

Monsieur P. BOIS, Directeur général adjoint
de l'ASNR

Fontenay-aux-Roses, le 6 juin 2025

Avis d'expertise n° 2025-00056

Objet : Demande d'autorisation de création de Cigéo – “ GP3 ” – Évaluation de la sûreté post fermeture

Référence : 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.

Au 1^{er} janvier 2025, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sont devenus l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR). Le présent avis de la Direction de la recherche et de l'expertise en environnement (PSE-ENV) de l'ASNR vient en réponse à la lettre citée en référence. Dans la suite de cet avis, les acronymes ASN et IRSN sont maintenus lorsqu'il est fait référence à des documents ou positions émis par ces organismes avant leur fusion.

Par lettre citée en référence, l'ASN a demandé l'avis de l'IRSN sur le dossier de demande d'autorisation de création (DDAC) du projet Cigéo de stockage en formation géologique profonde des déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), déposé par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra). L'ASN a sollicité une expertise de ce DDAC organisée selon trois groupements de thématiques :

- les données de base retenues pour l'évaluation de sûreté de Cigéo (expertise « GP1 », objet de l'avis IRSN n° 2024-00051 du 12 avril 2024) ;
- l'évaluation de sûreté en phase d'exploitation (expertise « GP2 », objet de l'avis IRSN n° 2024-00167 du 29 novembre 2024) ;
- l'évaluation de sûreté en phase d'après fermeture (expertise « GP3 »).

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 spécifications préliminaires d'acceptation des colis de déchets, de la réversibilité (incluant la récupérabilité des colis de déchets et l'adaptabilité du stockage) ainsi que des conséquences liées au changement climatique.

Le présent avis concerne l'expertise GP3. Pour celle-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 :

- la démarche de sûreté en après fermeture au regard de la définition des scénarios prenant en compte les situations d'évolutions du système de stockage normales et altérées à long terme ;
- l'évaluation des performances du système de stockage au regard des risques internes et externes ;
- l'estimation des conséquences radiologiques et chimiques associées à chaque scénario.

Les dispositions prévues pour la gestion de la mémoire durant la phase d'exploitation et les études d'adaptabilité, également mentionnées dans la saisine de l'ASN, sont intégrées à la présente expertise. Celle-ci inclut en outre les éléments transmis par l'Andra en réponse à ses engagements 2024-E12 et 2024-E41 pris à l'issue des expertises GP1 et GP2, qui concernent la corrosion des composants métalliques en alvéole HA et l'aléa sismique retenu pour le dimensionnement de l'installation en phase d'exploitation.

La présente expertise a fait l'objet d'un dialogue technique 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 puis l'ASNR, avec l'objectif double de tenir compte des préoccupations de la société civile pour rendre plus robuste l'expertise et de permettre à la société civile de se forger sa propre opinion et participer ainsi au processus conduisant à la décision publique.

De l'évaluation du dossier transmis et des informations fournies par l'Andra au cours de l'expertise, PSE-ENV retient les principaux éléments développés ci-après. Les recommandations formulées par PSE-ENV ont toutes fait l'objet d'engagements pris par l'Andra auprès de l'ASNR, rappelés en annexe au présent avis. Différentes échéances leur sont associées, en cohérence avec des jalons d'évaluation (mise à jour du DDAC avant l'enquête publique, révision de la version préliminaire du rapport de sûreté après l'autorisation de création le cas échéant) ou du projet (début du creusement des ouvrages souterrains). Cette expertise GP3 de PSE-ENV sera présentée aux membres du groupe permanent d'experts pour les déchets (GPD) lors de leur réunion des 25 et 26 juin 2025, en présence de membres des groupes permanents d'experts pour les laboratoires et les usines (GPU) et pour la radioprotection des travailleurs, du public, des patients et de l'environnement (GPRP).

