un réaménagement de la ZSLE en déplaçant certains équipements afin de minimiser les pertes de charge. A cet égard, l’IRSN rappelle que l’Andra n’a pas défini de stratégie pour l’ajustement des débits de ventilation en fonction de l’évolution de l’architecture de la ventilation nucléaire de Cigéo dans le cadre du stockage de l’inventaire de référence, ce qui fait l’objet de l’engagement 2024-E24 (cf. chapitre 4.2.2). **Selon la même logique, il appartiendra à l’Andra de montrer la faisabilité de l’ajustement des débits de ventilation nécessaires pour les besoins prévisionnels du quartier de stockage CU.** En outre, l’IRSN note que les grandeurs caractéristiques des colis de stockage HA de l’inventaire de référence utilisées pour dimensionner la ventilation des ouvrages souterrains et des LSF (classement C1) sont du même ordre de grandeur que celles des colis de stockage CU, à l’exception des grandeurs retenues pour les situations accidentelles de choc ou de chute inférieure à la hauteur de qualification. Dans ces situations, les grandeurs caractéristiques des colis de stockage HA sont inférieures d’un ordre de grandeur¹⁷⁷ à celles des colis

¹⁷⁵ Tout niveau de modération est couvert (pas de contrôle de la modération ni de limite imposée).

¹⁷⁶ Les CU UNE sont couverts par les CU URE, étant donné qu’ils ont les mêmes dimensions et que l’enrichissement maximal des CU URE est supérieur à celui des CU UNE.

¹⁷⁷ La grandeur caractéristique « nbre LDCA.m³ » des colis de stockage de CU est d’au plus 140 et celle des colis de stockage HA est de 8,19.

de stockage CU. L'IRSN convient toutefois que cela ne remet pas en cause le classement C1 des ouvrages souterrains et les LSF.

Pour ce qui concerne la maîtrise du risque d'incendie, l'IRSN considère que l'extension de l'emprise du stockage et l'éloignement entre la ZSLE et les alvéoles, plus importants que dans le cas de l'architecture souterraine de référence, sont de nature à allonger les durées d'intervention. Sur ce point, l'IRSN attire l'attention sur l'éloignement entre les LSF et les alvéoles les plus éloignés de celles-ci, qui ne permet pas, d'ores et déjà pour l'architecture de référence, une intervention rapide et efficace en situation d'incendie (cf. chapitre 4.3.1 du présent rapport).

Par ailleurs, l'Andra a identifié un risque de pyrophoricité¹⁷⁸, pour une dizaine de familles de combustibles expérimentaux du CEA ou issus de la propulsion navale, dû à la présence de particules fines de métaux pyrophoriques (notamment, zircaloy ou uranium). Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué qu'elle confirmerait ou infirmerait ce risque, sur la base des travaux prévus par les producteurs de CU pour établir leur conditionnement. L'Andra prévoit de prendre en compte le risque de pyrophoricité dans les études d'adaptabilité ultérieures dès lors que des particules pyrophoriques suffisamment fines sont en présence d'oxygène et d'une source d'ignition (augmentation de la température ou choc) et, le cas échéant, de mettre en œuvre des dispositions de maîtrise de la température des CU et des opérations de manutention afin de limiter les chocs et à-coups lors des transferts. L'IRSN convient avec l'Andra que des éléments de connaissance supplémentaires de la part des producteurs sont nécessaires à la démonstration de la faisabilité de leur stockage dans des conditions sûres. L'IRSN rappelle que les matériaux réactifs, pouvant porter atteinte aux fonctions de sûreté du stockage, doivent être limités tant que possible, comme indiqué dans le guide ASN n°1 relatif au stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde [43]. **A ce titre, il appartiendra à l'Andra, pour les prochaines mises à jour de ses études d'adaptabilité, de présenter l'avancement des travaux relatifs à la maîtrise du risque de pyrophoricité (évolution des connaissances, traitement et conditionnement des CU, dispositions de maîtrise du risque le cas échéant).**

S'agissant enfin de l'impact radiologique lié à la prise en charge des CU sur la population, les doses efficaces estimées par l'Andra en fonctionnement normal et dégradé sont du même ordre de grandeur que celles associées au stockage de l'inventaire de référence. L'impact radiologique pour les situations accidentelles de dimensionnement est au plus de quelques dizaines de microsievverts (34 μ Sv pour un adulte à Saudron, en cas d'incendie dans un local du bâtiment EP2, à proximité d'un colis primaire de CU du CEA, sans perte de confinement). Pour les situations d'extension du dimensionnement, l'impact est d'au plus 1,2 μ Sv pour un enfant de 10 ans à Saudron, en cas de chute d'un colis primaire dans l'installation de surface avec perte de confinement. L'IRSN observe que ces impacts restent bien en dessous des objectifs de protection du public que l'Andra retient (cf. chapitre 3.7).

Aussi, au vu de l'ensemble de ces éléments, **l'IRSN n'identifie pas, à ce stade des études d'adaptabilité, de point rédhibitoire, lié à la sûreté pendant la période d'exploitation, spécifique au stockage des CU de l'inventaire de réserve et de l'inventaire de réserve augmenté. L'IRSN estime néanmoins qu'il appartiendra à l'Andra, pour les prochaines mises à jour des études d'adaptabilité, de tenir compte des points soulevés ci-avant relatifs à la gestion de la ventilation lors de la livraison d'une nouvelle zone nucléaire, aux risques de criticité et de pyrophoricité, ainsi qu'aux moyens d'intervention en situation d'incendie, outre ceux identifiés dans le présent rapport pour l'inventaire de référence et transposables aux inventaires de réserve.**

Prise en charge des déchets FA-VL

Les activités des radionucléides principaux contributeurs à l'irradiation dans les colis de déchets FA-VL sont inférieures d'au moins un ordre de grandeur à celles dans les colis MA-VL. De même, les masses de matière fissile dans les colis de déchets FA-VL sont au moins deux fois inférieures aux masses admissibles calculées par l'Andra pour les colis MA-VL de même géométrie et renfermant des contenus couverts par les mêmes hypothèses de sûreté-criticité (matrices, répartition des matières fissiles...). Par ailleurs, les puissances thermiques estimées

¹⁷⁸ Phénomène d'auto-inflammation de certaines matières constituant les CU lorsqu'elles sont soumises à un apport d'énergie.

pour les colis de déchets FA-VL sont inférieures d'un à deux ordres de grandeur à celles des colis MA-VL. Enfin, les débits de dégagement de gaz de radiolyse évalués pour les colis de déchets FA-VL sont couverts par les débits des colis MA-VL et les temps d'atteinte de la LIE évalués par l'Andra pour les alvéoles de stockage FA-VL sont supérieurs à ceux évalués pour les alvéoles MA-VL. Sur cette base, l'Andra conclut que les risques liés à l'exposition externe des travailleurs, à la criticité, au dégagement thermique et aux gaz de radiolyse sont couverts par les études de sûreté réalisées pour les colis MA-VL de l'inventaire de référence, **ce dont l'IRSN convient**.

