



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 29 novembre 2024

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2024-00167

Objet	: Demande d'autorisation de création de Cigéo – "GP2" – Evaluation de la sûreté en exploitation
Réf.	: 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

Par lettre citée en référence, 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 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 demandé une expertise du DDAC structurée autour de trois groupements 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 des installations de surface et souterraine (expertise « GP2 ») ;
- 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 GP2. 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 fonctionnement jusqu'à la fermeture du stockage, comprenant notamment les objectifs de sûreté, les activités et éléments importants pour la protection ainsi que leur qualification, l'identification et le classement des scénarios incidentels et accidentels, la définition des domaines de fonctionnement, la stratégie de surveillance de l'installation souterraine ;

MEMBRE DE
ETSON

- l'évaluation des risques d'origine nucléaire (exposition des travailleurs, criticité, dissémination des substances radioactives), ainsi que des agressions internes (incendie, explosion, manutention, inondation d'origine interne, perte d'auxiliaires de puissance, risques liés à la coactivité) et externes (séisme, aléas météorologiques, chute d'avion, impact des activités industrielles, inondation externe, etc.) ;
- la méthodologie et les résultats de l'évaluation des impacts radiologiques et chimiques sur l'homme et l'environnement associés aux différentes situations de fonctionnement.

Les sujets relatifs au développement de Cigéo, tels que les principes organisationnels pour le passage de la phase de conception à celle de réalisation, la stratégie de fermeture, la flexibilité et les études d'adaptabilité, également mentionnés dans la saisine de l'ASN, sont intégrés à la présente expertise. L'analyse des dispositions relatives à la mémoire est reportée au GP3.

En outre, 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, avec l'objectif double de tenir compte des préoccupations de la société civile pour rendre plus robuste l'expertise de l'IRSN 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'instruction, l'IRSN retient les principaux éléments développés ci-après. Les recommandations qui en résultent, ainsi que les engagements pris par l'Andra auprès de l'ASN à l'issue de cette expertise, sont listés de manière exhaustive en annexes au présent avis, et sont pour certains mentionnés dans le présent avis. Les échéances associées concernent pour la plupart des étapes ultérieures du projet, conditionnées par la promulgation du décret d'autorisation de création. La mise en service de l'installation, qui permettra la réception du premier colis de déchets radioactifs, constitue une échéance majeure du point de vue de la sûreté. Celle-ci étant actuellement prévue par l'Andra à l'horizon 2050, le rapport préliminaire de sûreté pourrait faire l'objet d'une révision avant celle due en support à la demande de mise en service ; les avancées des travaux requis, selon l'IRSN, pour la mise en service pourraient dès lors être documentées lors ces révisions. La construction de l'installation (premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, début du creusement des liaisons surface-fond, premier alvéole HA et premier alvéole MA-VL) forme un ensemble d'autres jalons d'importance en termes de sûreté, mentionnés dans le présent avis lorsque leurs échéances sont visées.

Cette expertise de l'IRSN sera présentée aux membres du groupe permanent d'experts pour les déchets (GPD) lors de leur réunion des 10 et 11 décembre 2024, 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. DEMARCHE DE SURETE ET DE RADIOPROTECTION

La démarche de sûreté et de radioprotection en exploitation retenue par l'Andra, afin de protéger la santé des personnes et de l'environnement contre les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques, est fondée sur les fonctions de sûreté que l'installation doit réaliser et la définition d'objectifs de protection des travailleurs et du public. Dans un premier temps, l'Andra analyse les risques internes d'origine nucléaire et les agressions internes ou externes (cf. chapitre 2 ci-après) pour identifier les événements non souhaités pouvant mener l'installation hors de son fonctionnement normal et remettre en cause une fonction de sûreté ; elle définit ensuite des moyens techniques et organisationnels pour maîtriser ces risques, en appliquant notamment le principe de défense en profondeur. Parmi ces moyens, elle sélectionne les activités et

éléments importants pour la protection des intérêts¹ (AIP, EIP), en lien notamment avec les fonctions de sûreté, et y associe des exigences. Dans un second temps, l'Andra classe les événements non souhaités susceptibles de conduire à un risque radiologique par familles de situations dites « de fonctionnement »² selon l'estimation de leur vraisemblance puis vérifie, pour chaque famille, la suffisance des dispositions retenues vis-à-vis des objectifs de protection. L'IRSN estime que la démarche de sûreté retenue par l'Andra, cohérente avec l'état de l'art, est satisfaisante sur le plan des principes. Les objectifs de protection retenus par l'Andra, globalement similaires à ceux retenus au stade du dossier d'options de sûreté (DOS), n'appellent pas de remarque particulière de la part de l'IRSN.