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

L'expertise GP1 a mis en évidence des vitesses de corrosion significatives du chemisage et du conteneur de stockage d'un alvéole HA en présence de la première formulation du matériau cimentaire prévu dans l'espace annulaire entre la roche et le chemisage testée par l'Andra au stade du DDAC, qui ne permettent pas de garantir la réalisation de leurs fonctions. Aussi, l'Andra a transmis, au cours de l'expertise GP3, une présentation synthétique du programme qu'elle conduit sur la corrosion de ces composants métalliques, complétée par les principaux résultats obtenus à la date de fin août 2024. De ces éléments, PSE-ENV relève l'avancement limité du programme de recherche à ce stade et observe que les quelques résultats complémentaires présentés suite au GP1 ont permis à l'Andra de préciser la formulation du matériau cimentaire de remplissage vers laquelle elle s'oriente, sans pour autant constituer des éléments de nature à lever les réserves émises à l'issue de l'expertise GP1. Aussi, comme à l'issue de l'expertise GP1, PSE-ENV estime qu'à ce stade, les données disponibles pour justifier le dimensionnement des composants métalliques de l'alvéole HA restent marquées par des incertitudes significatives, ce qui constitue un point d'attention pour statuer sur la pertinence du concept d'alvéole HA retenu dans le DDAC.

A l'issue de l'expertise GP2, l'Andra a pris l'engagement d'établir un nouveau spectre de dimensionnement (SDD) de l'installation en phase d'exploitation, qui tienne mieux compte des incertitudes associées à la définition de l'aléa sismique. PSE-ENV estime que le SDD révisé présenté par l'Andra au cours de l'expertise GP3, qui suit les préconisations émises lors de l'expertise GP2, est désormais satisfaisant.

2. DEMARCHE D'EVALUATION DE SURETE APRES FERMETURE

L'évaluation de la sûreté après fermeture de Cigéo a pour objectif de s'assurer de sa sûreté passive sur le long terme, c'est à dire sans qu'il soit nécessaire d'intervenir, afin de protéger les personnes et l'environnement envers les risques liés à la dissémination des substances radioactives et toxiques chimiques. Cette évaluation doit en outre montrer la robustesse du système de stockage, composé de la roche hôte du Callovo-Oxfordien (COx), des composants ouvragés du stockage et des colis de déchets, en regard des incertitudes relatives en particulier à l'évolution à long terme de ce système et du milieu géologique.

La démarche générale retenue par l'Andra comprend ainsi deux volets : l'analyse des risques internes et externes ainsi que des incertitudes associées à l'évolution future des composants du stockage, et l'évaluation quantitative de la capacité globale de confinement du stockage prenant en compte ces risques et incertitudes *via* des scénarios d'évolution du stockage. Ce second volet inclut également la vérification, *in fine*, du respect des objectifs de protection sur la base des incidences sanitaires et environnementales estimées pour ces scénarios. L'Andra classe les scénarios d'évolution du stockage qu'elle retient selon leur probabilité d'occurrence :

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

A ces trois classes de scénarios vient s'ajouter une famille spécifique de scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI), sans considération de niveau de vraisemblance, intégrée dans l'évaluation de sûreté afin de tester la robustesse du système de stockage vis-à-vis de ce type d'événement. PSE-ENV estime que la démarche générale de l'Andra pour évaluer la sûreté après fermeture de Cigéo, conforme aux normes et guides en vigueur et s'inscrivant dans la continuité de celle présentée au stade du dossier d'options de sûreté (DOS), est satisfaisante.

S'agissant de la déclinaison de cette démarche, les fonctions de sûreté du système de stockage après fermeture retenues par l'Andra, ainsi que la liste des composants importants pour la protection (CIP) établie en cohérence, n'appellent pas de remarque de PSE-ENV. En outre, PSE-ENV considère que le choix et la définition des biosphères par l'Andra pour évaluer l'impact radiologique et des substances toxiques chimiques post-fermeture sont pertinents. En particulier, PSE-ENV estime que les biosphères chaude et froide retenues, qui tiennent compte d'études d'évolution du climat, permettent d'intégrer les incertitudes inhérentes à la prédiction climatique sur le très long terme. Par ailleurs, PSE-ENV estime que les objectifs de protection sanitaire radiologique sont globalement cohérents, dans leur principe, avec les guides nationaux et internationaux en vigueur, de même que les objectifs de protection de l'environnement relatifs aux substances radiologiques et aux toxiques chimiques. En revanche, l'évaluation de l'impact sanitaire des relâchements de substances toxiques chimiques du stockage nécessite des compléments méthodologiques, relatifs notamment à l'estimation des concentrations des substances dans les matrices environnementales et à la quantification de l'exposition des populations (engagement 2025-E5), sans que ces compléments soient de nature à remettre en cause le niveau très faible des incidences sanitaires des substances toxiques chimiques évaluées par l'Andra.

