

Fontenay-aux-Roses, le 8 novembre 2018

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis/IRSN N° 2018-00297

Objet : Avis relatif à la demande d'accord de conditionnement des déchets MA-VL en colis C1PG^{SP} sur l'installation ICEDA de EDF

Réf. Lettre ASN CODEP-DRC-2016-024811 du 8 juillet 2016

Par lettre en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé l'avis de l'IRSN sur le référentiel de conditionnement des déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) en colis C1PG^{SP}¹ dans l'installation de conditionnement et d'entreposage des déchets activés (ICEDA), transmis par EDF. Ce référentiel couvre les déchets activés d'exploitation (DAE) issus des réacteurs du parc électronucléaire actuel (doigts de gants du réseau d'instrumentation du cœur, têtes de grappes, crayons poison, crayons absorbants, crayons en acier inoxydable, etc.) ainsi que certains déchets activés issus du démantèlement (DAD) des centrales nucléaires de première génération et de la centrale de Creys-Malville (viroles de cuves, réflecteurs, tubes de guidage, etc.).

I. Contexte technique, enjeux et points examinés par l'IRSN

Les déchets activés peuvent être livrés à ICEDA en étuis ou prédécoupés sur le site producteur et livrés en paniers. Les étapes conduisant au conditionnement en colis C1PG^{SP} consistent à :

- découper en tant que de besoin les déchets ;
- les déposer dans un panier cylindrique en acier inoxydable ;
- les immobiliser dans un coulis cimentaire ;
- placer le panier dans un conteneur cylindrique en béton armé hautes performances C1PG^{SP} et l'immobiliser au moyen du même coulis cimentaire ;
- obturer le colis par un béton de même formulation que celui du conteneur.

Le coulis cimentaire a pour fonction de limiter les vides dans le colis tandis que le conteneur et son bouchon en béton ont pour fonction d'assurer le confinement des radionucléides et la tenue mécanique du colis.

EDF prévoit d'entreposer dans ICEDA les colis C1PG^{SP} produits pendant une durée maximale de 50 ans puis de les stocker dans l'installation Cigéo actuellement en projet.

Le principal enjeu de sûreté associé au colis C1PG^{SP} est le maintien dans le temps de ses performances mécaniques et de confinement au regard des effets induits sur le béton par les phénomènes thermiques (chaleur dégagée lors de la prise du coulis cimentaire et par les désintégrations radioactives intervenant au sein des déchets) et la radiolyse (dégagement d'hydrogène) tant au cours

¹ « SP » pour « sans polystyrène ».

des phases de fabrication et d'entreposage que lors de son stockage.

En réponse à la demande de l'ASN et compte tenu de cet enjeu, le présent avis traite successivement :

- de l'inventaire des déchets MA-VL à conditionner en colis C1PG^{SP} dans ICEDA ;
- des critères d'acceptation des déchets dans ICEDA en vue de leur conditionnement et des critères applicables aux colis C1PG^{SP} en vue de leur entreposage ;
- du programme de qualification du colis C1PG^{SP} ;
- des paramètres visant à garantir les performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP} (paramètres garantis) ;
- du comportement du colis C1PG^{SP} en entreposage dans ICEDA et en stockage, lors des phases d'exploitation et de réversibilité ;
- de la surveillance des colis C1PG^{SP} en entreposage dans ICEDA ;
- de l'acceptabilité du colis C1PG^{SP} en stockage et de son comportement après la fermeture de celui-ci.

II. Inventaire des déchets

EDF estime la quantité de DAE MA-VL à conditionner dans ICEDA à 1 300 tonnes environ, ce qui correspond aux quantités produites sur une durée de fonctionnement du parc électronucléaire actuel de 50 ans. Cette hypothèse est cohérente avec celle retenue pour établir, dans le cadre du projet de stockage en couche géologique profonde Cigéo, le Programme Industriel de Gestion des Déchets dans sa version E (PIGD VE). Toutefois, l'IRSN note que la durée d'exploitation effective des réacteurs pourrait différer de l'hypothèse retenue ce qui conduirait à réviser l'inventaire de DAE et justifierait la mise à jour du PIGD.