S'agissant de la déclinaison de cette démarche, l'IRSN estime que le caractère peu vraisemblable de certaines situations accidentelles du domaine d'extension du dimensionnement, ainsi que l'absence de dispositions complémentaires qui pourraient raisonnablement être mises en place, ne sont pas suffisamment objectivés à ce stade. L'exclusion d'un scénario doit quant à elle être fondée sur des exigences de conception, de réalisation et d'exploitation qui rendent ce scénario extrêmement improbable avec un haut degré de confiance. Aussi, l'IRSN considère que la classification des scénarios devra être consolidée en ce sens (engagement 2024-E17). Par ailleurs, en termes de capacité des EIP à assurer les fonctions qui leurs sont assignées, la stratégie de qualification des EIP inaccessibles devra être présentée avant le début du creusement des liaisons surface-fond (engagement 2024-E21). De manière plus générale, eu égard au déploiement progressif de Cigéo, il importe que les critères et méthodes de qualification de ces EIP soient définis et présentés préalablement à leur réalisation (engagement 2024-E22).

L'Andra a mis en place une démarche d'identification des opérations de gestion des situations accidentelles et post-accidentelles, dont le retrait de colis, ce qui est satisfaisant. Toutefois, bien que la conception de Cigéo vise à exclure une situation de contamination notable de l'installation souterraine, l'IRSN estime nécessaire, au titre de la défense en profondeur, que l'Andra postule une telle situation, afin d'identifier les dispositions de gestion supplémentaires le cas échéant et ainsi de s'assurer qu'une telle situation ne conduirait pas à une impossibilité de reprise de l'exploitation dans des conditions de sûreté et de radioprotection appropriées. Ce point fait l'objet de la recommandation n°1 en annexe au présent avis.

S'agissant de la surveillance de l'installation, la stratégie retenue par l'Andra fait notamment appel à différentes méthodes de mesure redondantes et complémentaires ainsi que, pour les alvéoles, à des mesures déportées dans des ouvrages témoins. L'IRSN considère que cette stratégie et l'identification des paramètres à surveiller ont atteint un niveau suffisant au stade du DDAC. Il est toutefois attendu que l'Andra précise les dispositions qu'elle prévoit pour la surveillance des premiers ouvrages avant leur construction, ainsi que sa stratégie de surveillance déportée en alvéole témoin (engagements 2024-E18 à E20).

2. EVALUATION DE SURETE EN PHASE D'EXPLOITATION

Conception et dimensionnement du génie civil

S'agissant du génie civil des installations de surface, l'Andra retient notamment des dispositions parasismiques (par exemple, structures simples et régulières en béton armé fondées sur radier), des dispositions relatives à la durabilité des bétons (formulation, armatures) ainsi que des dispositions complémentaires visant à protéger les ouvrages contre les conséquences d'une chute d'avion, telles que la mise en place d'une « coque avion », ou

¹ Intérêts qui visent « la protection de la santé publique, de la salubrité et de la sécurité publiques, ainsi que de l'environnement, contre les risques ou inconvénients résultant des rayonnements ionisants » (article L.1333-7 du code de l'environnement).

² (i) Situations normales et dégradées du domaine de dimensionnement, (ii) situations incidentelles et accidentelles du domaine de dimensionnement, (iii) situations accidentelles du domaine d'extension du dimensionnement et (iv) situations exclues.

contre la chute de charges. Pour les installations souterraines (ouvrages en béton armé ou non armé), l'Andra prévoit des dispositions visant à favoriser leur stabilité structurelle sur une période séculaire, au regard notamment du risque sismique et du comportement mécanique de la roche hôte. L'IRSN considère que ces dispositions sont appropriées et suffisamment décrites au stade du DDAC. Des compléments sont toutefois attendus, principalement avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires, concernant la maîtrise des effets induits sur le génie civil, notamment par la chute accidentelle de charge (engagement 2024-E39), la chute d'un avion (engagements 2024-E47 à E49) possiblement suivie d'un incendie (engagement 2024-E37), ou en cas de séisme.

Risques nucléaires d'origine interne

S'agissant de la radioprotection des travailleurs, l'IRSN note que les locaux de l'installation accessibles aux travailleurs ont fait l'objet de calculs préliminaires par l'Andra afin de définir l'ordre de grandeur des épaisseurs de protection radiologique requises, ce qui est satisfaisant au stade du DDAC. En outre, des règles de radioprotection sont définies en cohérence pour la future exploitation de l'installation ; la déclinaison opérationnelle de la délimitation radiologique des locaux, ainsi que l'optimisation de l'exposition et de la surveillance radiologique des travailleurs devront être précisées.

Concernant le risque de dissémination des substances radioactives, le premier système de confinement statique est assuré par les colis de stockage³ HA et MA-VL. Pour les colis HA, les performances de ce système sont notamment liées au dimensionnement des conteneurs de stockage vis-à-vis de la corrosion. Sur ce point, des éléments supplémentaires relatifs aux processus et vitesses de corrosion ont été transmis par l'Andra suite au GP1, en vue de leur expertise dans le cadre du GP3. En outre, un confinement dynamique (ventilation) est mis en œuvre dans les bâtiments nucléaires de surface et les alvéoles MA-VL en exploitation. L'IRSN considère que la conception et le dimensionnement global de ce système (classement des locaux, niveaux de filtration, débits, etc.) sont appropriés, mais souligne la possible difficulté de gestion des phases transitoires en termes d'adaptation des débits de ventilation à chaque étape du déploiement de l'installation souterraine, en particulier lors de la mise en service de nouveaux alvéoles MA-VL ou sous-quartiers de stockage HA (engagement 2024-E24).