Enfin, le travail de préfiguration des dispositifs de maintien de la mémoire est satisfaisant au stade actuel de développement du projet Cigéo, en termes notamment de dossiers descriptifs du stockage prévus à différents niveaux de détail. Ces dispositifs incluent également l'inscription du site dans les documents d'aménagement du territoire, des échanges avec la société civile, ainsi que d'autres outils mémoriels tels que des marqueurs de site en cohérence avec les initiatives menées à l'international. Il conviendra, selon PSE-ENV, que la méthode de sélection des données à archiver soit consolidée avant les travaux de terrassement et que les modalités de conservation de ces données soient définies *a minima* jusqu'au passage en phase de surveillance de Cigéo.

3. ANALYSE DES RISQUES ET INCERTITUDES

Afin de préserver les caractéristiques favorables du COx d'une excursion critique liée à la présence de matières fissiles (MF) dans les déchets, l'Andra fixe un objectif de maîtrise du risque de criticité à long terme dans le stockage après sa fermeture. L'évaluation par l'Andra de la sous-criticité du stockage après sa fermeture repose sur des études visant à déterminer l'influence des évolutions envisageables des colis et des alvéoles sur la masse critique de MF. A cet égard, PSE-ENV estime nécessaire que l'Andra consolide sa démonstration de l'absence du risque de criticité après fermeture en justifiant le caractère enveloppe des modèles d'évolution du stockage considérés dans ses analyses de sûreté-criticité vis-à-vis notamment des dégradations attendues des matériaux cimentaires (engagements 2025-E1 et E2). PSE-ENV constate que les masses critiques déterminées dans les différents modèles d'évolution du stockage après fermeture sont, à de rares exceptions près¹, supérieures aux masses de MF maximales admissibles spécifiées dans les critères d'acceptation des colis primaires dans le

¹ Un colis 870 L FI et un type de colis PIVER, dont les MF dépassent les masses maximales admissibles pour ces types de colis, ont été identifiés au cours de l'expertise. Leur éventuelle acceptation par dérogation à Cigéo reste conditionnée à une démonstration complémentaire de la maîtrise du risque criticité.

stockage. Ces résultats tendent à montrer la maîtrise du risque de criticité après fermeture du stockage, sous réserve de la consolidation susmentionnée des modèles.

Par ailleurs, la démonstration de la maîtrise des effets, sur la capacité de confinement du stockage, du gonflement sous eau des déchets bitumés, des gaz durant le transitoire hydraulique-gaz ou des surpressions hydrauliques induites par le fluage de la roche n'appelle pas de remarque de PSE-ENV.

Pour l'évaluation des effets d'un séisme susceptible de survenir après la fermeture du stockage et le dimensionnement des ouvrages notamment de fermeture, l'Andra retient le séisme maximum physiquement possible (SMPP). La définition du spectre d'aléa retenu, ainsi que la période de retour considérée, sont globalement satisfaisantes. PSE-ENV estime toutefois que l'Andra devra compléter, avant le creusement des ouvrages souterrains, la démonstration du caractère enveloppe du SMPP vis-à-vis de séismes pouvant se produire d'une part entre 2 et 5 km de profondeur, d'autre part en lien avec l'hypothèse d'une origine tectonique des structures détectées dans le Trias au droit du quartier de stockage HA (engagement 2025-E3).

Sur la base de son analyse des risques et en regard des incertitudes liées à l'état des connaissances (cf. expertise GP1), en particulier celles relatives à l'évolution à long terme du système de stockage, l'Andra définit des scénarios d'évolution du stockage. PSE-ENV souligne que la prise en compte dans ces scénarios d'une défaillance des scellements ou d'une perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA intègrent bien les incertitudes liées aux performances des scellements (cf. expertise GP1) et aux vitesses de corrosion de ces conteneurs (cf. *supra*). En outre, la définition de scénarios supplémentaires, en cohérence avec l'expertise du DOS, tenant compte de l'effondrement d'un alvéole MA-VL en phase d'exploitation ou encore d'une faille non détectée dans le COx, constitue une avancée notable de la démonstration de sûreté après fermeture. Aussi, PSE-ENV estime que la sélection des scénarios d'évolution est globalement pertinente pour évaluer les conséquences des risques et des incertitudes identifiés sur la capacité de confinement du système de stockage et *in fine* éprouver sa robustesse.

