

**GROUPE PERMANENT D'EXPERTS
POUR LES DECHETS**

**Avis relatif au dossier de demande d'autorisation de
création du projet Cigéo - "GP3" - Evaluation de la
sûreté après fermeture et conclusion générale**

Réunion tenue à Montrouge les 25 et 26 juin 2025

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN – maintenant ASNR) a requis que l'expertise du dossier de demande d'autorisation de création (DDAC) de l'installation de stockage réversible en couche géologique profonde de déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), dénommée Cigéo, soit organisée selon trois groupements thématiques : les données de base retenues pour l'évaluation de sûreté de Cigéo, la sûreté en phase d'exploitation des installations de surface et souterraine et la sûreté en phase d'après fermeture.

Le DDAC, transmis par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) en janvier 2023, inclut notamment la version préliminaire du rapport de sûreté, les études de maîtrise des risques, l'étude d'impact, le plan directeur de l'exploitation de Cigéo, la version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis, le plan de développement de l'INB de stockage, ainsi que des notes conceptuelles et des référentiels de connaissances thématiques.

Conformément à la demande de l'ASNR, formulée par lettre ASNR CODEP-DRC-2025-022314 du 13 mai 2025, le groupe permanent d'experts pour les déchets (GPD), avec l'appui 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), a examiné les 25 et 26 juin 2025, le troisième groupement thématique (GP3). Cet examen a notamment porté sur la démarche de sûreté en après fermeture, l'évaluation de la performance du système de stockage et l'estimation des conséquences, ainsi que sur les réponses de l'Andra à ses engagements 2024-E12 relatif à la corrosion des aciers et 2024-E41 concernant le spectre sismique de dimensionnement pour la phase d'exploitation, pris à l'issue des expertises GP1 et GP2.

L'ASNR a également demandé, par lettre précitée, que le groupe permanent conclue, à l'issue de ces trois réunions d'examen du projet Cigéo, sur la maturité globale du projet, sur les éléments transmis par l'Andra relatifs au déroulé, aux objectifs et aux limitations de la phase industrielle pilote, et sur l'absence de point rédhibitoire au stockage de l'inventaire de réserve.

Le groupe permanent a entendu les conclusions de l'expertise de la Direction de la recherche et de l'expertise en environnement (PSE-ENV) de l'ASNR, établies sur la base du dossier précité et des éléments complémentaires apportés par l'Andra au cours de l'instruction technique. Le groupe permanent a également pris connaissance des engagements de l'Andra auprès de l'ASNR, formulés par lettre Andra CG-AMOA-LET-

25-0007 du 28 mai 2025, et a entendu ses explications et commentaires présentés en séance.

*

* *

Démarche de sûreté en après-fermeture

La démarche d'évaluation de la sûreté en après-fermeture de Cigéo mise en œuvre par l'Andra comprend une analyse des risques et des incertitudes liés à l'évolution du stockage, suivie d'une évaluation de sa capacité de confinement, intégrant ces risques et incertitudes via des scénarios d'évolution du stockage. Le respect des objectifs de protection est vérifié sur la base des impacts sanitaires et environnementaux estimés pour ces scénarios. Le groupe permanent estime que cette démarche, qui s'inscrit dans la continuité des éléments présentés au stade du dossier d'options de sûreté (DOS), est cohérente avec le guide n°1 de l'ASNR et les pratiques internationales en vigueur.