La quantité de DAD MA-VL est, elle, évaluée à 150 tonnes environ. L'IRSN n'identifie pas d'incertitude forte liée à cette évaluation mais souligne que le flux annuel de production des DAD, et donc de réception par ICEDA, est fortement dépendant du rythme d'avancement des projets de démantèlement.

Sur la base des estimations précédentes, EDF évalue respectivement à 750 et 350 le nombre de colis C1PG^{SP} de DAE et de DAD MA-VL à produire et entreposer dans ICEDA.

Les DAE et DAD à conditionner ont été activés sous flux neutronique et contaminés par contact direct avec le fluide du circuit primaire. Leur inventaire radiologique repose sur la détermination, par mesure, du niveau d'activité d'un ou plusieurs radionucléides traceurs (radionucléides émetteurs y facilement mesurables), tel que le ⁶⁰Co, puis sur l'évaluation de l'activité des autres radionucléides, difficilement mesurables, via des ratios d'activation et de contamination.

S'agissant des ratios d'activation, ceux-ci sont établis par des calculs de propagation de neutrons et d'activation des pièces. Pour valider ces calculs, EDF procède, pour des pièces étalons représentatives de la composition des déchets et dont les concentrations isotopiques sont maîtrisées, à des confrontations entre les résultats des calculs et des analyses radiochimiques. De plus, EDF a indiqué qu'il réalisera ponctuellement des analyses radiochimiques sur les déchets eux-mêmes afin de conforter les ratios d'activation utilisés.

Les ratios de contamination sont quant à eux déterminés par EDF à partir de spectres types usuels utilisés pour la caractérisation des déchets du parc électronucléaire.

EDF a indiqué que l'inventaire radiologique des déchets MA-VL destinés à être conditionnés en colis C1PG^{SP} dans ICEDA fait l'objet d'une consolidation progressive au fur et à mesure de l'avancée des études de caractérisation pour s'assurer du respect des critères d'acceptation des déchets dans l'installation (cf. paragraphe III ci-après).

III. Critères d'acceptation

Afin de respecter le domaine de fonctionnement et les contraintes d'exploitation d'ICEDA et de fixer les caractéristiques des colis C1PG^{SP} produits, EDF a établi des critères d'acceptation des déchets à conditionner et des colis C1PG^{SP} à entreposer dans l'installation :

- les critères d'acceptation des déchets comprennent l'activité maximale des étuis et paniers à réception dans ICEDA ainsi que des restrictions (limitation de la quantité de déchets pulvérulents par exemple) ou interdictions pour certaines substances (telles que les substances explosives, facilement inflammables, potentiellement complexantes etc.) ;
- les critères d'acceptation des colis C1PG^{SP} à entreposer sont l'activité maximale (400 TBq en β et γ forts² notamment) et la puissance thermique maximale (170 W) par colis.

L'adéquation de ces critères avec les performances mécaniques et de confinement attendues du colis à sa production, en entreposage et en stockage est examinée dans la suite du présent avis.

IV. Programme de qualification du colis C1PG^{SP}

Le programme de qualification du colis C1PG^{SP} produit a pour objectif de montrer que les critères d'acceptation et les paramètres de fabrication retenus permettent d'atteindre les niveaux de performances mécaniques et de confinement requis à chacune des phases de sa gestion. Ce programme de qualification est analysé ci-après pour les matériaux cimentaires constitutifs du colis, pour le conteneur dans lequel sera placé le panier de déchets, pour le bouchon du conteneur ainsi que pour le colis C1PG^{SP} fini.

i. Matériaux cimentaires

La formulation du coulis cimentaire de blocage des déchets et de calage du panier dans le conteneur C1PG^{SP} ainsi que la formulation du béton du conteneur et de son bouchon ont été développées afin de conférer aux matériaux des caractéristiques adaptées aux fonctions rappelées au paragraphe I du présent avis et limiter les risques de dégradation dans le temps.