S'agissant de la maîtrise du risque de criticité, l'IRSN considère que les études présentées par l'Andra sont globalement satisfaisantes au stade d'un DDAC. L'analyse réalisée par l'Andra, ainsi que les dispositions de contrôle des masses de matières fissiles, devront être complétées et consolidées (engagements 2024-E26 et E27). Ces compléments ne sont toutefois pas de nature à remettre en cause, selon l'IRSN, les évaluations de masses de matière fissile admissibles dans l'installation de surface et en alvéole, ni les marges que celles-ci présentent par rapport aux masses de matière fissile contenues dans les colis de déchets.

Agressions d'origine interne

L'IRSN considère que les éléments présentés par l'Andra pour la maîtrise des risques liés à l'incendie, à l'inondation interne, à la manutention, à la perte d'auxiliaires et à la coactivité sont globalement satisfaisants pour ce stade de développement du projet.

S'agissant de la maîtrise des risques liés à l'incendie, l'IRSN considère toutefois que la démarche d'analyse de l'Andra mérite encore d'être consolidée vis-à-vis notamment des dispositions retenues comme EIP (engagements 2024-E31) et, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface et le début des travaux de creusement, vis-à-vis du caractère enveloppe des agressions retenues (engagements 2024-E34). Les dispositions de compartimentage présentées par l'Andra dans l'objectif de limiter les conséquences d'un incendie dans l'installation souterraine (isolement de certaines liaisons surface-fond par des dispositions constructives, bitubes avec recoupes⁴, etc.) nécessitent également d'être approfondies, en particulier concernant l'isolement du puits

³ Colis primaire(s) mis dans un conteneur de stockage, ou colis primaire seul en cas de stockage direct.

⁴ Par exemple, deux descenderies en parallèle, deux galeries « procédé nucléaire » parallèles, reliées par des recoupes.

de retour d'air vicié de la zone d'exploitation et la justification de l'absence de compartimentage pour les descenderies (engagement 2024-E33). En outre, l'IRSN estime que les dispositions prévues par l'Andra vis-à-vis de l'intervention en cas d'incendie dans l'installation souterraine (en particulier, localisation des forces de sécurité en surface, distances à parcourir à pied en lien avec de possibles difficultés de passage des engins) ne permettent pas à ce stade de garantir une intervention rapide et efficace (engagement 2024-E35). L'évolution de dispositions de compartimentage et d'intervention étant susceptibles de conduire à des modifications de conception ou d'architecture, elles devront être présentées avant le début des travaux de creusement.

Pour le cas particulier du stockage en l'état des colis de déchets bitumés, l'Andra présente les dispositions de conception des conteneurs de stockage et des alvéoles dédiés à ces déchets qui visent à respecter le critère de 100°C⁵ en peau de colis, ainsi que des essais et modélisations pour attester du respect de ce critère dans le cadre de scénarios dits « de référence »⁶ et de scénarios « extrêmes » postulant l'emballage d'un colis stocké. Compte tenu des incertitudes sur le comportement des déchets bitumés et au titre de la défense en profondeur, l'absence de propagation aux colis voisins doit être garantie. Les délais de détection et d'intervention suite à une montée en température dans un colis de stockage ont en outre fait l'objet d'évaluations préliminaires. L'IRSN estime que la démonstration du respect du critère de 100°C est accessible pour les scénarios de référence retenus par l'Andra. En revanche, les scénarios extrêmes n'intègrent pas suffisamment les connaissances phénoménologiques relatives au comportement des colis de déchets bitumés et leur caractère enveloppe n'est à ce stade pas démontré ; la stratégie de détection et d'intervention reste à développer sur la base de scénarios enveloppes. Aussi, l'IRSN estime que les éléments présentés ne suffisent pas pour établir, à ce stade, l'accessibilité de la démonstration de sûreté (absence de propagation d'un emballage) du stockage en l'état des colis de déchets bitumés. L'Andra s'est engagée à poursuivre ses études à cette fin (engagement 2024-E36).

S'agissant de la maîtrise des risques liés à l'explosion dans les alvéoles MA-VL, dus à la production de gaz par radiolyse dans les colis MA-VL, les alvéoles de stockage seront ventilés afin d'évacuer les gaz. La hotte de transfert est quant à elle dimensionnée de manière à exclure l'atteinte d'une atmosphère explosive le temps du transfert des colis ; l'Andra prévoit en outre des dispositions compensatoires en cas de blocage de la hotte. L'IRSN estime que ces dispositions sont satisfaisantes dans leur principe. Lorsque la ventilation des alvéoles est arrêtée, en vue notamment des opérations de fermeture, les gaz de radiolyse peuvent s'accumuler. A ce stade, l'Andra présente des études préliminaires relatives à l'évolution de l'atmosphère interne d'un alvéole MA-VL non ventilé et aux conséquences d'une éventuelle explosion. Toutefois, l'IRSN considère que ces premiers éléments ne permettent pas de s'assurer de la maîtrise des risques d'explosion lors des opérations de fermeture et après fermeture des alvéoles MA-VL. Ils devront donc être complétés avant le début des travaux de creusement (engagement 2024-E57), puisque des modifications de conception pourraient être nécessaires pour démontrer la maîtrise de ces risques.