Pour le scénario d'évolution normale (SEN), qui représente l'évolution prévisible du stockage, l'Andra évalue une situation de référence, ainsi qu'une situation enveloppe fondée sur des données conservatives et des hypothèses pénalisantes qui conduisent à majorer les transferts de solutés. Le groupe permanent estime adaptée la combinaison de ces deux situations, qui renseigne sur l'impact attendu du stockage au regard des connaissances actuelles tout en mettant en exergue la part associée au caractère pénalisant des estimations. Cette approche permet ainsi d'identifier les besoins d'approfondissement des connaissances en vue d'apprécier les conservatismes et les marges par rapport aux objectifs de protection. Outre le SEN, l'Andra étudie des évolutions altérées du stockage tenant compte d'événements perturbateurs (scénarios d'évolution altérée (SEA) et *What-if*¹), en considérant les situations de référence et enveloppe. Le groupe permanent relève que la prise en compte dans des scénarios dédiés d'une défaillance des scellements ou des conteneurs de stockage HA intègre les incertitudes liées aux performances des scellements et des conteneurs. Le groupe permanent note avec satisfaction que l'Andra évalue des scénarios supplémentaires par rapport au DOS d'effondrement d'un alvéole MA-VL en phase d'exploitation ou encore de faille dans le Callovo-Oxfordien (COx). Enfin, l'Andra considère des scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI) qui postulent un forage au niveau du stockage, conformément aux préconisations des guides nationaux et internationaux en la matière. Aussi, le groupe permanent estime que la sélection par l'Andra des scénarios

¹ Les scénarios *What-if* (« Et si ? ») permettent d'explorer des situations extrêmes ou inattendues mais susceptibles d'avoir des conséquences significatives.

d'évolution du stockage, qui couvre bien les risques et les incertitudes identifiés, est pertinente pour évaluer la sûreté de Cigéo après sa fermeture et pour en éprouver la robustesse.

S'agissant des conséquences liées à l'évolution du climat sur le long terme, l'Andra définit, sur la base d'études d'évolutions du climat cohérentes avec les pratiques internationales et d'un modèle d'évolution géoprospective examiné lors du GP1, les exutoires et les biosphères à considérer pour les estimations d'impact radiologique. Le groupe permanent estime approprié le choix de l'Andra de retenir un exutoire après mise à affleurement de l'Oxfordien par érosion (représenté par la rivière de l'Ornain), ainsi que des biosphères chaude et froide de manière à encadrer les incertitudes liées à la prédiction climatique sur le long terme.

Le groupe permanent estime que le travail de préfiguration engagé par l'Andra pour la préservation de la mémoire de Cigéo en phase d'exploitation et de post-fermeture est satisfaisant au stade actuel de développement du projet et doit se poursuivre.

Enfin, le groupe permanent rappelle que les modalités de déclassement de Cigéo, seront précisées ultérieurement par les autorités.

Evaluation des performances du système de stockage

S'agissant de l'analyse des risques internes et externes après fermeture du stockage, le présent examen de la maîtrise du risque de criticité et des risques liés à l'aléa sismique complète l'examen d'autres risques objet des GP1 et GP2. L'Andra retient une exigence d'exclusion d'une occurrence d'une excursion critique afin de préserver la roche hôte et fonde sa démonstration sur l'étude de l'influence des évolutions envisageables des colis et alvéoles à long terme sur la masse critique de matière fissile. Pour ce faire, les masses critiques sont déterminées par colis dans différents modèles d'évolution du stockage et sont comparées aux valeurs du critère de masse maximale de matière fissile admissible par colis définies dans les spécifications d'acceptation. Les masses critiques ainsi déterminées par colis sont toutes supérieures aux valeurs du critère précité, sauf pour un nombre très limité de colis qui feront l'objet d'une étude particulière. Le groupe permanent considère que ceci va dans le sens d'une absence de criticité après fermeture du stockage pour l'inventaire de référence. Toutefois, le groupe permanent estime que l'exclusion d'une occurrence d'une excursion critique, si elle est satisfaisante sur le principe, peut toutefois s'avérer délicate à démontrer eu égard aux échelles de temps à considérer. A ce stade du dossier, il considère que l'Andra doit conforter sa démonstration en retenant des scénarios raisonnablement enveloppes basés sur la connaissance de l'évolution phénoménologique du stockage.