4. EVALUATION DE LA CAPACITE GLOBALE DE CONFINEMENT

Scénario d'évolution normale

L'Andra évalue la capacité globale de confinement du système de stockage et son impact sanitaire et environnemental selon deux situations complémentaires pour couvrir le domaine d'évolution normale : la « situation de référence », qui correspond à l'évolution attendue du stockage, et la « situation enveloppe », qui cumule des données conservatives et des hypothèses pénalisantes. Sur la base des résultats présentés par l'Andra ainsi que ceux issus de ses propres modélisations, PSE-ENV considère que l'évaluation du SEN met en évidence la bonne capacité globale de confinement du système de stockage. Les résultats confirment la large prédominance des transferts vers les encaissants par diffusion, phénomène lent, *via* la voie COx, par rapport à la voie « ouvrages » (galeries et liaisons surface-fond (LSF)). PSE-ENV constate que les impacts sanitaires radiologiques restent inférieurs, ou du même ordre de grandeur pour l'impact maximal en situation enveloppe, à l'objectif de protection (valeur repère de 0,25 mSv/an). Selon PSE-ENV, ces évaluations d'incidences sanitaires en situation enveloppe, situation qui conduit à majorer de manière probablement excessive les transferts de solutés, montrent l'importance pour l'Andra, dans l'objectif de disposer de marges par rapport aux objectifs de protection, de poursuivre les efforts de consolidation des données, en particulier celles relatives à la solubilité du sélénium ou encore aux propriétés hydrauliques du COx sain. Par ailleurs, des compléments devront être apportés par l'Andra pour confirmer l'absence d'impact significatif du ¹⁴C, seul radionucléide présent sous forme gazeuse en quantité significative dans l'inventaire, pendant le transitoire hydraulique-gaz (engagement 2025-E4). Enfin, PSE-ENV convient que, pour le scénario d'évolution normale du stockage à long terme, l'impact pour la faune et la flore est négligeable.

Scénarios d'évolution altérée et scénarios *What-if*

En cas de défaillance des scellements, PSE-ENV constate qu'en situation de référence, les scellements des galeries assurent une redondance avec les scellements des LSF lorsque ceux-ci sont défaillants et convient que la prédominance du transfert diffusif *via* le COx traduit le maintien de la bonne capacité de confinement du stockage. En situation enveloppe, PSE-ENV estime que le transfert significatif de solutés par les ouvrages confirme le rôle essentiel des scellements des LSF pour s'opposer à la circulation de l'eau dans le stockage et

ainsi favoriser les transferts diffusifs via le COx. Dans cette situation enveloppe, l'impact radiologique maximal en cas de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements reste toutefois du même ordre de grandeur que pour le SEN.

En outre, PSE-ENV considère, comme l'Andra, que la défaillance précoce des conteneurs de stockage HA a des conséquences limitées en termes de performance globale du système de confinement et d'impact sanitaire du stockage, dès lors que les autres composants du stockage remplissent leurs fonctions de sûreté.

L'évaluation d'un scénario *What-if* de faille non détectée dans le quartier de stockage MA-VL met en évidence un impact significatif des radionucléides à vie longue peu mobiles (jusqu'à 22 mSv/an), et en particulier des actinides et de leurs descendants. PSE-ENV constate que cet impact, qui doit être nuancé au regard de la vraisemblance du scénario retenu et de la sévérité des hypothèses qui le fondent, reste de l'ordre de grandeur des objectifs de protection à retenir pour ce type de scénarios (1-20 mSv/an) ; ceci traduit, selon PSE-ENV, un bon niveau de robustesse du stockage en cas de présence d'une faille dans le quartier de stockage MA-VL. Des compléments devront être apportés pour confirmer l'absence d'impact d'un tel scénario dans le quartier de stockage HA au-delà de cet ordre de grandeur (engagement 2025-E6).