Différents phénomènes pouvant porter atteinte aux caractéristiques du coulis cimentaire et du béton, et donc aux fonctions de confinement et de tenue mécanique du colis, ont été identifiés ; ils sont examinés ci-après.

Pour ce qui concerne la carbonatation du béton, EDF a réalisé des essais destinés à étudier

² Parmi les radionucléides les plus représentatifs de l'inventaire radiologique des déchets activés, la distinction entre les émetteurs β et γ dits forts (^{60}Co , ^{94}Nb , $^{108\text{m}}\text{Ag}$, ^{109}Cd , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ et $^{113\text{m}}\text{Cd}$) et dits faibles (^{39}Ar , ^{55}Fe , ^{59}Ni et ^{63}Ni) tient compte de leurs énergies qui sont à la base des problématiques de thermique, de radiolyse etc.

l'apparition de ce phénomène susceptible d'induire une corrosion des armatures métalliques du conteneur³. Les résultats ne montrent aucun signe de carbonatation à 90 jours. L'IRSN souligne toutefois que ces essais, réalisés dans des conditions d'humidité relative importante, ne sont pas représentatifs des conditions auxquelles seront soumis les colis en entreposage dans ICEDA. Les conditions d'entreposage sont en effet marquées par une humidité relative faible et une température élevée qui peuvent fortement influencer le phénomène de carbonatation. Pour ce type de conditions, la littérature scientifique montre la possibilité d'un phénomène de carbonatation pouvant conduire à l'apparition de fissures. Ainsi, l'IRSN considère que la transposabilité des résultats présentés par EDF au comportement du béton du conteneur C1PG^{SP} et de son bouchon dans les conditions et sur la durée de l'entreposage dans ICEDA n'est pas démontrée à ce stade. En conséquence, l'IRSN estime qu'EDF devra réaliser une étude de sensibilité de la carbonatation du béton du conteneur et de son bouchon, à la température et à l'humidité relative, sur un domaine permettant de couvrir les conditions auxquelles seront soumis les colis C1PG^{SP}. Ce point conduit à la recommandation R1 en annexe du présent avis.

L'IRSN souligne que cette étude de sensibilité devrait contribuer à justifier le maintien des performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP} sur une durée couvrant la période d'exploitation et de réversibilité du stockage et pour les conditions d'ambiance thermique, hydraulique, mécanique et chimique qui seront précisées par l'Andra à l'occasion de la demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo.

Pour ce qui concerne la réaction alcali-silice, la silice du Pyrex présent dans les crayons poison est susceptible de réagir avec les alcalins du coulis cimentaire de blocage des déchets en formant un gel silico-alcalin. La formation de ce gel peut porter atteinte aux propriétés mécaniques du colis. Dans son dossier, EDF indique que les résultats du programme expérimental qu'il a mené pour étudier ce phénomène n'ont montré aucun signe de développement de réaction alcali-silice dans le coulis cimentaire.

S'agissant de la réaction sulfatique interne⁴ (RSI), EDF a conduit un programme de qualification visant, d'une part à définir les paramètres du procédé permettant de garantir une température inférieure à 75°C à cœur du coulis cimentaire pendant la fabrication du colis C1PG^{SP}, d'autre part à vérifier qu'en condition d'entreposage dans ICEDA la température à cœur du coulis cimentaire reste inférieure à 65 et 75°C, respectivement en fonctionnement normal et en cas de perte prolongée de la ventilation. Ces températures maximales correspondent à celles recommandées par le Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) pour prévenir les risques de RSI.