S'agissant du risque de dissémination des substances radioactives, l'Andra indique que la création du quartier de stockage FA-VL au-delà du quartier de stockage MA-VL conduirait à une augmentation du débit de ventilation de l'ordre de 20 %. L'Andra précise avoir initié une étude confirmant, sur la base de calculs de perte de charge, la faisabilité de ventiler les 40 alvéoles de ces deux quartiers, sans modification par rapport à la conception de référence de Cigéo. De la même manière que pour le quartier CU, **il appartiendra à l'Andra de montrer la faisabilité de l'ajustement des débits de ventilation nécessaires pour les besoins prévisionnels du quartier FA-VL lors des prochaines mises à jour des études d'adaptabilité**. Par ailleurs, au sein des alvéoles FA-VL, l'Andra indique que les débits de ventilation doivent suffire à maintenir une contamination volumique potentielle en-deçà de l'objectif de 0,9 LDCA en fonctionnement normal, au même titre que les alvéoles MA-VL. L'Andra précise que les débits de ventilation requis pour les alvéoles de stockage FA-VL sont sensiblement équivalents à ceux des alvéoles de stockage MA-VL. Sur ce point, l'IRSN convient que la surface externe des colis de stockage MA-VL pris en compte pour dimensionner les débits des alvéoles est supérieure à celle des colis FA-VL, ce qui leur confère un caractère enveloppe au regard du risque de contamination engendré par léchage de la surface des colis.

Pour ce qui concerne la maîtrise du risque d'incendie, l'IRSN considère, au même titre que pour les CU, que l'extension de l'emprise du stockage est de nature à allonger les durées d'intervention. Ce point a fait l'objet d'un engagement de l'Andra pour l'architecture de référence (cf. chapitre 4.3.1 du présent rapport).

S'agissant enfin de l'impact radiologique sur la santé humaine, l'Andra indique que la prise en compte des colis FA-VL n'est pas susceptible de conduire à une hausse significative des impacts évalués pour l'inventaire de référence en fonctionnement normal et accidentel, **ce dont l'IRSN convient**.

Sur la base des éléments présentés par l'Andra, l'IRSN n'identifie pas, à ce stade des études d'adaptabilité, de point rédhitoire au stockage des déchets FA-VL. L'IRSN estime néanmoins qu'il appartiendra à l'Andra, pour les prochaines mises à jour des études d'adaptabilité, de tenir compte des points soulevés ci-avant relatifs à la gestion de la ventilation lors de la livraison d'une nouvelle zone nucléaire et à l'intervention en cas d'incendie, outre ceux identifiés dans le présent rapport pour l'inventaire de référence et transposables au stockage de déchets FA-VL.

6.5.2.3. Allongement de la durée de la phase de fonctionnement

Sur la base des chroniques de livraison présentées dans le DDAC, l'Andra estime que le stockage de l'inventaire de référence s'étend jusqu'en 2150 environ (stockage des colis MA-VL jusqu'en 2100 et stockage des colis HA de 2080 à 2150), soit une durée de l'ordre de 120 ans. En outre, l'Andra indique que le stockage des déchets issus des scénarios SR1 ou SNR enveloppe conduit à un allongement de cette durée de l'ordre de 10 ans, et que le stockage des déchets FA-VL conduit à un allongement de l'ordre de 18 ans. Pour ce qui concerne l'inventaire de réserve augmenté, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'elle estimait la date de réception du dernier colis autour de 2180. L'IRSN rappelle [2] que ces durées n'intègrent pas d'aléas dus par exemple à des difficultés d'exploitation de Cigéo ou d'installations productrices de déchets, ou encore de retards dans la mise en service de futurs réacteurs, et souligne qu'elles n'ont pas été actualisées suite au décalage de la mise en service actuellement à l'horizon 2050 annoncé au cours de l'instruction. En outre, des hypothèses plus conservatives que celles retenues par l'Andra vis-à-vis des évolutions de politique énergétique (par exemple, incertitudes relatives à la poursuite ou à l'arrêt du recyclage et au choix des combustibles chargés dans les EPR2), pourraient conduire, selon l'IRSN, à des dates de réception des derniers colis plus tardives, à horizon 2220. **Aussi, l'IRSN rappelle [2] que les durées de fonctionnement estimées par l'Andra pour l'inventaire de référence, mais également pour l'inventaire de réserve et l'inventaire de réserve augmenté, sont globalement très incertaines et vraisemblablement optimistes.**

En ce qui concerne les ouvrages souterrains, l'Andra indique que les descenderies, les puits et les zones de soutien logistique sont conçus pour une durée de 150 ans, les ouvrages de liaison ainsi que les alvéoles MA-VL pour une durée de 100 ans et les galeries d'accès aux alvéoles pour une durée de 50 ans. L'IRSN observe que l'allongement de la durée de fonctionnement découlant des éléments précités conduirait le cas échéant à prolonger la durée d'exploitation des ouvrages souterrains au-delà de ce qui est initialement prévu. A cet égard, l'Andra présente des dispositions générales pour garantir la durabilité des ouvrages (cf. chapitre 4.1), auxquelles s'ajoutent des possibilités de jouvence, l'ensemble permettant selon l'Andra de garantir une exploitation sûre pendant les durées initialement prévues et d'étendre ces durées si nécessaire. En ce qui concerne le génie civil des ouvrages de surface, l'Andra indique que des travaux de maintenance seront réalisables sur ces ouvrages, plus accessibles que les ouvrages souterrains, pour atteindre les exigences de durabilité nécessaires en cas d'extension de la durée de fonctionnement de Cigéo. Ces éléments confèrent un enjeu moindre aux ouvrages de surface vis-à-vis de l'allongement de la durée de fonctionnement de Cigéo. Aussi, l'examen par l'IRSN, présenté ci-après, porte uniquement sur la durabilité des ouvrages souterrains (vieillessement et comportement mécanique) ainsi que sur celle des équipements de l'ensemble de l'installation.

Les éléments ci-après relatifs au vieillissement des ouvrages et équipements s'appliquent indifféremment pour la conception de référence et celle liée aux études d'adaptabilité.

Vieillessement des ouvrages souterrains

S'agissant du vieillissement des ouvrages souterrains en béton armé, l'Andra considère que celui-ci est essentiellement corrélé à l'ouverture des fissures et à la carbonatation atmosphérique des bétons, principal agent corrosif des armatures métalliques. Ces phénomènes conduisent à des épaufures ou à des éclatements superficiels du béton ce qui, *in fine*, dégrade la résistance mécanique des ouvrages. L'Andra indique que la fissuration et la carbonatation du béton seront surveillées et que des travaux de jouvence seront possibles en cas de dégradation de composants du génie civil, à l'exception des alvéoles MA-VL qui ne sont pas accessibles. **L'IRSN convient que les dispositions de surveillance prévues par l'Andra (cf. Annexe T8) sont de nature à détecter d'éventuels effets néfastes du vieillissement et que dans ce cas, des travaux de jouvence en intrados des revêtements permettront de prolonger le maintien des performances du génie civil.** Pour ce qui concerne les ouvrages non accessibles, qui ne peuvent par conséquent pas faire l'objet de dispositions de maintenance et de contrôle, l'IRSN rappelle que la définition par l'Andra de la stratégie de qualification de ces ouvrages, sur laquelle repose le respect de leurs exigences de sûreté, est encore en cours. Cette stratégie (qualification et surveillance déportée des ouvrages non accessibles) fait l'objet de l'engagement 2024-E21 (cf. chapitre 3.4.2 du présent rapport).