Par ailleurs, la performance de confinement du stockage sur le long terme en cas d'effondrement d'un alvéole MA-VL en phase d'exploitation illustre la capacité de la roche hôte à assurer ses fonctions de sûreté, malgré sa dégradation locale (exigence d'épaisseur de garde d'argilite saine de 50 m conservée), et montre ainsi la robustesse du système de stockage vis-à-vis de ce type de scénario.

Enfin, PSE-ENV souligne qu'au regard de la durée séculaire de l'exploitation de Cigéo, l'abandon du stockage avant sa fermeture, suite par exemple à des bouleversements socio-économiques, constitue un scénario possible, régulièrement soulevé par la société civile. Un tel scénario, évoqué lors de l'expertise du DOS et évalué par PSE-ENV à titre exploratoire au cours de la présente expertise, sur la base d'un travail de co-construction dans le cadre du dialogue technique mentionné *supra*, pourrait conduire à des enseignements par exemple en matière de dispositions de fermeture préventive anticipée du stockage, afin notamment de limiter l'endommagement de la roche hôte et ainsi les conséquences sur la sûreté à long terme. Il importe donc, dans cette optique, d'envisager une situation d'abandon du stockage pendant son fonctionnement (engagement 2025-E7).

Scénarios d'intrusion humaine involontaire

Les expositions radiologiques maximales d'un foreur dans des scénarios de forage au niveau du stockage, suite à une remontée de déchets (carotte) ou d'un panache de gaz radioactifs, de l'ordre de quelques mSv à quelques dizaines de mSv, ne sont pas rédhibitoires selon PSE-ENV compte tenu notamment de l'hypothèse sous-jacente de remontée de déchets en surface. De la même manière, l'exposition radiologique liée à l'utilisation d'eau contaminée après transfert sur le long terme de radionucléides à travers un court-circuit induit par un forage d'exploration abandonné et mal scellé n'atteint pas des niveaux inacceptables (maximum de quelques dizaines de mSv/an) au regard de l'objectif de protection associé à ce type de scénario. PSE-ENV considère toutefois que l'Andra devra analyser si un gain pourrait être apporté par des compartimentages supplémentaires (localisation et nombre de scellements) dans les quartiers de stockage. Ce point est repris dans la suite du présent avis.

De manière générale, au vu de l'évaluation par l'Andra de l'ensemble des scénarios d'évolution du stockage retenus et des résultats de ses propres modélisations, PSE-ENV estime que le système de stockage, dans l'architecture retenue, présente une bonne capacité globale de confinement et est robuste vis-à-vis des événements perturbateurs considérés et des incertitudes identifiées.

5. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ À L'ARCHITECTURE DU STOCKAGE

L'ASN a souligné, à l'issue de l'instruction des dossiers « ouvrages de fermeture » et « options de sûreté », que l'architecture générale du stockage (longueur des galeries, positionnement des quartiers de stockage par rapport aux LSF, etc.) pourrait apporter des marges supplémentaires pour la sûreté après fermeture en cas de défaillance d'une ou plusieurs barrières ouvragées. Aussi, l'ASN a demandé à l'Andra de justifier l'architecture retenue dans la demande d'autorisation de création par une étude des avantages et inconvénients de différentes options, en considérant les aspects relatifs à la sûreté et à la radioprotection, en exploitation et à long terme. En l'absence de

la comparaison ainsi étayée de différentes options d'optimisation de l'architecture du stockage, PSE-ENV n'est pas en mesure de se prononcer sur le caractère optimisé de l'architecture du stockage retenue au stade du DDAC, sans toutefois préjuger qu'elle ne l'est pas.