Des essais à échelle 1 : 1 sur des colis inactifs ont permis à EDF de qualifier un modèle de comportement thermique du colis en phases de fabrication et d'entreposage. Ce modèle permet d'évaluer la température à cœur d'un colis en équilibre thermique dans un environnement donné, avec une incertitude de +/- 3°C sur la température maximale observée pendant la prise du coulis cimentaire de blocage et de l'ordre du degré au cours des autres étapes de fabrication ainsi que

³ La carbonatation correspond à la dissolution de la portlandite du béton par le dioxyde de carbone de l'air entraînant une diminution du pH de l'eau porale du béton, ce qui peut induire des phénomènes de corrosion des armatures du conteneur et dégrader les performances mécaniques et de confinement de celui-ci.

⁴ Formation d'étringite secondaire du fait de la présence conjointe de sulfates en solution et d'aluminates en phase solide, associée à un cycle de température. Cette formation conduit à un gonflement en interne du coulis cimentaire pouvant dégrader les performances mécaniques et de confinement du conteneur et de son bouchon en béton.

pendant la période d'entreposage. Des études de sensibilité effectuées à l'aide de ce modèle ont permis à EDF de préciser les paramètres de fabrication à respecter pour le colis C1PG^{SP} (température du coulis cimentaire de blocage, température des locaux etc.). A cet égard, EDF a étudié le comportement d'un colis « enveloppe » présentant des caractéristiques de remplissage défavorables (choix d'une valeur minimale pour la masse de déchets (400 kg)⁵ et d'une valeur maximale pour la puissance thermique des déchets (170 W)), pour différentes natures de déchets, en prenant en compte les paramètres de fabrication précédemment déterminés. L'étude montre que la température de 75 °C peut, dans certaines configurations, être dépassée au moment du blocage des déchets. Sur ce point, EDF a indiqué au cours de l'examen avoir initié une étude pour affiner la modélisation des déchets dans le colis et ajuster, le cas échéant, les critères d'acceptation et/ou les paramètres garantis, telles que la masse de déchets ou la puissance thermique par colis. **En fonction des résultats de cette étude, l'IRSN recommande qu'EDF adapte la valeur des paramètres à retenir dans le procédé de fabrication du colis C1PG^{SP} afin de garantir le respect d'une température inférieure à 75 °C au cœur du coulis cimentaire, en tenant compte, d'une part des incertitudes associées aux résultats du modèle de comportement thermique des colis C1PG^{SP} au moment du pic thermique en phase de blocage des déchets, d'autre part des différentes natures de déchets susceptibles d'être conditionnés. Ce point fait l'objet de la recommandation R2 en annexe du présent avis.**

Les calculs effectués à l'aide du modèle de comportement thermique montrent également que, pour respecter les températures de 65 et 75 °C à cœur du coulis cimentaire, en fonctionnement normal et en cas de perte prolongée de la ventilation, la température de l'air dans l'empilement de colis entreposés dans ICEDA doit être inférieure, respectivement, à 52 et 62 °C. L'IRSN note que les calculs de bilan d'énergie réalisés par EDF dans un hall d'entreposage, en tenant compte notamment d'une puissance thermique des colis en limite du domaine de fonctionnement de l'installation et d'une température extérieure pénalisante, confirment que ces températures maximales ne peuvent être atteintes.

ii. Conteneur et son bouchon

Les spécifications d'acceptation des colis primaires dans Cigéo, n'ont pas à ce stade été établies par l'Andra dans une version finalisées. En revanche, des conteneurs de type C1PG sont déjà utilisés pour le conditionnement de déchets de Faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) produits par EDF et stockés au Centre de stockage de l'Aube (CSA) de l'Andra. Aussi, en l'absence de spécifications d'acceptation stabilisées des colis primaires dans Cigéo, EDF choisit de qualifier les performances mécaniques et de confinement du conteneur C1PG^{SP} et de son bouchon selon les exigences du CSA.

EDF souligne que l'épaisseur minimale de béton du conteneur et de son bouchon est supérieure à l'épaisseur requise pour assurer le confinement des radionucléides et que la tenue du conteneur sous une charge de 0,35 MPa est compatible avec un gerbage sur 3 niveaux comme retenu dans ICEDA.