S'agissant des risques de dégradation chimique des matériaux cimentaires, l'Andra estime que, compte tenu de la température modérée et stable de l'atmosphère à l'intrados des ouvrages d'une part, et des flux d'eau limités à l'extrados des revêtements d'autre part, ces risques sont réduits, ce qui concourt à la tenue dans le temps des ouvrages en béton sur les durées d'exploitation précitées. **Ces éléments n'appellent pas de remarque particulière de l'IRSN.**

S'agissant de l'étanchéité des têtes des LSF (puits et descenderies), ainsi que de celle du puits VVE sur toute sa hauteur jusqu'au COX, celle-ci est obtenue au moyen de plaques bitumineuses mises en place à l'extrados du revêtement pour les descenderies et d'une virole métallique d'environ 8 mm d'épaisseur implantée dans le revêtement béton pour les puits. En tête des LSF, cette étanchéité est requise pour limiter les perturbations sur la nappe phréatique et les venues d'eau dans l'installation souterraine, et dans le cas particulier du puits VVE, pour éviter le risque de dissémination d'éléments radioactifs en cas de situation incidentelle/accidentelle. L'IRSN convient que le pH élevé d'un milieu cimentaire peut être favorable à la durabilité d'une virole métallique mais constate que cette virole ne sera pas facilement accessible pour des opérations de surveillance ou de maintenance depuis l'intrados des ouvrages. **L'IRSN estime par conséquent qu'il appartiendra à l'Andra de préciser les dispositions de surveillance et d'intervention, avant la construction des liaisons surface-fond, pour maintenir l'étanchéité des têtes des LSF et du puits VVE.**

Comportement mécanique des ouvrages souterrains

S'agissant du comportement mécanique des revêtements en béton, l'Andra a modélisé l'évolution sur 300 ans de la contrainte maximale dans ces revêtements et de la déformation radiale de la couche de matériau compressible en extrados. L'Andra en conclut qu'au bout de 300 ans, les contraintes dans les revêtements sont toujours inférieures aux contraintes admissibles selon les recommandations de l'AFTES et au critère de rupture des bétons envisagés. L'Andra conclut également que la déformation radiale maximale à 300 ans du matériau compressible situé à l'extrados du revêtement présente encore une marge par rapport à son pallier plastique. Elle précise en outre que des gains en termes de durabilité sont encore possibles grâce à des améliorations en cours de test au LSMHM, relatives au phasage de mise en œuvre (soutènements provisoires laissés sans revêtement sur une plus longue durée, capables de recevoir des revêtements définitifs ensuite, l'ensemble permettant une contrainte moindre dans les revêtements) et à la conception des matériaux compressibles (remplacement des matériaux à base de coques d'argilites cuites par des panneaux en béton mousse). L'Andra ajoute qu'en vue de diminuer la vulnérabilité des revêtements à la corrosion, l'épaisseur d'enrobage des armatures pourrait être augmentée et que des revêtements munis d'armatures/fibres non métalliques sont également à l'étude au laboratoire souterrain. Enfin, l'Andra indique que des interventions de confortement complémentaires à la jouvence classique, telles que le renforcement ponctuel à base de béton projeté haute performance, pourraient être mises en œuvre au cours de la phase d'exploitation dans la mesure où ces interventions sont prévues à la conception. **L'IRSN estime que les éléments présentés par l'Andra sont encourageants pour ce qui concerne la possibilité d'allonger la durée d'exploitation des revêtements en béton. L'IRSN souligne toutefois que certaines dispositions, telles que le choix de la nature des armatures ou de l'épaisseur des enrobages, nécessitent d'être décidées avant construction.**

S'agissant des formulations des bétons, basées sur des normes prescriptives (par exemple, norme NF EN 206/CN) l'Andra précise qu'elle prévoit de mettre en œuvre une approche performancielle (cf. chapitre 4.1) pour leur mise au point en vue de définir des « *propriétés à atteindre à l'état initial pour garantir une tenue dans le temps élevée* ». L'Andra estime qu'une telle approche, couplée au respect des exigences issues de l'Eurocode 2 (notamment en termes d'épaisseur d'enrobage des armatures), permettra l'atteinte d'un état initial garantissant la tenue des performances des bétons « *sur des durées supérieures à 150 ans* ». L'IRSN constate que l'Andra n'a pas retenu à ce stade les formulations de béton des ouvrages souterrains. Toutefois, l'IRSN considère que l'approche performancielle prévue par l'Andra constitue une démarche innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton, fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité et d'essais de vieillissement accélérés. L'IRSN convient avec l'Andra que le principal enjeu vis-à-vis de l'augmentation de la durée de fonctionnement de Cigéo est la durabilité des ouvrages de génie civil. A ce titre, **l'IRSN estime que l'application de l'approche performancielle telle qu'envisagée par l'Andra est pertinente pour les bétons de Cigéo en particulier dans la perspective de l'augmentation de la durée d'exploitation, notamment pour les LSF (descenderies et puits) et les galeries de liaison et d'accès.**

L'IRSN relève toutefois que cette approche ne semble pas prendre en compte les autres matériaux (virole métallique, plaques bitumineuses, mortiers de remplissage...) intervenant dans la conception particulière des têtes de LSF et du puits VVE pour satisfaire leurs fonctions d'étanchéité. En outre, l'IRSN souligne l'importance de considérer les conditions d'environnement auxquelles seront soumis les bétons (présence éventuelle d'eau à l'extrados, débits de ventilation potentiellement significatifs). Par ailleurs, l'IRSN constate que les dispositions présentées par l'Andra ci-dessus (adaptation de la formulation des bétons, augmentation de l'enrobage des armatures, utilisation de fibres non métalliques, réserves géométriques pour des renforcements éventuels, optimisation du phasage soutènement/revêtement, changement de matériaux compressibles...) impliquent des modifications des dispositions constructives du génie civil de l'installation qui ne pourraient être mises en œuvre que sur les parties de l'installation à construire. **A cet égard, l'IRSN estime que l'Andra devra présenter, avant le début des travaux de creusement et les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, son évaluation de l'évolution de la performance des bétons du génie civil de Cigéo dans le temps, basée notamment sur les résultats de l'approche performancielle, en vue d'une potentielle extension de durée de vie du projet et modifie en conséquence, si besoin, les dispositions constructives des ouvrages concernés.** Ce point fait l'objet

de l'**engagement 2024-E58** de la lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 rappelée en annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Enfin, l'IRSN considère que le retour d'expérience du LSMHM pour ce qui concerne la tenue des bétons, notamment basé sur l'analyse de la circulation d'eau à leur contact et sur le nombre et la nature des réparations qui pourraient déjà y avoir été effectuées, serait un élément utile à exploiter par l'Andra dans la démarche générale d'évaluation de la performance des bétons dans le temps.