Par ailleurs, pour évaluer les effets d'un séisme après fermeture et dimensionner les scellements, l'Andra retient le séisme maximum physiquement possible. Le groupe permanent estime que la démonstration de son caractère enveloppe reste à conforter, avant le creusement des ouvrages souterrains, vis-à-vis de séismes pouvant se produire entre 2 et 5 km de profondeur ou liés à l'hypothèse d'une origine tectonique des structures détectées dans le Trias. Le groupe permanent note qu'un engagement a été pris par l'Andra sur le sujet.

S'agissant de l'analyse de la capacité de confinement du stockage, les calculs de l'Andra en SEN montrent que la plupart des radionucléides sont fortement retardés par sorption et/ou précipitation dans le COx et, s'agissant de ceux dont la période radioactive est faible au regard des temps de transfert, atténués par décroissance. Comme au stade du DOS, les principaux contributeurs au débit molaire en sortie du COx sont l'¹²⁹I et le ³⁶Cl, radionucléides à vie longue, mobiles et solubles, ainsi que le ⁷⁹Se selon la forme chimique considérée. A cet égard, le groupe permanent relève les hypothèses particulièrement pénalisantes désormais retenues par l'Andra en situation enveloppe, s'agissant de la spéciation du ⁷⁹Se. Dans les deux situations du SEN, l'Andra conclut à la prépondérance du transfert par diffusion via la voie « COx » par rapport à celui via la voie « ouvrages » (galeries et liaison surface-fond (LSF)). Le groupe permanent estime que ces résultats, corroborés par les modélisations de PSE-ENV, démontrent la bonne capacité de confinement du stockage lors de son évolution normale.

S'agissant des SEA et *What-if*, le groupe permanent relève que la défaillance précoce des conteneurs de stockage HA ou l'effondrement d'un alvéole MA-VL pendant la phase d'exploitation n'altèrent pas la performance globale de confinement du stockage. Par ailleurs, les résultats de l'évaluation de différents scénarios postulant la défaillance des scellements de galerie ou des LSF confirment, selon le groupe permanent, la nécessité de disposer de scellements performants pour limiter la circulation de l'eau dans les ouvrages et ainsi favoriser les transferts diffusifs via le COx. En outre, le groupe permanent relève que l'évaluation pénalisante de scénarios *What-if* de faille non détectée dans le COx interceptant des alvéoles MA-VL met en évidence un transfert significatif des radionucléides via le court-circuit hydraulique postulé sans toutefois remettre en cause la robustesse du système de stockage. Il en est de même en cas de forage d'exploration abandonné et mal scellé au niveau du stockage (SIHI). Enfin, le groupe permanent note que l'Andra s'est engagée en réponse à une demande sociétale à considérer un scénario d'abandon du stockage pendant son exploitation

dans l'objectif d'identifier, le cas échéant, des modalités de fermeture anticipée du stockage qui en limiteraient les conséquences sur la sûreté à long terme, ce qui est satisfaisant compte tenu de la durée séculaire de son exploitation.

Le groupe permanent considère que l'évaluation des performances du système de stockage atteste de la robustesse de l'architecture actuellement retenue par l'Andra. Toutefois, s'agissant de l'optimisation de cette architecture vis-à-vis de la sûreté en phase d'exploitation et en après fermeture, l'Andra a étudié l'incidence de la longueur des galeries sur les gains possibles en termes de performance de confinement, mais n'a pas répondu à l'ensemble de la demande du GPD et de l'ASN. Le dossier de l'Andra doit donc être complété en particulier sur le positionnement du quartier de stockage MA-VL par rapport aux LSF. L'Andra devra également justifier le nombre et la localisation des scellements de galerie, ce qui constitue l'objet d'un engagement.