En complément, dans le cadre du programme de qualification du colis C1PG^{SP} à produire dans ICEDA, EDF a réalisé des essais (suivi de fissuration et test d'étanchéité) montrant la qualité de la liaison entre le conteneur et son bouchon.

⁵ Le choix d'une masse minimale de déchets revient à maximiser le volume de coulis cimentaire et ainsi à accentuer l'effet exothermique dû à sa prise.

iii. *Colis C1PG^{SP}*

Pour ce qui concerne le programme de qualification du colis C1PG^{SP} une fois rempli et obturé, EDF a réalisé des essais de tenue à la chute du colis sur dalle indéformable, à une hauteur couvrant la hauteur de manutention des colis dans ICEDA. Ceux-ci ont montré le maintien de l'intégrité des liaisons entre les constituants du colis. S'agissant de la tenue au feu, EDF a réalisé un essai au feu d'un prototype de colis C1PG contenant une matrice époxy de conditionnement de résines échangeuses d'ions. EDF indique que le colis a conservé sa structure et est resté manutentionnable. Le colis pris en compte dans l'essai présente une charge calorifique plus importante que celle du colis C1PG^{SP} qui sera produit dans ICEDA. L'IRSN considère donc que l'essai réalisé permet de qualifier la tenue au feu du colis C1PG^{SP}.

iv. *Conclusion*

L'IRSN estime que l'ensemble du programme de qualification des matériaux cimentaires, du conteneur et de son bouchon ainsi que du colis C1PG^{SP}, tel que conduit par EDF, apporte des éléments suffisamment probants pour s'assurer du respect des exigences de confinement et des performances mécaniques du colis attendues à sa production.

L'IRSN souligne toutefois que la faisabilité industrielle de production du colis reste à démontrer et que certaines conditions de fabrication restent à préciser ou à confirmer. A ce sujet, l'IRSN rappelle que la mise en service de l'installation ICEDA nécessitera au préalable la réalisation de différentes campagnes d'essais relatives au procédé de fabrication du colis C1PG^{SP}.

Le maintien des performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP} en entreposage puis en phase d'exploitation et de réversibilité du stockage est examiné plus particulièrement au paragraphe VI.

V. Paramètres garantis

EDF définit, sur la base du programme de qualification examiné *supra*, des paramètres permettant de garantir l'atteinte des performances mécaniques et de confinement attendues aux différentes étapes de gestion du colis C1PG^{SP} (fabrication, entreposage, stockage). Ces paramètres garantis constituent des données d'entrée de la démonstration de sûreté des diverses installations dans lesquelles le colis à vocation à être géré. Suite aux échanges intervenus avec l'IRSN en cours d'examen, EDF a convenu de l'utilité de modifier et ajouter certains paramètres garantis importants pour la maîtrise de la qualité du colis ou la démonstration de sûreté d'ICEDA (paramètres relatifs aux déchets interdits et autorisés avec restriction, masses minimale et maximale de déchets par colis, activité maximale par colis etc.). En conséquence, EDF s'est engagé à prendre en compte la liste consolidée des paramètres garantis dans une mise à jour du référentiel de conditionnement des déchets MA-VL en colis C1PG^{SP} dans ICEDA.

Afin de prévenir les risques de RSI, EDF avait initialement fait le choix de retenir comme paramètre garanti la température maximale à cœur du coulis cimentaire. L'IRSN rappelle que celle-ci ne peut être évaluée que par corrélation avec la température de l'air dans l'empilement des colis (cf. *supra*). Or, cette dernière n'est pas mesurable en conditions d'exploitation de l'entreposage. Pour lever cette

difficulté, EDF propose de s'appuyer sur les résultats d'une étude aéraulique 3D pour justifier que la température de l'air à l'extraction de la ventilation de chaque hall est représentative de celle de l'air dans l'empilement de colis. L'IRSN note que ce point devra être confirmé lors de l'examen de l'étude aéraulique 3D qu'EDF doit remettre en appui de sa demande d'autorisation de mise en service (DAMS) d'ICEDA.