Vis-à-vis de la sûreté du stockage après fermeture, PSE-ENV estime que l'allongement de la distance entre le quartier de stockage MA-VL et la base des LSF, de 300 m au stade du DOS à 700 m dans l'architecture retenue au stade du DDAC, constitue une optimisation bénéfique. En revanche, PSE-ENV souligne, comme au stade du DOS, que l'architecture retenue fait reposer un poids supplémentaire sur les scellements des galeries, dont la performance reste à démontrer, en ne mettant pas à profit le gain avéré lié au positionnement du quartier de stockage MA-VL en aval hydraulique de la base des LSF. A cet égard, PSE-ENV convient que des critères autres que techniques en lien notamment avec l'adaptabilité du stockage puissent intervenir dans les choix effectués. En outre, il importe que le nombre (réduit de 22 à 11 depuis le DOS), la localisation et la performance des scellements de galerie dans l'architecture retenue au stade du DDAC soient justifiés au regard de leur rôle de compartimentage dans les SIHI et de redondance des scellements des LSF dans les scénarios d'évolution du stockage, dans la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique (engagement 2025-E8).

Enfin, l'hypothèse de la création, au titre de la flexibilité, d'un puits supplémentaire déporté de la base des LSF a été considérée par PSE-ENV vis-à-vis de la sûreté à long terme. Les résultats préliminaires de cette approche exploratoire tendent à montrer que l'ajout d'un tel puits est conditionné à la démonstration de la performance des scellements.

6. ADAPTABILITE DU STOCKAGE

S'agissant de l'adaptabilité de Cigéo à l'inventaire de réserve, les grands principes d'architecture du stockage retenus 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. Sur la base des résultats des évaluations de l'Andra et de ses propres modélisations, PSE-ENV considère que la capacité globale de confinement de Cigéo ne devrait pas être compromise en situation d'évolution normale du stockage. En outre, PSE-ENV estime que la sélection par l'Andra des scénarios d'évolution du stockage, bien qu'elle n'intègre pas les scénarios *What-if*, ainsi que les résultats des évaluations quantitatives associées permettent d'apprécier, en premier approche, la robustesse du stockage de l'inventaire de réserve. Cependant, si aucun élément rédhibitoire n'a été identifié à ce stade, certaines incertitudes - notamment sur la solubilité du sélénium et les propriétés hydrauliques du COx - mériteraient, comme pour l'inventaire de référence, d'être réduites afin de disposer de marges en situation enveloppe. PSE-ENV souligne ainsi l'importance de poursuivre les efforts de consolidation des données précitées, ainsi que celles relatives aux déchets de l'inventaire de réserve, en vue d'apporter le cas échéant, en temps voulu, la démonstration de sûreté du stockage de ces derniers.

S'agissant du risque de criticité à long terme associé au stockage de l'inventaire de réserve, l'Andra conclut que ce risque, pour les colis de déchets FA-VL, est couvert par les études réalisées pour les colis MA-VL de l'inventaire de référence, ce dont PSE-ENV convient compte tenu de masses de MF bien moindres. Pour ce qui concerne les CU, l'Andra retient des modèles d'évolution du stockage analogues à ceux considérés pour l'inventaire de référence, qui appellent par conséquent des commentaires du même ordre de la part de PSE-ENV (cf. *supra*). Pour l'étude des modèles dès la fermeture du stockage ou à plus long terme (géométrie annulaire issue de la migration de la MF), les résultats tendent à montrer que la démonstration de la maîtrise du risque de criticité devrait pouvoir être apportée pour le stockage de la plupart des types de CU. En revanche, pour la phase intermédiaire d'évolution du stockage, PSE-ENV relève l'absence de marge vis-à-vis du risque de criticité pour la plupart des CU, alors même que l'Andra n'a pas considéré le cumul possible des dégradations des CU (déformation des assemblages combustibles, perte d'épaisseur partielle ou totale d'un de leurs composants, etc.). A cet égard, PSE-ENV rappelle que, dans les installations en amont du stockage des CU, le maintien de leur géométrie est en général le mode de contrôle retenu pour la maîtrise du risque de criticité, dans la mesure où la masse de MF qu'ils contiennent est supérieure, voire très supérieure dans le cas des CU les plus courants, à la masse de MF critique dans une géométrie quelconque. PSE-ENV estime donc substantiels les efforts à fournir par l'Andra pour atteindre la démonstration de l'absence de risque de criticité dans la phase intermédiaire d'évolution pour le stockage des CU. Aussi, en complément des efforts de démonstration poursuivis par l'Andra,

PSE-ENV l'encourage à identifier des dispositions complémentaires de maîtrise du risque de criticité, telles que la diminution de la masse de MF dans les alvéoles, à l'instar de celle déjà envisagée pour certains CU, ou encore la valorisation de caractéristiques favorables vis-à-vis du risque de criticité résultant de l'irradiation des assemblages (burn-up) et de leur vieillissement.