Les risques liés à l'explosion dans les alvéoles HA proviennent de la production d'hydrogène par corrosion anoxique des composants métalliques (chemisage, conteneur de stockage). L'Andra prévoit un dispositif de surveillance et, le cas échéant, d'inertage à l'azote de l'atmosphère des alvéoles HA afin, d'une part de limiter le processus de corrosion en maintenant des conditions proches de l'anoxie, d'autre part d'éviter la formation d'une atmosphère explosive. L'Andra présente des premiers résultats relatifs à ce dispositif, obtenus sur démonstrateurs partiels dans le laboratoire souterrain. Toutefois, l'IRSN considère que des incertitudes fortes demeurent quant à la faisabilité technique de l'alvéole HA tel que conçu à ce stade (limitation des échanges gazeux au niveau de la tête d'alvéole, dispositif de prélèvement et d'inertage, etc.) et au passage à une échelle industrielle (centrales de production d'azote reliées à plusieurs centaines d'alvéoles HA). A cet égard, l'IRSN relève que l'Andra prévoit un nouveau programme de démonstrateurs dans son laboratoire souterrain, afin

⁵ Critère permettant de prévenir l'emballage des réactions exothermiques au sein d'un colis de déchets bitumés.

⁶ Incendie des équipements prévus en cellule de manutention ou en partie utile des alvéoles de stockage MA-VL.

d'évaluer la faisabilité des dispositions précitées. La démonstration de la sûreté du stockage des colis HA devra en tout état de cause être plus aboutie avant le creusement du quartier pilote HA (engagement 2024-E28).

Agressions d'origine externe

L'IRSN considère que les éléments présentés par l'Andra relatifs à l'inondation externe, aux aléas météorologiques, aux effets directs de la foudre, à la chute accidentelle d'un aéronef et à l'environnement industriel traduisent un niveau de maturité suffisant du DDAC. L'IRSN estime en revanche que le niveau d'aléa sismique retenu par l'Andra ne couvre pas toutes les incertitudes, en particulier à hautes fréquences, et que celui-ci devra être conforté. A cet égard, l'Andra s'est engagée à transmettre un nouveau spectre de dimensionnement avant la fin de l'année 2024 (engagement 2024-E41).

Evaluation d'impact

L'IRSN estime que la méthode retenue par l'Andra pour évaluer l'impact radiologique sanitaire et à l'environnement en fonctionnement normal, basée notamment sur une identification des rejets, est globalement appropriée bien que méritant, de manière formelle, des justifications supplémentaires. L'IRSN convient de l'impact radiologique très faible calculé. En revanche, concernant l'impact des rejets liquides de substances chimiques toxiques, l'Andra fonde son évaluation sur les valeurs des normes de qualité environnementale en faisant l'hypothèse que les rejets respecteront ces valeurs. Or ces limites normées ne constituent pas une autorisation de rejet. L'IRSN rappelle que le futur exploitant doit définir ses rejets et les réduire autant que possible. Aussi, l'IRSN recommande que l'Andra fournisse, dans les meilleurs délais, une évaluation quantitative de l'impact sanitaire et à l'environnement des rejets liquides en substances chimiques toxiques de Cigéo, basée sur une estimation des concentrations rejetées dans l'environnement (recommandation n°2 en annexe au présent avis). En situations incidentelles et accidentelles, l'IRSN convient que les évaluations de conséquences radiologiques et chimiques pour les populations proches conduisent à des conséquences respectant les objectifs de protection que se fixe l'Andra. Il en est de même pour les conséquences radiologiques pour les travailleurs.

Spécifications préliminaires d'acceptation

En lien avec les analyses de risques mentionnées *supra*, l'Andra définit des spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires (inventaire radiologique et chimique, puissance thermique, masse de matière fissile, dégagement de gaz de radiolyse, tenue à la chute, etc.). L'IRSN considère que les critères associés sont cohérents avec la démonstration de sûreté en exploitation. Toutefois, le critère relatif au maintien du confinement statique des colis primaires devra être consolidé, sur la base des conditions d'environnement et des propriétés des matériaux constituant la première barrière de confinement, et présenter un caractère opérationnel (engagements 2024-E50 et E51). En outre, l'Andra a établi la liste des contrôles systématiques qu'elle envisage à réception des colis primaires, ainsi qu'une liste préliminaire des contrôles réalisés par échantillonnage, dits contrôles « hors flux », en cours de développement. L'IRSN considère que dans leur principe, ces deux types de contrôles, qui s'ajoutent aux connaissances dont dispose par ailleurs l'Andra sur les colis primaires, devraient permettre de s'assurer que les colis reçus respectent les spécifications d'acceptation.