Viellissement des équipements

A l'issue de son expertise du DOS [26], l'IRSN a considéré que les grands principes retenus et les réflexions initiées par l'Andra pour gérer le vieillissement attendu de Cigéo, fondés sur l'avis technique du Comité sur la sûreté des installations nucléaires relatif à la gestion du vieillissement des installations [145], étaient satisfaisants. Toutefois, des compléments étaient attendus pour le DDAC quant aux dispositions prises pour gérer le vieillissement prévu de certains équipements, eu égard à la durée d'exploitation de Cigéo.

Dans le DDAC [51], l'Andra indique que les moyens mis en œuvre pour maîtriser le vieillissement des équipements combinent des solutions techniques et organisationnelles (équipements adaptés à l'usure ou à l'environnement, opérations de maintenance et de jouvence). L'Andra présente ainsi, à titre d'exemple, les fréquences et opérations de remplacement de certains équipements sujets à des effets du vieillissement (contrôles annuels des façades d'accostage des alvéoles MA-VL, cf. chapitre 4.2.2, de l'état des rails et du système de transfert incliné, de la structure des tables tournantes, etc.). Certaines jouvences sont conditionnées par l'obsolescence, comme les automates programmables et onduleurs dont le rythme de jouvence préconisé est de 20 ans. Pour les équipements accessibles, les dispositions prévues par l'Andra n'appellent pas de remarque particulière de l'IRSN. Pour les équipements non accessibles, l'IRSN rappelle qu'au cours de la présente instruction, l'Andra s'est engagée à présenter sa stratégie de qualification des EIP inaccessibles (engagement 2024-E21, cf. chapitre 3.4.2). Dans ce cadre, **il appartiendra à l'Andra d'y intégrer un éventuel allongement de la durée de fonctionnement de Cigéo dû au stockage des déchets des inventaires de réserve.**

7. CONCLUSION

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 du projet Cigéo. A la demande de l'ASN, l'expertise de ce dossier est organisée selon trois groupements 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 second groupement thématique (GP2).

L'IRSN souligne en premier lieu les avancées notables de la démonstration de sûreté en phase d'exploitation, qui a atteint le niveau de maturité requis au stade d'un DDAC, concernant les spécifications d'acceptation des colis et les contrôles prévus lors de leur prise en charge sur l'installation, les risques internes d'origine nucléaire (exposition des travailleurs, dissémination, criticité, thermique) et les risques d'agression externe liés à l'inondation, aux aléas météorologiques, à l'environnement industriel et à la chute d'avion. En outre, bien que l'aléa sismique retenu pour le dimensionnement reste à consolider et fait l'objet d'un engagement de l'Andra en ce sens en vue du GP3, l'IRSN estime que les principes de conception et la démarche de dimensionnement retenus par l'Andra pour le génie civil des installations de surface et souterraine répondent au niveau attendu au stade d'un DDAC. S'agissant des agressions d'origine interne, la démonstration de la maîtrise des risques liés à l'incendie, à l'inondation interne, ainsi qu'à la manutention, à la perte d'auxiliaires et à la coactivité est globalement satisfaisante. Des justifications ou améliorations relatives à ces analyses de risques devront être apportées dans les prochaines étapes du projet, en particulier pour ceux liés à l'incendie. S'agissant de l'organisation du programme Cigéo, l'Andra a engagé une évolution organisationnelle liée au passage de la phase de conception à la phase industrielle de construction et de fonctionnement globalement satisfaisante pour anticiper la maîtrise des risques.

A l'issue de l'expertise du dossier d'options de sûreté (DOS) de Cigéo, l'IRSN avait souligné deux points de vigilance relatifs d'une part, à la surveillance de l'installation et d'autre part, à la gestion de situations accidentelles. Des progrès ont été réalisés sur ces deux sujets, en matière de stratégie de surveillance et d'identification des paramètres associés, et en termes de situations accidentelles prises en compte dans la démonstration de sûreté présentée par l'Andra. Néanmoins, la représentativité de la surveillance déportée en alvéole témoin et la définition des dispositions de surveillance des ouvrages de la première tranche demandent encore une attention particulière. L'IRSN considère en outre qu'une contamination notable de l'installation souterraine, bien que par ailleurs identifiée comme situation à exclure, doit être étudiée en tant que scénario au titre de la gestion des situations accidentelles et post-accidentelles.

Ainsi, l'IRSN estime que la démonstration de la sûreté du fonctionnement des installations de surface, de l'infrastructure souterraine et du quartier de stockage MA-VL de Cigéo est globalement satisfaisante, à ce stade de développement du projet. Toutefois, pour les alvéoles de stockage, l'IRSN considère que cette démonstration n'est pas acquise dans les situations suivantes. S'agissant du stockage en l'état des colis de déchets bitumés, autre point de vigilance identifié à l'issue du DOS, la définition des scénarios extrêmes pris en compte par l'Andra ne permet pas de garantir l'absence de propagation d'un emballement de réactions exothermiques aux colis voisins. Pour ce qui concerne la fermeture des alvéoles MA-VL, la maîtrise du risque d'explosion repose sur la connaissance du devenir des gaz dans ces alvéoles non ventilés et sur des estimations de conséquences, qui restent préliminaires à ce stade. Enfin, la faisabilité des dispositions de maîtrise de l'atmosphère interne des alvéoles HA n'est pas démontrée pour la conception actuelle vis-à-vis des risques d'explosion et de corrosion. Sur ce dernier point, l'IRSN rappelle que, suite au GP1, les premiers résultats du programme de recherche que l'Andra prévoit en vue de conforter les vitesses de corrosion retenues pour dimensionner les composants métalliques de l'alvéole HA, dont le conteneur de stockage qui porte une fonction de confinement, doivent être examinées dans le cadre du GP3. Sans que cela soit rédhibitoire vis-à-vis de la DAC, l'accessibilité de la démonstration de sûreté au regard de ces situations est à ce stade difficile à apprécier ; des évolutions de modes d'exploitation ou de conception pourraient être nécessaires pour atteindre cette démonstration.

En outre, sur un plan méthodologique, l'IRSN considère que les évaluations d'impact chimique et radiologique en phase d'exploitation doivent être complétées, notamment s'agissant des rejets liquides. Les compléments attendus ne sont pas, selon l'IRSN, de nature à remettre en cause le niveau globalement très faible des conséquences radiologiques estimées au stade du DDAC.