Estimation des conséquences

Sur la base des débits de solutés estimés au toit du CO_x lors de l'évaluation de performance du stockage pour chaque scénario, l'Andra estime l'impact sur les personnes jugées représentatives de la population dans chaque biosphère considérée, exposées notamment par ingestion d'eau destinée à la consommation ou par consommation de denrées contaminées par l'irrigation, ainsi que l'impact à l'environnement, puis le compare aux objectifs de protection sanitaires et environnementaux. Le groupe permanent considère que la méthodologie d'évaluation des impacts sanitaires radiologiques et environnementaux, ainsi que les objectifs qualitatifs de protection associés sont globalement cohérents avec les guides en vigueur. S'agissant d'objectifs quantitatifs, le groupe permanent considère, en cohérence avec les préconisations de la CIPR, que le niveau de référence à retenir pour les scénarios *What-if* et les SIHI est celui recommandé pour les situations d'exposition existantes (1-20 mSv/an) et retient que la distribution des doses en cas d'événement perturbateur naturel sévère ou d'une intrusion humaine involontaire doit être appréciée en fonction de ce niveau de référence. Ce niveau doit être considéré comme un ordre de grandeur et non comme une valeur seuil ne pouvant être excédée. Pour rappel, la vocation de ces scénarios réside essentiellement dans la vérification de la robustesse du système de stockage et si jugé opportun, l'identification de mesures d'optimisation de sa conception. Pour ce qui concerne l'impact sanitaire des substances toxiques chimiques, le groupe permanent estime que des compléments méthodologiques sont nécessaires afin de ne pas limiter l'exercice à la comparaison entre les concentrations maximales aux exutoires et les normes de qualité environnementales. Ces compléments ne sont pas de nature, selon le groupe

permanent, à remettre en cause le niveau très faible estimé par l'Andra des incidences dues à ces substances.

Dans le cas du SEN, les impacts sanitaires radiologiques restent inférieurs, ou du même ordre de grandeur pour l'impact maximal en situation enveloppe, à l'objectif de protection (0,25 mSv/an comme contrainte de dose pendant 10 000 ans puis comme valeur de référence). Le groupe permanent estime que cette évaluation en situation enveloppe met en évidence le besoin, afin de disposer de marges par rapport à cet objectif de protection, de poursuivre les efforts de consolidation des connaissances, en particulier celles relatives à la mobilité du sélénium ainsi qu'aux propriétés hydrauliques du COx. En outre, le groupe permanent relève que, pour vérifier que la dose au-delà d'un million d'années ne conduirait pas à un impact inacceptable pour la population, l'Andra a estimé les doses maximales théoriques associées aux principaux radionucléides dont le pic de débit molaire au toit du COx apparaît après un million d'années (¹³⁵Cs et ²³⁸U et ses descendants) et convient qu'elles sont significativement inférieures à l'impact maximal induit principalement par le ⁷⁹Se avant un million d'années. Enfin, le groupe permanent estime, comme l'Andra, que l'impact environnemental est négligeable dans le domaine d'évolution normale du stockage.

S'agissant des scénarios SEA, What-if et SIHI, les scénarios de défaillance des scellements ou des conteneurs de stockage HA, ou encore d'effondrement d'un alvéole durant la phase d'exploitation, conduisent à des impacts sanitaires du même ordre de grandeur que le SEN. Le groupe permanent relève que ces impacts sont plus élevés (de l'ordre de quelques dizaines de mSv par an en situation enveloppe) pour les scénarios postulant un forage ou une faille dans le quartier de stockage MA-VL. Ces niveaux d'exposition sont compatibles avec les objectifs de protection visés précités compte tenu de la très faible vraisemblance des scénarios retenus et de la sévérité des hypothèses qui les fondent. En termes de robustesse, le groupe permanent estime que l'Andra devra évaluer le degré de conservatisme en traitant la situation de référence en sus de la situation enveloppe et analyser les gains potentiels, en particulier à long terme, d'un compartimentage procuré par des scellements de galerie supplémentaires (localisation et nombre de scellements) en cas de forage d'exploration abandonné et mal scellé au niveau du stockage.