3. DEVELOPPEMENT DE CIGEO

L'Andra présente des dispositions relatives à l'évolution de son organisation, mises en place récemment notamment en vue d'optimiser la phase préparatoire qui conduira à la construction puis à l'exploitation de Cigéo. L'IRSN estime que les dispositions présentées par l'Andra sont globalement satisfaisantes dans l'objectif d'anticiper la maîtrise des risques à chaque phase du programme Cigéo. Certaines dispositions, relatives notamment au système de management intégré, à la gestion de configuration, à la gestion des ressources et des

compétences, à l'intégration des facteurs organisationnels et humains ainsi qu'à la formalisation du retour d'expérience, sont toutefois moins matures et devront être approfondies (engagements 2024-E53 à E55).

S'agissant de la récupérabilité de colis en alvéole, l'Andra retient deux types de scénarios qui impliquent la mise en œuvre de retrait de colis : les « retraits d'exploitation », qui font partie de l'exploitation courante de Cigéo, et les « retraits hypothétiques », étudiés au titre de la gestion post-accidentelle ou de la réversibilité. Les études menées par l'Andra sur la base de ces scénarios constituent une avancée au stade du DDAC. En particulier, l'IRSN constate que la conception de dispositions de récupérabilité (robots, acheminement des colis en surface, etc.) a progressé depuis le DOS, et note que ces dispositions feront l'objet d'essais au cours de la phase pilote. L'IRSN rappelle néanmoins ses réserves mentionnées *supra* relatives d'une part, à la corrosion des composants métalliques des alvéoles HA et d'autre part, à la maîtrise de l'atmosphère interne de ces alvéoles ainsi que celle des alvéoles MA-VL fermés, qui devront être levées en vue de la démonstration de la sûreté du retrait de colis en alvéole.

S'agissant du plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance de l'installation, la stratégie envisagée à ce stade ainsi que les principales opérations de démantèlement identifiées par l'Andra sont globalement appropriées. Concernant les opérations de fermeture, le scénario retenu en référence au stade du DDAC consiste à fermer partiellement l'installation par quartier de stockage à l'issue de leur remplissage. A cet égard, l'IRSN considère, outre la maîtrise des risques d'explosion qui reste à démontrer (cf. *supra*), que l'Andra devra porter une attention particulière, avant le début des travaux de creusement, à 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 (engagement 2024-E56).

L'Andra présente par ailleurs des éléments relatifs à la flexibilité de Cigéo, qui consiste en sa capacité à permettre des variations liées à l'inventaire de référence, aux chroniques de livraison ou aux stratégies de fermeture, ainsi qu'à intégrer des évolutions de connaissances, de technologies ou plus généralement de modalités d'exploitation. Compte tenu notamment des incertitudes relatives à l'inventaire de référence mises en exergue dans le cadre du GP1, en particulier le volume des colis dont le conditionnement reste à définir, l'IRSN souligne l'importance de cette caractéristique de Cigéo afin de préserver la possibilité d'une gestion sûre de l'ensemble des déchets de cet inventaire. De manière plus générale, l'IRSN considère ainsi que ce principe de flexibilité devra être décliné en dispositions organisationnelles et matérielles concrètes, 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 (engagement 2024-E59).

S'agissant de l'adaptabilité de Cigéo au stockage des déchets des inventaires de réserve, les principes de conception pour le stockage des combustibles usés (CU) et des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) de ces inventaires sont similaires à ceux prévus respectivement pour les déchets HA et MA-VL. L'IRSN n'identifie pas, au vu de l'analyse préliminaire des risques en exploitation présentée par l'Andra, de point rédhibitoire au stockage de ces déchets. La maîtrise du risque de criticité et de pyrophoricité pour le stockage des CU, la gestion de la ventilation ainsi que les moyens d'intervention en situation d'incendie nécessiteront cependant une attention particulière dans les prochaines mises à jour des études d'adaptabilité, qui devront également tenir compte des conclusions de la présente expertise relatives à l'inventaire de référence et transposables aux inventaires de réserve. En outre, l'IRSN souligne que le stockage des déchets des inventaires de réserve conduirait à un allongement de la durée de fonctionnement de Cigéo, avec pour enjeu principal la durabilité des ouvrages de génie civil. A cet égard, l'approche performancielle envisagée par l'Andra pour mettre au point la formulation des bétons apparaît pertinente en vue de garantir des performances des bétons sur des durées supérieures à celles associées aux normes prescriptives existantes. D'autres dispositions pourraient être mises en œuvre, selon l'Andra, pour dégager des gains en termes de durabilité (utilisation de fibres non métalliques, réserves géométriques pour des renforcements éventuels, optimisation du phasage soutènement/revêtement, etc.). L'IRSN attire toutefois l'attention sur la nécessité de statuer sur ces dispositions avant la construction des ouvrages concernés (engagement 2024-E58).

Enfin, l'Andra prévoit de démarrer Cigéo par une phase industrielle pilote, conformément à l'article L.542-10-1 du code de l'environnement. Cette phase comprend une période de construction et d'essais en inactif (sans colis de déchets radioactifs) et une période d'essais de démarrage puis de stockage de colis. Au cours de l'instruction, l'Andra a présenté, de manière préliminaire, des objectifs techniques pour cette phase, qu'il conviendra de développer avec une attention particulière portée à la définition des critères de réussite, en vue de fonder le programme des travaux à mener pour compléter et conforter la démonstration de sûreté (engagement 2024-E52). A cet égard, 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 que l'éventuelle construction d'alvéoles de stockage des tranches ultérieures de l'installation au cours de la phase pilote doit bénéficier du retour d'expérience associé à la construction et à l'exploitation de ce type d'ouvrage.