Aussi, l'IRSN souligne l'importance pour le programme Cigéo de tirer pleinement parti de la phase industrielle pilote afin de compléter et conforter la démonstration de sûreté en phase d'exploitation pour les différents types d'alvéoles, en vue de la mise en service de l'installation, sur la base notamment de démonstrateurs réalisés in situ en installation souterraine, dans des conditions d'environnement et de fonctionnement industriel tenant compte des changements d'échelle par rapport à des essais en surface ou au LSMHM. A cet égard, une durée de l'ordre de 25 ans à partir de la délivrance du décret d'autorisation de création, telle qu'actuellement prévue par l'Andra, semble raisonnable pour réunir les compléments nécessaires. Une durée de l'ordre de quelques années semble ensuite suffisante pour que les essais en phase pilote active permettent de confirmer la capacité de l'installation à fonctionner de façon sûre.

Enfin, l'architecture et la conception de référence considérées au stade du DDAC feront très vraisemblablement l'objet d'évolutions au cours du déploiement de Cigéo. A ce titre, l'IRSN estime que la flexibilité de l'installation constitue un enjeu fondamental et doit être associée à des dispositions organisationnelles et matérielles concrètes visant à assurer la faisabilité des options envisagées et à prendre en compte les besoins prévisibles liés à la gestion de l'inventaire de référence. Enfin, l'IRSN n'identifie pas, à ce stade des études d'adaptabilité, de point réhibitoire lié à la sûreté du stockage des combustibles usés et des déchets FA-VL des inventaires de réserve pendant la phase d'exploitation.

RECOMMANDATIONS

Recommandation N°1

L'IRSN recommande que l'Andra présente, dans la prochaine révision du rapport de sûreté de Cigéo, les opérations de gestion accidentelle et post-accidentelle à la suite d'une situation conduisant à une contamination notable de l'installation souterraine, ainsi que les moyens associés.

Recommandation N°2

L'IRSN recommande que, pour la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique, l'Andra fournisse une évaluation quantitative de l'impact sanitaire et à la faune et la flore des rejets liquides en substances chimiques toxiques de Cigéo, sur la base d'une estimation des concentrations rejetées dans l'environnement, afin d'apprécier l'impact de ces rejets.

LISTE DES ACRONYMES

AEGL	Acute exposure guideline levels
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AIP	Activité importante pour la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
APD	Avant-projet détaillé
APS	Avant-projet sommaire
ARF	Analyse de risque lié à la foudre
ASN	Autorité de sûreté nucléaire
ATEX	Atmosphère explosive
AVM	Atelier de vitrification de Marcoule
C1PG ^{SP}	Colis d'EDF contenant des déchets activés d'exploitation et de démantèlement
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEDRE	Comité d'évaluation des dynamiques et des ressources des emplois
CFR HAO	Colis de fines et résines cimentées du silo haute activité oxyde
CIP	Composant important pour la protection
CIPR	Commission internationale de protection radiologique
Cires	Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage
CMHM	Centre de Meuse/Haute-Marne
CMO	Concentration maximale en oxygène
CNE	Commission nationale d'évaluation
COX	Callovo-Oxfordien
CSA	Centre de stockage de l'Aube
CSD-C	Conteneur standard de déchets compactés
CSD-V	Conteneur standard de déchets vitrifiés
CSM	Centre de stockage de la Manche
CTS	Comité technique souterrain
CU	Combustible utilisé
D&E	Demandes de l'ASN, engagements de l'Andra et recommandations des GPE
DAC	Demande d'autorisation de création
DAI	Détection automatique d'incendie
DDAC	Dossier de demande d'autorisation de création
DED	Débit d'équivalent de dose
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
DIADEM	Déchets radioactifs irradiants ou alpha de démantèlement (Cadarache)
DIROP	Direction opérationnelle
DIRPROG	Direction du programme Cigéo
DISEF	Direction de la sûreté, l'environnement et la stratégie de filières
DJE	Dose journalière d'exposition
DNF	Dernier niveau de filtration
DOS	Dossier d'options de sûreté
DPCI	Disposition de protection contre l'incendie
DPUI	Dose par unité d'incorporation
DSC	Descenderie colis
DSI	Descenderie intermédiaire
DSS	Descenderie de service
ECS	Evaluation complémentaire de sûreté
ED	Exigence définie

EDF	Electricité de France
EIP	Élément important pour la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement
ENS	Événement non souhaité
EP1, EP2	Bâtiments nucléaires de surface 1 et 2
EPR, EPR2	Réacteur à eau pressurisée de 3 ^{ème} génération
ERI	Excès de risque individuels
ERP	Etablissement recevant du public
ET	Emballage de transport
ETF	Etude technique foudre
ETH	Bâtiment de déchargement des emballages de transport à déchargement horizontal
FA-VL	Faible activité vie longue
FDS	Forces de sécurité
FEB	Fût d'enrobé bitumé
FI	Faiblement irradiant
FIPRI	Filière indépendante de protection des intérêts
FOH	Facteurs organisationnels et humains
FT	Fonction de transfert
GA	Galerie d'accès
GLI	Galerie de liaison
GPD	Groupe permanent d'experts pour les déchets
GPE	Groupe permanent d'experts
GPRP	Groupe permanent d'experts pour la radioprotection et l'environnement
GPU	Groupe permanent d'experts pour les laboratoires et usines
GRA	Galerie de retour d'air
HA	Haute activité
HCM	Courbe hydrocarbure majorée
IG	Inspection générale
INB	Installation nucléaire de base
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
IRSN	Institut de radioprotection de sûreté nucléaire
ITE	Installation terminale embranchée
JRA	Jonction de retour d'air
LDCA	Limité dérivée de concentration dans l'air
LIE	Limite inférieure d'explosivité
LSF	Liaison surface-fond (puits, descenderies, colonne à carburant)
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
MLL	Machine à levage limité
MMT	Puits d'évacuation des matériels et matériaux de construction de la zone travaux
MOA	Maîtrise d'ouvrage
MOE	Maîtrise d'œuvre
MOX	Mixed oxydes (mélange d'oxydes)
MREA	Matériau de remplissage à l'extrados des alvéoles
Ms	Magnitude d'ondes de surface
Mw	Magnitude de moment
NNF	Nouveau nucléaire français
NQE	Norme de qualité environnementale