7. CONCLUSION

En conclusion du troisième volet de l'expertise du DDAC dédié à la sûreté après fermeture du stockage, PSE-ENV estime que la démonstration de sûreté de Cigéo après sa fermeture a atteint le niveau de maturité requis au stade d'une demande d'autorisation de création d'un stockage. PSE-ENV souligne la pertinence de la démarche retenue par l'Andra pour évaluer la sûreté de Cigéo après sa fermeture, fondée sur l'examen de sa performance de confinement *via* des scénarios d'évolution du stockage déduits d'une analyse globalement satisfaisante des risques sur le long terme et des incertitudes associées à la performance de ses composants. L'évaluation du scénario d'évolution normale du stockage montre une bonne capacité de confinement du système de stockage. La poursuite des efforts de consolidation des connaissances, en particulier relatives à la solubilité du sélénium ou encore aux propriétés hydrauliques de la formation géologique du COx, reste toutefois nécessaire afin de dégager des marges par rapport aux objectifs de protection radiologique. Les scénarios de dysfonctionnement des scellements ou des conteneurs de stockage HA, ainsi que d'effondrement d'un alvéole durant la phase d'exploitation, qui conduisent à des performances de confinement dégradées, présentent des impacts sanitaires du même niveau qu'en SEN. Ces impacts peuvent néanmoins être plus élevés pour les scénarios postulant une faille non détectée dans le quartier de stockage MA-VL ou une intrusion humaine involontaire, sans pour autant être inacceptables au regard de la très faible vraisemblance des scénarios retenus et de la sévérité des hypothèses qui les fondent. Au vu de l'ensemble de ces éléments, PSE-ENV estime que le système de stockage, dans l'architecture retenue, est robuste vis-à-vis des risques et incertitudes liées à son évolution. En outre, PSE-ENV convient que les évaluations des impacts environnementaux, tant radiologiques que chimiques, ainsi que des impacts sanitaires chimiques, sont très faibles.

En revanche, en l'absence d'une comparaison étayée entre plusieurs options d'architecture au regard de critères relatifs à la sûreté en exploitation et après fermeture, déjà soulignée par l'ASN à l'issue de l'expertise du DOS, PSE-ENV ne peut se prononcer sur le caractère optimisé de l'architecture du stockage retenue au stade du DDAC, sans toutefois préjuger qu'elle ne le soit pas. Du point de vue de la sûreté après fermeture, PSE-ENV souligne en particulier que cette architecture confère une importance supplémentaire aux scellements des galeries en ne mettant pas à profit le gain avéré d'un positionnement du quartier de stockage MA-VL en aval hydraulique des LSF. A cet égard, PSE-ENV considère que la justification du nombre et de la localisation des scellements des galeries dans l'architecture retenue, en intégrant une analyse de sensibilité de leur performance, reste à apporter.

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

En conclusion générale, à l'issue des trois volets de l'expertise du DDAC, PSE-ENV souligne les avancées notables depuis le DOS de la démonstration de sûreté de Cigéo, tant dans la constitution du socle de connaissances qui la fonde, que dans son évaluation en phase d'exploitation et après fermeture. PSE-ENV estime ainsi que cette démonstration a atteint le niveau de maturité requis à ce stade pour la plupart de ses composantes. Les compléments et consolidations identifiés comme nécessaires à l'issue de l'expertise du DDAC devront faire l'objet de rendez-vous d'évaluation en amont de la prochaine grande étape réglementaire de mise en service de l'installation actuellement envisagée par l'Andra à l'horizon 2050 (par exemple avant le début du creusement, avant la construction du premier alvéole...). Ceux-ci concernent notamment les propriétés de la roche hôte au droit des structures profondes détectées dans le nord du quartier HA, la sûreté du stockage des déchets bitumés, de la fermeture des alvéoles MA-VL et de l'exploitation des alvéoles HA, les dispositions de surveillance des ouvrages pendant la phase d'exploitation, ainsi que les scellements. A cet égard, PSE-ENV confirme que la phase industrielle pilote est désormais indispensable pour compléter et consolider la démonstration de sûreté, sur la

base notamment de démonstrateurs réalisés *in situ* dans des conditions d'environnement et de fonctionnement industriel, en vue de la mise en service de l'installation.