4. CONCLUSION

L'IRSN estime que la démonstration de la maîtrise des risques pendant la phase d'exploitation de Cigéo a atteint le niveau de maturité requis au stade d'un DDAC pour la plupart de ses composantes, en particulier s'agissant des risques internes d'origine nucléaire, des risques d'agression externe liés à l'inondation, aux aléas météorologiques, à l'environnement industriel, à la chute d'avion ainsi que des risques d'agression interne liés à l'incendie, à l'inondation interne, à la manutention, à la perte d'auxiliaires et à la coactivité. Les spécifications d'acceptation des colis et les contrôles prévus lors de leur prise en charge sur l'installation sont globalement satisfaisants. Les principes de conception et la démarche de dimensionnement retenus par l'Andra pour le génie civil des installations de surface et souterraine répondent également au niveau attendu au stade d'un DDAC. L'ensemble de ces points devra être conforté lors des prochaines étapes du projet, en particulier pour la maîtrise des risques liés à l'incendie. De même, les dispositions de surveillance des premiers ouvrages restent à préciser avant leur construction. Sur cette base, et compte tenu du niveau globalement très faible des conséquences radiologiques estimées, l'IRSN considère que les dispositions de conception, de construction et d'exploitation retenues à ce stade pour la configuration de référence sont dans l'ensemble pertinentes en vue d'établir la démonstration de la sûreté du fonctionnement des installations de surface, de l'infrastructure souterraine et du quartier de stockage MA-VL de Cigéo. En outre, l'évolution organisationnelle engagée par l'Andra pour le passage de la phase de conception à la phase industrielle de construction et de fonctionnement est, selon l'IRSN, de nature à renforcer l'anticipation de la maîtrise des risques.

En revanche, l'accessibilité de la démonstration de sûreté reste difficile à estimer pour les alvéoles HA, ainsi que pour les alvéoles MA-VL lorsqu'ils sont fermés, compte tenu des incertitudes relatives à la faisabilité et à la suffisance des dispositions de maîtrise de leur atmosphère interne vis-à-vis notamment des risques liés à l'explosion. Les éléments présentés ne permettent pas non plus de statuer sur l'accessibilité de cette démonstration dans le cas particulier du stockage en l'état des colis de déchets bitumés. Ainsi, des évolutions de modes d'exploitation ou de conception des alvéoles de stockage pourraient être nécessaires. Par conséquent, l'IRSN estime qu'il importe désormais de compléter et de conforter l'évaluation de la sûreté de Cigéo en phase d'exploitation, en tirant pleinement parti de la phase industrielle pilote, sur la base notamment de démonstrateurs d'alvéoles 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 laboratoire souterrain. A cet égard, une durée de la phase industrielle pilote de l'ordre de trente 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 et confirmer la capacité de l'installation à fonctionner de façon sûre.

Par ailleurs, l'IRSN estime que la flexibilité de l'installation, qui constitue un enjeu fondamental 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, doit être associée à des dispositions organisationnelles et matérielles concrètes. Enfin, au vu de l'analyse préliminaire de sûreté en fonctionnement présentée par l'Andra au titre des études d'adaptabilité de Cigéo aux inventaires de réserve, l'IRSN n'identifie pas de point rédhibitoire lié à la sûreté du stockage des combustibles usés et des déchets FA-VL de ces inventaires.

Le présent examen est complété par celui de la démonstration de sûreté après fermeture dans le cadre de l'expertise du GP3.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Delphine PELLEGRINI

Adjointe au Directeur de l'environnement

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Delphine Pellegrini', is written over a horizontal line. The signature is fluid and cursive, with a large loop at the end.

ANNEXE 1 A L'AVIS IRSN N° 2024-00167 DU 29 NOVEMBRE 2024

Recommandations de l'IRSN

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.

ANNEXE 2 A L'AVIS IRSN N° 2024-00167 DU 29 NOVEMBRE 2024

Engagements de l'exploitation pris par lettre Andra CG-AMOA-LET-24-0033 du 18 novembre 2024

Engagement n°2024-E17

L'Andra affinera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, la justification de l'exclusion de scénarios au regard des dispositions de conception, de réalisation et d'exploitation retenues.

Engagement n°2024-E18

L'Andra fournira :

- avant le début des travaux de creusement des ouvrages souterrains, l'ensemble des paramètres-clés associés à chaque CIP qu'elle prévoit de surveiller ;
- suivant la temporalité de réalisation des ouvrages concernés, les dispositions de surveillance associées.

Engagement n°2024-E19

L'Andra présentera, avant le début des travaux de creusement, les dispositions lui permettant de caractériser l'état initial avant et après creusement du CIP « Callovo Oxfordien » et de suivre son évolution.