OPECST	Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
PCA	Poste de commandement avancé
PCC	Poste de commandement et de coordination
PCL	Poste de conduite locale
PCS	Poste central de sécurité
PDD	Plan de développement des composants du projet Cigéo
PIFOH	Plan d'intégration des facteurs organisationnels et humains
PIVER	Installation pilote de vitrification (Marcoule)
PNEC	Predicted non effect concentration
PNF	Premier niveau de filtration
PNGMDR	Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs
PUI	Plan d'urgence interne
QD	Quotient de danger
RAG	Réaction alcali-granulat
REP	Réacteur à eau pressurisée
REX	Retour d'expérience
RGE	Règles générales d'exploitation
RH	Ressources humaine
RSI	Réaction sulfatique interne
RX HE	Rayon X à haute énergie
SC	Secteur de confinement
SCC	Salle de conduite centralisée
SDD	Séisme de dimensionnement
SF	Secteur de feu
SMF	Spectre minimal forfaitaire
SMHV	Séisme maximum historiquement vraisemblable
SMI	Système de management intégré
SMPP	Spectre maximal physiquement possible (spectre sismique après fermeture)
SMR	Small modular reactor (petit réacteur modulaire)
SMS	Séisme majoré de sécurité
SND	Spectre noyau dur
SNR	Scénario de non-renouvellement
SPF	Système de protection foudre
SR1	Scénario de renouvellement 1
SRI	Situation de référence pour le risque inondation
STE2	Station de traitement des effluents n°2 (La Hague)
T1, TU	Tranche 1, tranches ultérieures
THE	Filtre très haute efficacité
THM	Thermo-hydro-mécanique
UNE	Uranium naturel enrichi
UNGG	Uranium naturel graphite gaz
URE	Uranium de retraitement enrichi
VFE	Puits de transfert du personnel et à l'apport d'air frais de la zone exploitation
VFT	Puits de transfert du personnel et à l'apport d'air frais de la zone travaux
VSTAF	Valeur seuil de toxicité aigüe française
VTR	Valeur toxicologique de référence
VVE	Puits de retour d'air vicié de la zone exploitation
VVT	Puits de retour d'air vicié de la zone travaux
WBS	Work breakdown structure
WIPP	Waste isolation pilot plan
ZAR	Zone arrière

ZAV	Zone avant
ZEXP	Zone d'exploitation
ZF	Zone de feu
ZIOS	Zone d'implantation des ouvrages souterrains (2023)
ZIRA	Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (2009)
ZppDN	Zone à production possible de déchets nucléaires
ZSL	Zone de soutien logistique
ZSLE	Zone de soutien logistique exploitation
ZSLT	Zone de soutien logistique travaux
ZT	Zone travaux

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 n°2024-00051 du 12 avril 2024.
- [3] Avis IRSN n°2024-00051. Demande d'autorisation de création du projet Cigéo – « GP1 » – Evaluation des données de base retenues pour l'évaluation de sûreté.
- [4] Lettre 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.
- [5] Lettre ASN CODEP-DRC-2024-017460 du 4 novembre 2024. Examen du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation Cigéo. Réunion n°2 du GPD. Saisine n° SAISI-DRC-2024-0070.
- [6] Lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024. Engagements de l'Andra dans le cadre du GP2.
- [7] Loi n°2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.
- [8] 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.
- [9] Loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue.
- [10] Lettre Andra DG/16-0105 du 6 avril 2016.
- [11] 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.
- [12] 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 ».
- [13] Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire du 1^{er} 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.
- [14] 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 ».
- [15] 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.
- [16] Avis ASN CODEP-DRC-2011-002092, Examen du « Dossier 2009 » relatif au projet HA-MAVL présenté devant le GPD les 29-30 novembre 2010.
- [17] Avis IRSN n°2013-00159 du 26 avril 2013 sur les évolutions du projet Cigéo au stade « Jesq03 » depuis le Dossier 2009.
- [18] Rapport IRSN n°2014-00006. Projet de stockage Cigéo – Ouvrages de fermeture, présenté devant le GPD le 1^{er} juillet 2014.

- [19] 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 ».
- [20] Lettre ASN CODEP-DRC-2014-039040 du 9 octobre 2014 – Dossier « projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde – ouvrages de fermeture ».
- [21] Rapport IRSN n°2014-00010. Examen de la maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo, présenté devant le GPD et le GPU le 10 décembre 2014.
- [22] Avis et recommandations CODEP-MEA-2014-056324 des Groupes Permanents « Déchets » et « Usines » du 10/12/2014 relatif au Projet de stockage Cigéo – Examen du dossier « maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo ».
- [23] Lettre ASN CODEP-DRC-2015-004834 du 7 avril 2015 – Dossier « projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde – maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo ».
- [24] Avis IRSN n°0348 du 6 novembre 2015. Plan de développement des composants du projet Cigéo.
- [25] Lettre ASN/CODEP-DRC-2016-005220 du 20 juin 2016 – « Plan de développement des composants du projet Cigéo ».
- [26] Rapport IRSN n°2017-00013. Projet de stockage Cigéo – Examen du Dossier d’Options de Sûreté.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Andra. 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.
- [31] Andra. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté – PARTIE II : description de l’INB, de son environnement et de son fonctionnement et évolution du système de stockage après fermeture – Volume 4 – Le site d’implantation de l’INB et son environnement. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-21-0007/A.
- [32] Andra. 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-GEO-0000-20-0003-A.
- [33] Andra. Note conceptuelle : le transfert des radionucléides. CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-19-0004/A.
- [34] Andra. Pièce 0 – Présentation non technique – CG-TE-D-PRE-AMOA-PU0-0000-21-0026-A.
- [35] Andra. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté – PARTIE II : description de l’INB, de son environnement et de son fonctionnement et évolution du système de stockage après fermeture – Volume 5 – Les installations, ouvrages et équipements. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-21-0007/A.
- [36] Andra. Pièce 20 – Plan de développement de l’installation de stockage Cigéo. CG-TE-D-PDD-AMOA-SDR-0000-19-0002/A.
- [37] Andra. Dossier de justification de la conception de l’alvéole HA. CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0044/A.

- [38] Andra. Dossier de justification de la conception de l'alvéole MA-VL. CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0045/A.
- [39] Andra. Dossier de justification de la conception des conteneurs de stockage HA. CG-TE-D-DJC-AMOA-CSO-0000-19-0002/A.
- [40] Andra. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté – PARTIE II : description de l'INB, de son environnement et de son fonctionnement et évolution du système de stockage après fermeture – Volume 3 – Les colis de déchets. CG-TE-D-NTE-AMOA-SRO-0000-21-0007/A.
- [41] Andra. Dossier de justification de la conception des conteneurs de stockage MA-VL. CG-TE-D-DJC-AMOA-SCO-0000-19-0003/A.
- [42] Andra. Pièce 16 – Plan directeur de l'exploitation. CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-19-0001-A.
- [43] ASN. Guide n°1 de l'ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 12 février 2008
- [44] Andra. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté – PARTIE I : contexte, périmètres, démarche et référentiels – Volume 2 – La démarche de sûreté et les référentiels associés. CG-TE-D-NTE-AMOA-SRO-0000-21-0007
- [45] Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base.
- [46] International Atomic Energy Agency (IAEA). Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. SSG n°14.
- [47] Andra. Note scénarios, hypothèses et résultats des calculs de conséquences. CG-TE-D-NTE-AMOA-SRO-0000-20-0012/A.
- [48] Andra. Note études complémentaires de sûreté. CG-TE-D-NTE-AMOA-SRO-0000-20-0001/A.
- [49] Andra. Liste des EIP et exigences définies. CG -TE-D-NTE-AMOA -SRO-0000-19-0045/A.
- [50] Rapport IRSN. La démarche d'« élimination pratique » de situations accidentelles pour les réacteurs à eau de puissance.
- [51] Andra. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté – PARTIE III : démonstration de sûreté – Volume 9 – La démonstration de sûreté en exploitation. CG-TE-D-NTE-AMOA-SRO-0000-21-0007/A.
- [52] Andra. Le programme des activités scientifiques et technologiques après le dépôt de la demande d'autorisation de création. CG-TE-D-PRG-AMOA-AST-0000-22-0001.
- [53] Andra. La stratégie de surveillance de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS 0000-19-0005/A.
- [54] Décision n°2015-DC-0532 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 17 novembre 2015 relative au rapport de sûreté des installations nucléaires de base.
- [55] Andra. Dossier de justification de la conception du bâtiment nucléaire de surface EP1. CG-TE-D-DJC-AMOA-ASR-0000-19-0009/A.
- [56] Documents Eurocodes (0, 1, 2, 3, 7 et 8).
- [57] Guide de l'ASN n°2/01 du 30 mai 2006. Prise en compte du risque sismique à la conception des ouvrages de génie civil d'installations nucléaires de base à l'exception des stockages à long terme des déchets radioactifs.
- [58] Guide CEA AGS SNGEN RDN GUI SIIT 0605 indice A du 30 juin 2008. Guide de conception génie civil des INB du CEA.