Etudes d'adaptabilité

L'Andra retient pour le stockage de l'inventaire de réserve, qui inclut des combustibles usés (CU) et des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) ainsi que les déchets

HA et MA-VL issus de la prolongation de l'exploitation des réacteurs jusqu'à 60 ans et du déploiement de six EPR2, des grands principes d'architecture identiques à ceux déclinés pour les déchets HA et les déchets MA-VL. Le groupe permanent constate que les résultats des évaluations quantitatives de l'Andra et de PSE-ENV ne mettent pas en évidence de point rédhibitoire en termes de sûreté après fermeture au stockage de l'inventaire de réserve à ce stade. Toutefois, s'agissant du risque de criticité, le groupe permanent considère que l'Andra devra examiner les conséquences des cumuls de dégradations dans la durée affectant la géométrie des CU.

Réponses aux engagements et demandes émis lors des GP1 et GP2

L'Andra a bien répondu à la demande du groupe permanent en transmettant une note descriptive du programme de recherche sur la corrosion des composants métalliques des alvéoles HA (MREA)², qui intègre de nouvelles formulations du matériau cimentaire destiné à remplir l'espace annulaire entre la roche et le chemisage des alvéoles HA. Le groupe permanent souligne le bien-fondé de ce programme en termes de démarche expérimentale et de conditions représentatives de celles attendues en stockage. Les réserves émises à l'issue de l'examen du GP1 sur le dimensionnement de ces composants métalliques ne pourront être levées qu'au terme de ce programme. De plus, le groupe permanent note que l'Andra poursuit les recherches exposées en GP1 sur les solutions alternatives à l'usage du MREA, ce qui est satisfaisant.

Le groupe permanent note que le spectre de dimensionnement révisé pour la phase d'exploitation du stockage couvre de manière satisfaisante les incertitudes relatives à la définition de l'aléa sismique.

*

* *

En conclusion de l'examen du GP3, le groupe permanent estime que la démonstration de sûreté de Cigéo après sa fermeture est satisfaisante pour ce stade de développement du projet compte tenu des engagements pris par l'Andra et sous réserve de la prise en compte des observations faites dans le présent avis. Il considère que le système de stockage, dans l'architecture retenue, présente une bonne capacité globale de confinement et est robuste vis-à-vis de l'ensemble des risques et incertitudes considérés.

² MREA : Matériau de Remplissage de l'Espace Annulaire de l'alvéole

*

* *

Conclusion générale sur le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo

En liminaire, le groupe permanent rappelle que le code de l'environnement prévoit dans son article L. 542-1-2 que les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur fassent l'objet d'un stockage en couche géologique profonde. Le groupe permanent s'est attaché lors de son examen du DDAC à s'assurer de la sûreté de Cigéo en considérant les besoins de la filière de gestion des déchets.

A l'issue de l'examen par le GP des trois groupements thématiques définis par l'ASNR, le groupe permanent estime que les connaissances acquises par l'Andra relatives au site de Meuse/Haute-Marne, aux composants du système de stockage et à leur évolution à long terme, ainsi qu'aux inventaires de colis de déchets constituent une base solide pour fonder la démonstration de sûreté sur la base de l'architecture du stockage retenue. En outre, le groupe permanent souligne les avancées de cette démonstration s'agissant des risques en exploitation et des études relatives à la récupérabilité des colis de déchets en alvéoles. Enfin, le volet après fermeture de la démonstration de sûreté de Cigéo traduit la bonne capacité de confinement du système de stockage et son comportement robuste vis-à-vis des risques et incertitudes liés à son évolution à long terme. S'agissant des spécifications d'acceptation des colis de déchets, le groupe permanent estime que leur version préliminaire retient des exigences cohérentes avec la connaissance des colis de déchets de l'inventaire de référence, avec les bases de conception du stockage ainsi qu'avec les hypothèses et résultats des évaluations de sûreté en exploitation et en après fermeture.