En conclusion, au regard de l'étude aéraulique 3D susmentionnée et afin de justifier le respect des températures seuil fixées pour prévenir les risques de RSI, l'IRSN recommande qu'EDF évalue la pertinence de retenir comme paramètre garanti pour la phase d'entreposage, la température de l'air à l'extraction de la ventilation de chaque hall. Ce point fait l'objet de la recommandation R3 en annexe du présent avis. L'IRSN attire l'attention sur le fait que cette recommandation est liée aux résultats de l'examen de l'étude aéraulique 3D susmentionnée et pourra être amendée en conséquence.

VI. Comportement du colis en entreposage dans ICEDA et en phase d'exploitation et de réversibilité du stockage

Les fonctions attendues du colis C1PG sont :

- d'assurer le confinement des déchets pendant la durée de son entreposage dans ICEDA et pendant la phase d'exploitation et de réversibilité de Cigéo ;
- de maintenir sa tenue mécanique pendant la durée de son entreposage dans ICEDA. Le maintien des performances mécaniques reste également requis pendant la phase d'exploitation et de réversibilité de Cigéo dans le cas d'une mise en stockage sans conteneur de stockage.

S'agissant de la tenue du béton sous irradiation, EDF considère qu'il est possible d'écartier tout risque de dégradation notable de ses performances mécaniques et de confinement. L'IRSN estime que cette position est justifiée au vu des données fournies par la littérature scientifique pour les niveaux d'irradiation attendus dans les colis C1PG^{SP}. En revanche, l'IRSN souligne que, pour ces niveaux d'irradiation, la production de gaz par radiolyse de l'eau porale des matériaux cimentaires du colis constitue un sujet d'attention important. L'accumulation de gaz peut en effet conduire à une mise en pression du colis se traduisant par des contraintes mécaniques susceptibles d'entraîner une dégradation de ses performances. Afin d'évaluer les conséquences possibles d'une accumulation de gaz, EDF a mené une étude pour estimer la production d'hydrogène d'un colis C1PG^{SP} et en déduire la pression résultante au sein du colis. Pour cela, il a calculé les débits de KERMA⁶ dans le coulis cimentaire et le béton de colis C1PG^{SP} pour une activité radiologique, en émetteurs β et γ forts, maximale de 400 TBq par colis, puis a évalué la production annuelle d'hydrogène par radiolyse d'un colis C1PG^{SP} à l'aide du code CHEMSIMUL et du modèle DOREMI selon deux configurations, dites « arrangement 1 »⁷ et « arrangement 4 »⁸, dans des conditions d'entreposage conservatives en termes

⁶ Le débit de KERMA (Kinetic Energy Release in Material) est un débit de dose transférée. Il représente la quantité d'énergie cinétique transférée aux particules chargées qui sont mises en mouvement suite aux interactions des rayonnements ionisants dans un volume élémentaire.

⁷ Colis contenant une faible quantité de déchets (pour maximiser la quantité d'eau porale) et dont l'activité radiologique en émetteurs β et γ est de 400 TBq.

⁸ Colis contenant une quantité réaliste de déchets et dont l'activité radiologique en émetteurs β et γ est de 400 TBq.

de température et d'humidité relative.

Pour ce qui concerne les valeurs de débits de KERMA obtenues par EDF, l'IRSN souligne qu'elles sont cohérentes avec les résultats de ses propres calculs.

S'agissant de la production annuelle d'hydrogène par radiolyse d'un colis C1PG^{SP}, les résultats des calculs réalisés par EDF montrent que le débit d'hydrogène produit au cours du temps reste toujours inférieur à la valeur maximale de 40 L/an fixée par l'Andra dans les spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires dans Cigéo pour un colis placé seul dans un conteneur de stockage⁹, ce qui serait le cas du colis C1PG^{SP} compte tenu de ses dimensions.