- [59] Guide CEA AGS SNGEN RDN GUI SIIT 0606 indice A du 30 juin 2008. Guide de conception Génie Civil des INB du CEA – Annexes.
- [60] MicroShield®, version 9.07, Grove Software, Inc., 1995-2014 (avec données ICRP107).
- [61] MCNP User's Manual – Code Version 6.2, Los Alamos National Laboratory, report LA UR 17 29981, C.J. Werner, 2017.
- [62] Andra. Note d'analyse des risques liés à l'exposition externe et interne. CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-20-0004/A.
- [63] Andra. Note d'analyse des risques liés à la dispersion de substances radioactives. CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-20-0005/A.
- [64] Arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.
- [65] 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.
- [66] Andra. Dossier de justification des systèmes de ventilation de l'installation souterraine. CG-TE-D-DJC-AMOA-TR0-0000-20-0014/A.
- [67] Andra. Note d'analyse des risques liés à la criticité en exploitation. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-20-0001/A.
- [68] Andra. Note d'analyse des risques liés au dégagement thermique. CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-19-0048/A.
- [69] Décision n°2014-DC-0417 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 28 janvier 2014 relative aux règles applicables aux installations nucléaires de base (INB) pour la maîtrise des risques liés à l'incendie.
- [70] Andra. Note d'analyse des risques liés à l'incendie en zone nucléaire. CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-20-0010/A.
- [71] Andra. Dossier de justification de la version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis. CG-TE-D-DJD-AMOA-SR0-0000-19-0043/A.
- [72] Andra. Note Technique Sûreté en exploitation – Risque incendie – Méthode, analyse et implications en terme d'exigences aux colis MA-VL. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-20-0055.
- [73] Andra. Référentiel incendie pour la conception des installations souterraines de Cigéo. CG-TE-F-RGS-AMOA-FE0-0000-11-0051/E.
- [74] Avis IRSN n°2019-00291. Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs – Stockage en l'état des fûts de déchets bitumés dans Cigéo – Maîtrise des risques et principes d'évolution de conception.
- [75] Avis IRSN n°2018-00207. Comportement physico-chimique des fûts d'enrobé bitumineux.
- [76] Lettre ASN CODEP-DRC-2019-005828 du 28 mai 2019. Étude PNGMDR 2016-2018 : comportement physico-chimique et thermique des colis de déchets bitumés en stockage.
- [77] Andra. Dossier de justification de la conception des alvéoles dédiés au stockage des colis de déchets bitumés mis en conteneur renforcé. CG-TE-D-DJC-MT0-0000-20-0017/A.
- [78] Andra. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté – PARTIE IV : Volumes complémentaires répondant au III de l'article R.593-16 du code de l'environnement – Volume 11 – La flexibilité de l'exploitation de l'INB. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V002-21-0007-A.
- [79] Andra. Méthode de définition de critères d'acceptation liés à la réactivité chimique des colis de déchets bitumés. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-22-0010/A.

- [80] Andra. Note d'analyse des risques liés aux gaz inflammables produits par radiolyse et par corrosion. CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-20-0006/A.
- [81] Andra. Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo. Les notes conceptuelles – Le comportement hydrique et hydraulique du stockage et le devenir des gaz pendant la période d'exploitation réversible (zones de stockage HA et MA-VL). CG-TE-D-NTE-AMOA-HYD-0000-20-0001/A.
- [82] Andra. Pièce 13 – Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance. CG-TE-D-PDG-AMOA-OBS-0000-19-0001/A.
- [83] Andra. Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo. Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques.
- [84] Andra. Note d'analyse des risques liés à la manutention. CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-20-0008/A.
- [85] Andra. Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond. CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0046.
- [86] Andra. Dossier de justification des choix d'architecture souterraine. CG-TE-D-DJC-AMOA-AF0-0000-19-0001.
- [87] Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles (IRIS-2010) - Final report et publication à ce sujet lors du SMIRT 21 de novembre 2011.
- [88] Andra. Note d'analyse des risques liés au risque sismique. CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-20-0011/A.
- [89] Andra. Projet Cigéo – Définition de l'aléa sismique en phase d'exploitation. CG-AMOA-LET-23-0002.
- [90] Andra. Pièce 8 – Étude de maîtrise des risques. CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-19-0037/A.
- [91] Avis IRSN n°2021-00071 du 5 mai 2021. Projet Cigéo – Approche déterministe pour la définition de l'aléa en phase d'exploitation et variations du mouvement sismique avec la profondeur.
- [92] Lettre ASN CODEP-DRC-2022-002107 du 12 avril 2022. Projet Cigéo – Définition de l'aléa sismique en phase d'exploitation.
- [93] Règle fondamentale de sûreté n°2001-01 relative aux installations nucléaires de base. Détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface.
- [94] Baize, S., Cushing, E. M., Lemeille, F., & Jomard, H. (2013). Updated seismotectonic zoning scheme of Metropolitan France, with reference to geologic and seismotectonic data. Bulletin de la Société Géologique de France, 184(3), 225-259.
- [95] Knuts, E., Alexandre, P., & Camelbeeck, T. (2015). Le séisme luxembourgeois du 13 avril 1733 : nouvelles recherches. Ciel et terre, 131, 5-130.
- [96] Rapport IRSN n°2022-00768 du 25 novembre 2023. Réacteurs électronucléaires – EDF – réacteurs de 1300 MWe. Mouvements sismiques à prendre en compte pour la sûreté des installations nucléaires en application de la RFS 2001-01.
- [97] Andra. Projet Cigéo – Instruction sur l'aléa sismique retenu pour le dimensionnement des installations de surface et souterraine de Cigéo. Lettre DISEF/DIR/21-0095 du 24 septembre 2021.
- [98] Andra. Prise en compte des incertitudes dans l'évaluation de l'aléa sismique au niveau SMS – Site de Cigéo. Note CG-RP-FGEO-23-0017-A du 9 octobre 2023
- [99] Rapport Andra CG-CMOA-RAP-24-0001-A du 16 février 2024. Réponse aux questions IRSN – Instruction de la demande de DAC – Site de Cigéo. Rapport d'étude STR_ANDRA_24P08_01.
- [100] 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.