Engagement n°2024-E20

L'Andra précisera, avant le creusement du démonstrateur MA-VL, sa stratégie de surveillance déportée en alvéole témoin MA-VL, en précisant les paramètres effectivement suivis du domaine de fonctionnement normal et les dispositions de surveillance qui seront in fine retenus dans cet alvéole.

Engagement n°2024-E21

L'Andra précisera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de Cigéo, sa stratégie de qualification des EIP inaccessibles.

Engagement n°2024-E22

L'Andra présentera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de Cigéo, les critères et les méthodes permettant de justifier la qualification des EIP au regard du respect de leurs ED ».

Engagement n°2024-E23

L'Andra démontrera, au plus tard pour le dossier de demande de mise en service de l'INB Cigéo, 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.

Engagement n°2024-E24

L'Andra consolidera, au plus tard pour le dossier de demande de mise en service de l'INB Cigéo, 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 et modélisations prévus pour démontrer l'atteinte des performances aérauliques de la totalité de l'installation.

Engagement n°2024-E25

L'Andra confirmera, dans un premier temps lors des essais de mise en service, puis après chaque ouverture de tranche, l'efficacité des solutions retenues pour pallier la perte de la ventilation de soufflage au regard notamment des débits de ventilation minimaux à maintenir.

Engagement n°2024-E26

L'Andra consolidera son analyse de sûreté-criticité, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, en présentant l'ensemble des hypothèses relatives à la démonstration des masses de matière fissile admissibles et leurs justifications.

Engagement n°2024-E27

L'Andra précisera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, les colis primaires pour lesquels les masses de matière fissile maximales évaluées par les producteurs de déchets et celles autorisées à Cigéo sont proches et quantifiera les marges en situation anormale de dépassement des limites, en recourant si besoin à des hypothèses de modélisation aussi réalistes que possibles et nécessaires.

Engagement n°2024-E28

L'Andra présentera, avant le creusement du quartier pilote HA, les résultats du programme de démonstrateurs d'alvéole HA et complètera sur cette base la démonstration de sûreté du stockage des colis HA.

Engagement n°2024-E29

L'Andra justifiera, au plus tard pour la demande de mise en service de l'INB Cigéo, le classement des scénarios relatifs à la défaillance du compartimentage ou de la sectorisation incendie. A ce titre, l'Andra identifiera notamment le cas où la défaillance est couverte par celle de la perte d'un EIP.

Engagement n°2024-E30

L'Andra justifiera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, le classement du scénario d'incendie consécutif à une collision entre un engin de transfert de colis et un autre type de véhicule.

Engagement n°2024-E31

L'Andra consolidera au plus tard pour la demande de mise en service de Cigéo, les exigences attribuées aux dispositions mises en place pour la maîtrise des risques liés à l'incendie. L'Andra identifiera parmi ces dispositions celles relevant d'un classement EIP conformément à sa démarche d'identification des EIP.

Engagement n°2024-E32

L'Andra complètera, avant la construction du bâtiment EP1, les justifications des dispositions permettant de limiter les conséquences en cas d'incendie dans une cellule contenant un colis de déchets bitumés dans le bâtiment EP1.

Engagement n°2024-E33

L'Andra confortera, avant le début des travaux de creusement, la justification :

- des dispositions de protection contre l'incendie retenues dans les liaisons surface fond, en particulier l'absence de besoin d'un compartimentage pour les descendries et l'efficacité des dispositions compensatoires en lien avec les performances d'intervention et de désenfumage attendues pour ces ouvrages ;
- de la suffisance des dispositions de compartimentage des galeries en regard des incendies possibles dans ces zones.

Engagement n°2024-E34

L'Andra retiendra, 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 pouvant s'y produire durant la phase d'exploitation.

Engagement n°2024-E35

L'Andra évaluera, avant le début des travaux de creusement, le besoin d'éventuelles dispositions supplémentaires à prévoir dans l'installation souterraine par rapport à celles présentées dans le dossier de DAC pour permettre une intervention suffisamment rapide et efficace en cas d'incendie. Avant le début de la construction de chaque tranche, elle intégrera notamment le retour d'expérience.

Engagement n°2024-E36

L'Andra consolidera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, les scénarios d'emballement enveloppes en s'appuyant sur des considérations phénoménologiques de la réactivité des enrobés bitumés et du comportement des fûts d'enrobés sous sollicitation thermique. Sur cette base, l'Andra consolidera sa stratégie de détection et d'intervention présentée dans le dossier de DAC et justifiera sa suffisance pour exclure la propagation d'un emballement de réactions exothermiques aux colis voisins dans les alvéoles de stockage dédiés au colis de déchets bitumés.

Engagement n°2024-E37

L'Andra justifiera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, 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 définira les charges calorifiques dont la combustion est à cumuler à celle du kérosène en cas de chute d'un avion.

Engagement n°2024-E38

L'Andra justifiera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, la résistance au feu des voussoirs ainsi que celle du revêtement, 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 des structures.

Engagement n°2024-E39

L'Andra, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface :

- effectuera, pour l'ensemble des cas de chute de charges retenus, des calculs complémentaires prenant en compte des configurations de chute inclinée sur un angle ou un coin ;

- réalisera 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'avion et des chutes de charge ;
- démontrera 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.