Aussi, de manière générale, le groupe permanent estime que la démonstration de sûreté de Cigéo en exploitation et après sa fermeture a globalement atteint le niveau de maturité requis à ce stade, pour l'architecture retenue dans le DDAC, et doit désormais être complétée et consolidée. A cet égard, le groupe permanent rappelle la spécificité, par rapport aux autres INBs, du projet Cigéo, eu égard notamment à sa dimension temporelle, et que Cigéo dispose d'une phase industrielle pilote d'une durée estimée à une trentaine d'années à partir de la délivrance du décret d'autorisation de création, destinée à asseoir sa démonstration de sûreté au moyen d'études et d'essais réalisés dans l'environnement géologique immédiat des ouvrages de stockage et dans

des conditions représentatives de son fonctionnement industriel. Durant cette période, le groupe permanent souhaite que les points majeurs qu'il a soulevés au cours de l'examen du DDAC fassent l'objet de rendez-vous d'évaluations programmés.

En particulier, les compléments susceptibles de conduire à des modifications de conception, tels que la consolidation des connaissances des propriétés de la roche hôte au droit des structures profondes détectées au nord du quartier HA, l'évolution de dispositions de compartimentage et d'intervention en cas d'incendie, la démonstration de la sûreté de l'exploitation des alvéoles HA et de la fermeture des alvéoles MA-VL, ainsi que les dispositions de surveillance, devront faire l'objet d'une évaluation avant le creusement des ouvrages concernés. S'agissant des ouvrages de fermeture, composants essentiels du système de confinement à long terme, des éléments complémentaires sont nécessaires en vue de rendez-vous d'évaluation au cours de la phase industrielle pilote. Concernant les déchets bitumés l'examen de leur condition de stockage doit se poursuivre.

Le groupe permanent considère que ces compléments devront être pris en compte dans l'établissement du programme de la phase industrielle pilote, dont les objectifs et critères de réussite restent préliminaires à ce stade. En vue de la réalisation de ce programme, le groupe permanent souligne que l'Andra devra conforter son organisation pour maîtriser les risques projets. En outre, le groupe permanent considère que la flexibilité de Cigéo est une caractéristique essentielle du projet afin notamment que des évolutions d'architecture, de conception, ou de nouvelles technologies d'intérêt puissent, le cas échéant, y être intégrées sans en compromettre la sûreté.

Enfin, le groupe permanent n'a pas identifié, à ce stade des études d'adaptabilité de Cigéo, de point rédhibitoire au stockage de l'inventaire de réserve. Le groupe permanent rappelle que la demande de DAC porte sur l'inventaire de référence et que l'éventuel stockage de l'inventaire de réserve fera l'objet de dossiers dédiés. L'adaptation de l'installation dans la durée à d'autres évolutions possibles que celles retenues actuellement dans l'inventaire de réserve (prolongation de l'exploitation des réacteurs au-delà de 60 ans, huit EPR2 supplémentaires, SMR, RNR...) sera à examiner dans le cadre d'études d'optimisation des filières de gestion de déchets et des décisions à venir.

Membres du GPD ayant participé à la rédaction de l'avis

Mme COMETS Présidente
M. LALIEUX Vice-président

M. BESNUS
M. BOUTIN
M. CHARLES
Mme CONTE
M. CZWARTKOWSKYJ
M. EGAN
M. FILLION
M. FORBES
M. GAGNER
M. GHOREYCHI
M. GRAMBOW
M. GUERFI
Mme JOUVE
M. KAZMIERCZAK
Mme MARRY
M. MONTALANT
M. PESCATORE
M. REBOUR
M. REGENT
M. SENTIS
Mme TALLEC
Mme TELLECHEA-ADER
Mme THOLEN
M. VANDERPERRE
Mme VIALA
M. VOLCKAERT

Membres du GPU ayant participé à la rédaction de l'avis

M. CHARLES Vice-président

M. BLANCHARD
Mme CONTE
M. CORTES
M. DUTZER
M. GAVILLET
M. SIDANER

Membres du GPRP ayant participé à la rédaction de l'avis

M. FOURNIER