L'IRSN note que dans les calculs réalisés par EDF seule la contribution de la radiolyse de l'eau porale du coulis cimentaire à la production d'hydrogène est estimée. EDF considère en effet que la contribution à la production d'hydrogène de la radiolyse de l'eau porale du béton est négligeable compte tenu d'un débit de KERMA dans le béton moindre que celui observé dans le coulis cimentaire. Néanmoins, EDF a précisé au cours de l'examen que des calculs complémentaires étaient en cours pour confirmer ce point. **L'IRSN estime que, dans le cas où les calculs complémentaires ne permettraient pas de justifier le caractère négligeable de la contribution de la radiolyse de l'eau porale du béton du conteneur et du bouchon, EDF devra la prendre en compte dans l'évaluation de la production d'hydrogène de radiolyse dans un colis C1PG^{SP}. Ceci fait l'objet de la recommandation R4 en annexe du présent avis.**

Par ailleurs, l'IRSN note que le modèle DOREMI utilisé pour déterminer la production d'hydrogène de radiolyse dans le coulis cimentaire en fonction de sa saturation en eau et du débit de KERMA ne permet pas de rendre compte de l'effet de la température sur les rendements radiolytiques primaires et sur les constantes cinétiques, ce qui engendre des incertitudes sur le volume d'hydrogène produit. En outre, la radiolyse des adjuvants contenus dans les matériaux cimentaires et ses effets induits en matière de production d'hydrogène et d'espèces formées ne sont pas pris en compte. **Nonobstant les incertitudes ci-avant, l'IRSN convient qu'EDF a procédé à l'évaluation de la production d'hydrogène de radiolyse dans le coulis cimentaire en fonction du débit de KERMA et de la saturation en eau du matériau avec les meilleures connaissances disponibles à ce jour.**

L'IRSN note également que le taux de saturation en eau du coulis cimentaire est un paramètre essentiel dans l'estimation de la production d'hydrogène de radiolyse. Or, il dépend de la perméabilité à l'eau du béton du conteneur et du bouchon. Celle-ci fait l'objet d'une détermination expérimentale dans le cadre d'un programme d'étude de trois ans lancé par EDF fin 2017. EDF a indiqué au cours de l'examen qu'il prévoyait de réévaluer la production d'hydrogène de radiolyse d'un colis C1PG^{SP} selon les arrangements 1 et 4 dès lors que les résultats des études de détermination de la perméabilité à l'eau du béton seront connus. **Ce point fait l'objet de la recommandation R5 en annexe du présent avis.**

EDF déduit du débit d'hydrogène de radiolyse produit, la pression d'hydrogène dans un colis C1PG^{SP}. La pression ainsi obtenue est faible et conduit à estimer la contrainte mécanique en traction qui s'exercerait sur le béton du conteneur et du bouchon à une valeur inférieure à 0,5 MPa, soit bien en-deçà de la résistance mécanique en traction du béton (5,19 MPa). **L'IRSN convient que les**

⁹ La valeur maximale pour un colis primaire stocké sans conteneur de stockage n'est pas encore connue.

contraintes induites par la seule pression d'hydrogène de radiolyse dans le colis ne sont pas de nature à dégrader ses performances mais rappelle toutefois que la réduction des incertitudes sur la production d'hydrogène de radiolyse d'un colis C1PG^{SP} dépend du résultat des études en cours.