Engagement n°2024-E40

L'Andra confortera, au plus tard dans le dossier de demande de mise en service, la démonstration de la maîtrise des risques liés à l'incendie et à l'explosion pendant les phases transitoires de livraison et de fermeture d'alvéoles.

Engagement n°2024-E41

L'Andra établira, d'ici fin décembre 2024, un nouveau SDD en se basant sur une mise à jour de son exploration des incertitudes au niveau SMS en tenant compte d'une majoration de 0,5 de la Mw d'une part et en propageant l'ensemble des spectres explorés pour construire la distribution d'autre part.

Engagement n°2024-E42

L'Andra, afin de compléter l'évaluation des risques d'inondation par les pluies locales :

- étudiera, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, des solutions alternatives à celles présentées dans le dossier de DAC permettant de limiter l'accumulation d'eau à proximité des entrées n°5 et n°6 du bâtiment EP1 ;
- justifiera, 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, à prendre en compte de valeurs conservatives pour le dimensionnement du réseau ;
- mettra 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 dans la démonstration de sûreté.

Engagement n°2024-E43

L'Andra mènera, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, une analyse de robustesse de l'installation en regard des préconisations du GT « Vent et Neige ».

Engagement n°2024-E44

L'Andra justifiera, 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 niveau de protection. L'adéquation des caractéristiques des éléments de structure éventuellement valorisés, avec le niveau de protection visé, sera justifiée.

Engagement n°2024-E45

Pour le dimensionnement des cibles de sûreté présentes en surface, l'Andra retiendra, 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.

Engagement n°2024-E46

L'Andra prendra en compte, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, des trajectoires d'impact de l'avion militaire en cohérence avec l'état de l'art. Au stade de la DAC, cet état de l'art correspond à une trajectoire d'impact de l'avion militaire normale aux parois extérieures (dalles de toiture et voiles périphériques).

Engagement n°2024-E47

L'Andra complètera, avant les premiers bétons des bâtiments nucléaires de surface, les éléments relatifs à la chute d'avion présentés dans le dossier de DAC en présentant :

- une analyse fonctionnelle permettant d'identifier les EIP requis en cas de chute d'avion et leurs agresseurs potentiels ;
- les spectres vibratoires induits par la chute d'avion représentatif de l'aviation militaire sur le bâtiment EP1 et 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.

Engagement n°2024-E48

L'Andra démontrera, 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.

Engagement n°2024-E49

L'Andra mettra en œuvre des coupleurs dans les dalles et voiles extérieurs du bâtiment EP1 en regard de la chute d'avion.

Engagement n°2024-E50

Avant accord de l'ASN sur les spécifications d'acceptation, l'Andra justifiera, 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.

Engagement n°2024-E51

Avant accord de l'ASN sur les spécifications d'acceptation, l'Andra s'assurera pour la spécification relative au confinement statique que les critères retenus sont opérationnels.

Engagement n°2024-E52

L'Andra précisera, dans la prochaine révision de la version préliminaire du rapport de sûreté de l'INB Cigéo, le programme des travaux à réaliser en phase pilote « inactive » permettant de conforter la démonstration de sûreté.

Engagement n°2024-E53

L'Andra complètera, d'ici fin 2024, son référentiel de projet en lien avec le système de management intégré, notamment pour ce qui concerne la gestion de la configuration technique et la gestion des modifications du programme Cigéo.

Engagement n°2024-E54

D'ici fin 2025, afin de renforcer les modalités d'organisation de la maîtrise des risques du programme Cigéo, l'Andra :

- présentera une feuille de route permettant d'appréhender les enjeux liés à l'exploitation et les modalités organisationnelles associées ;
- présentera une feuille de route pour l'intégration des FOH ;
- justifiera que son organisation permet de prendre en compte, de façon transverse, les exigences de la radioprotection lors de la conception détaillée de l'INB Cigéo pour sa construction, en vue de sa future exploitation.

Engagement n°2024-E55

D'ici fin 2025, l'Andra présentera une feuille de route de la formalisation de son REX, y compris sur les dimensions organisationnelles et humaines.

Engagement n°2024-E56

L'Andra justifiera, avant le début des travaux de creusement, la possibilité de concilier les flux relatifs aux activités nucléaires et ceux relatifs aux activités de fermeture sans impact sur la maîtrise des risques.

Engagement n°2024-E57

L'Andra complètera, avant le début des travaux de creusement, la démonstration de sûreté des opérations de fermeture des alvéoles MA-VL au regard des risques d'explosion, fondée notamment sur une évaluation (i) du devenir des gaz dans les alvéoles MA-VL, en considérant notamment les échanges avec la galerie d'accès de l'alvéole, et (ii) des conséquences d'une explosion dans la partie utile des alvéoles.

Engagement n°2024-E58

L'Andra présentera, 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 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.

Engagement n°2024-E59

L'Andra présentera, lors de la première revue de réversibilité, (i) les dispositions organisationnelles et matérielles prises pour s'assurer du caractère flexible de l'INB Cigéo, et (ii) les évolutions des niveaux de flexibilité et d'adaptabilité au regard des étapes possibles du déploiement de l'installation.