Enfin, PSE-ENV estime que la flexibilité de l'installation constitue un enjeu fondamental afin de garantir la gestion sûre de l'ensemble des déchets de l'inventaire de référence, y compris en cas d'évolution de l'architecture ou de la conception de l'installation considérées au stade de la DAC. S'agissant de l'adaptabilité de Cigéo à l'inventaire de réserve, PSE-ENV n'identifie pas, à ce stade des études, de point réhibitoire lié à la sûreté du stockage des CU et des déchets FA-VL. PSE-ENV rappelle que dans le cas où il serait envisagé d'y stocker d'autres déchets que ceux autorisés par un décret pris sur la base du dossier objet de la présente expertise, une démonstration de sûreté complémentaire devra être apportée.

Pour le Directeur de la recherche et
de l'expertise en environnement

Delphine PELLEGRINI
Adjointe au Directeur

Annexe 1

Engagements pris par l'Andra au cours de l'expertise du GP3 par lettre CG-AMOA-LET-25-0007 du 28 mai 2025

Engagement n°2025-E 1

L'Andra consolidera, à l'échéance de la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, sa démonstration de l'absence du risque de criticité en après-fermeture :

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

Engagement n°2025-E 2

L'Andra complètera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, l'analyse de sûreté-criticité après fermeture des C&E :

- Soit en justifiant que la modélisation retenue est enveloppe de l'évolution phénoménologique, par exemple en prenant en compte la présence éventuelle d'un « mélange » d'eau et de béton à long terme (si le modèle constitué d'un milieu infini est conservé) ;
- Soit en démontrant la maîtrise du risque de criticité au moyen d'une configuration analogue à celles des autres types de déchets MA-VL après migration (plaques de matières fissiles modérées par de l'eau et regroupées au fond des colis ou de l'alvéole).

Engagement n°2025-E 3

L'Andra complètera, avant le creusement des ouvrages souterrains, sa démonstration du caractère enveloppe du SMPP en postulant des séismes :

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

Engagement n°2025-E 4

L'Andra confirmera l'absence d'impact significatif en évaluant avant l'enquête publique, la contribution à la dose aux exutoires du ^{14}C présent sous forme gazeuse dans le stockage pendant le transitoire hydraulique-gaz.

Engagement n°2025-E 5

L'Andra objectivera, pour la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique, la conclusion d'absence de risque sanitaire fondée sur le respect des normes de qualité réglementaires (NQ) et notamment les normes de potabilité. A ce titre, elle quantifiera, pour le SEN et les SEA, les quotients de danger (QD) et excès de risque individuels (ERI) pour les substances toxiques chimiques présentes à l'exutoire.

Engagement n°2025-E 6

L'Andra consolidera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, l'évaluation du scénario What-if « discontinuité traversante », en tenant compte d'une discontinuité au sein du quartier de stockage HA et de l'ensemble des radionucléides mobiles et peu mobiles d'intérêt, dont les éléments transuraniens et leur filiation.

Engagement n°2025-E 7

L'Andra présentera, en sus de l'évaluation de sûreté après-fermeture dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, une situation d'abandon du stockage pendant son

fonctionnement. L'Andra identifiera, le cas échéant, les enseignements notamment en ce qui concerne les modalités d'une éventuelle fermeture préventive anticipée du stockage, permettant de limiter les conséquences de telles situations sur la sûreté à long-terme.

Engagement n°2025-E 8

L'Andra justifiera, pour la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique, le nombre, la localisation et la performance des scellements des galeries dans l'architecture à terminaison, et en particulier des évolutions depuis le DOS. Cette justification se fera au regard des fonctions à assurer par les scellements, notamment vis-à-vis du compartimentage dans les scénarios d'intrusion humaine involontaire.