- [101] Rapport Andra CG-RP-FGEO-24-0003-A du 16 février 2024. Mise à jour de l'évaluation empirique des fonctions de transfert surface-profondeur sur le site de Cigéo. Rapport d'étude STR_ANDRA_23P36_01.
- [102] Décisions ASN n°2014-DC-0394 à n°2014-DC-0412 du 21 janvier 2014.
- [103] Guide CETU de mars 2017. Système de protection passive contre l'incendie – Justification des performances pour les structures de tunnel routier.
- [104] Recommandations de l'AFTES GT22R1F1. Conception et protection parasismique des ouvrages souterrains.
- [105] Application de l'abaque de Grimstad et Barton, 1993, selon Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F., 1997.
- [106] Panet, M., Sulem, J. (2021). La méthode convergence-confinement. Les contributions du Laboratoire de mécanique des solides (LMS). Rev. Fr. Geotech. (169) 3.
- [107] Andra. Note d'analyse des risques liés à l'inondation externe. CG-TE-D-ERQ-AMOA-SRO-0000-20-0007/A.
- [108] Lettre ASN CODEP-DCN-2021-017553 du 27 mai 2021. Aléas à retenir pour la protection des éléments importants pour la protection (EIP) à l'égard des tornades.
- [109] Rapport IRSN n°2023-00142. Etat des connaissances, des pratiques et préconisations concernant les agressions vent et neige sur les Installations Nucléaires de Base – Groupe de travail « vent et neige ».
- [110] Andra. Analyse du risque foudre réglementaire (ARFr) – Projet Cigéo. CG-TE-D-ERQ-RSOC-EL0-0000-16-0001-A.
- [111] Andra. Étude technique foudre réglementaire (ETFr) – Projet Cigéo. CG-TE-D-NTE-RSOC-EL0-0000-18-0001-A.
- [112] Règle Fondamentale de Sûreté I.1.a publiée le 7 octobre 1992 et valable pour les installations nucléaires de base autres que les réacteurs : Principes généraux relatifs à la protection contre les agressions externes. Prise en compte des risques liés aux chutes d'avions.
- [113] Rapport PSN-RES/SA2I 2014-00013. Démarche d'analyse des risques liés à la chute accidentelle d'un aéronef sur les installations nucléaires.
- [114] Guide ETC-C de l'AFCEM édition 2010. Code technique pour les travaux de génie civil EPR.
- [115] Avis IRSN n°2020-00204. Réacteurs électronucléaires EDF – Projet EPR2 Prise en compte de la chute accidentelle d'un aéronef militaire.
- [116] Guide RCC-G de l'AFCEM édition juillet 1988. Règles de conception et de construction du génie civil des îlots nucléaires REP.
- [117] Andra. Pièce 6 – Étude d'impact du projet global Cigéo – Volume IV – Évaluation des incidences et mesures d'évitement, de réduction et de compensation de ces incidences. CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-V002-22-0005-A.
- [118] International Atomic Energy Agency (IAEA). Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf
- [119] ICRP, 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values.
- [120] Andra. Enquête alimentaire sur la zone OPE du Centre Meuse Haute-Marne de l'Andra : synthèse des résultats. SUR.NT.ASSE.14-0009.

- [121] Agence nationale sécurité sanitaire alimentaire nationale (ANSES) ; Santé publique France. Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) – Avis de l’Anses – Rapport d’expertise collective (2017).
- [122] Eckerman, K.-F., Ryman, J.-C. External exposure to radionuclides in air, water, and soil. United States Environmental Protection Agency (EPA) (1993). N°EPA 402-R-93-081. Disponible à l'adresse : <https://www.epa.gov/radiation/federal-guidance-report-no-12-external-exposure-radionuclides-air-waterand-soil>
- [123] Arrêté du 27 juillet 2018 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement.
- [124] 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.
- [125] Arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement.
- [126] Arrêté du 28 juin 2016 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement.
- [127] Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau du Ministère de l'Ecologie et du développement durable, des agences de l'eau et des directions régionales de l'environnement (version 2, 2003).
- [128] Avis ANSES n°2019-SA-0198. Avis complété relatif à l'élaboration de VTR par voie respiratoire pour les particules de l'air ambiant extérieur (PM_{2,5} et PM₁₀) et le carbone suie de l'air ambiant extérieur et rapport relatif aux VTR par voie respiratoire pour le carbone suie de l'air ambiant extérieur.
- [129] Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.
- [130] Décision n°2017-DC-0587 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 23 mars 2017 relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage.
- [131] Andra. Pièce 19 – Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis. CG-TE-D-SPE-AMOA-SR0-0000-19-0040/A.
- [132] Avis IRSN n°2019-00178. Projet Cigéo : Spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires – Acceptabilité des colis de déchets radioactifs du CEA, d'Orano et d'EDF.
- [133] Andra. Critères associés au maintien du confinement statique des colis primaires. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-22-0001/A.
- [134] Avis IRSN n°2020-00126. Avis relatif à la demande d'accord de conditionnement des colis de déchets 870 L FI de l'INB n°37-A du CEA.
- [135] Avis IRSN n°2020-00125. Avis relatif à la demande d'accord de conditionnement des colis de déchets 500 L MI de l'INB n°37-A du CEA.
- [136] Lettre ASN CODEP-DRC-2023-059261 du 8 décembre 2023. Lettre de suites de l'inspection du projet Cigéo du 10 octobre 2023.
- [137] Andra. Fiche de poste 2023-305 Référent/Ergonome Facteurs Organisationnels et Humains – Cigéo F/H.

- [138] Andra. La phase industrielle pilote – Eléments sur son déroulé, ses objectifs et ses limitations. CG-AMOA-LET-24-0010.
- [139] Andra. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté – PARTIE IV : Volumes complémentaires répondant au III de l'article R.593-16 du code de l'environnement – Volume 13 – La récupérabilité des colis de déchets stockés. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V002-21-0007-A.
- [140] Nguyen, T. Flambage sous contact d'une coque cylindrique soumise à pression externe (2017). Université de Lyon. Thèse de doctorat, spécialité Génie civil.
- [141] Andra. Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo. Les notes conceptuelles – Le comportement mécanique et la corrosion des composants métalliques des alvéoles HA dans le temps (exploitation et après fermeture). CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0005.
- [142] Andra. Dossier de justification de la conception du process nucléaires souterrain. CG-TE-D-DJC-AMOA-MT0-0000-19-0032.
- [143] Andra. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté – 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 à l'inventaire de réserve. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V002-21-0007-A.
- [144] Andra. 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.
- [145] Avis techniques du CSIN N°15. Gestion du vieillissement des installations du cycle du combustible nucléaire.

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

31 av. de la division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

COURRIER

B.P 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses

TÉLÉPHONE

+33 (0)1 58 35 88 88

SITE INTERNET

www.irsn.fr

MEMBRE DE
ETSON