De plus, compte tenu de l'humidité relative faible et de la température élevée attendues en entreposage, EDF a complété, au cours de l'examen effectué par l'IRSN, le calcul des contraintes mécaniques s'exerçant sur le colis en prenant également en compte l'influence de la dessiccation du béton. Selon EDF, les contraintes mécaniques cumulées induites dans le colis conduiraient, après 50 ans d'entreposage, à une épaisseur dégradée de l'ordre du quart de l'épaisseur du conteneur, ce qui ne serait pas préjudiciable au confinement des radionucléides et à la tenue sous charge du colis. Toutefois, l'IRSN souligne que les modèles utilisés par EDF pour le calcul des contraintes mécaniques s'exerçant dans le colis ne sont pas validés pour de faibles humidités relatives et que les éléments apportés ne préjugent en rien de la tenue à la chute du colis lors de manutentions à l'issue de sa période d'entreposage. Compte tenu des éléments mentionnés *supra*, EDF a engagé, fin 2017, un programme d'étude de trois ans comprenant des travaux numériques et des essais sur le comportement dans le temps du béton du colis C1PG^{SP} soumis à différentes humidités relatives et températures (étude des phénomènes hydriques, étude du retrait de dessiccation, étude du fluage etc.). L'IRSN estime nécessaire de disposer des résultats de ce programme d'étude pour se prononcer sur le maintien dans le temps des performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP}, en particulier dans les conditions d'entreposage dans ICEDA (faible humidité relative et température élevée), et souligne l'importance de prendre en compte de manière intégrée l'ensemble des phénomènes de dégradation possibles du béton (dessiccation, fluage, carbonatation, pression d'hydrogène etc.).

L'IRSN souligne par ailleurs que ce programme devrait contribuer à la justification par EDF du maintien des performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP} sur une durée couvrant la période d'exploitation et de réversibilité du stockage dans les conditions d'ambiance thermique, hydraulique, mécanique et chimique qui seront précisées par l'Andra à l'occasion de la DAC de Cigéo.

Au cours de l'examen conduit par l'IRSN, EDF a proposé, dans l'attente des résultats de son programme d'étude, de restreindre le référentiel de conditionnement des déchets MA-VL en colis C1PG^{SP} en limitant la puissance thermique maximale autorisée dans les halls d'entreposage (référentiel dit « restreint »). Cette limitation de puissance thermique par hall implique l'entreposage d'un nombre limité de colis et/ou l'entreposage de colis présentant de faibles puissances thermiques. Ce référentiel restreint permettrait de se placer dans des conditions d'humidité relative de l'air ambiant pour lesquelles les modèles utilisés par EDF dans l'évaluation des contraintes mécaniques s'exerçant dans le colis, du fait de la pression d'hydrogène de radiolyse et du retrait de dessiccation, sont valides. L'IRSN estime que ce référentiel restreint est acceptable sous réserve qu'EDF apporte les éléments de démonstration du maintien des performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP} (incluant en particulier la tenue à la chute du colis lors de manutentions) sur la durée d'entreposage dans ICEDA. Ceci fait l'objet de la recommandation R6 en annexe du présent avis.

VII. Surveillance des colis en entreposage

EDF prévoit de surveiller l'évolution de colis témoins en entreposage dans ICEDA. Cette surveillance, consistant en un contrôle télévisuel annuel de l'intégrité des colis et en un contrôle annuel d'absence de contamination surfacique, fera l'objet d'un compte-rendu transmis chaque année à l'ASN et traçant les résultats des contrôles réalisés. Par ailleurs, EDF a confirmé, au cours de l'analyse menée par l'IRSN, la mise en œuvre d'une surveillance, au moins équivalente à celle appliquée aux colis témoins, pour les colis présentant une non-conformité de nature à remettre en cause leurs performances de confinement (telles qu'une hauteur de bouchon trop faible, une fissure etc.). **Ces éléments sont jugés satisfaisants par l'IRSN.**

Pour ce qui concerne la maîtrise du risque de RSI, l'IRSN estime que la mesure en continu de la température de l'air à l'extraction de la ventilation de chaque hall d'entreposage, sous réserve des résultats de l'étude aéraulique 3D mentionnée au paragraphe V, permettrait de surveiller la température de l'air dans l'empilement et de s'assurer ainsi du conservatisme des hypothèses retenues. Ces éléments conduisent à la recommandation R7 en annexe du présent avis.

Compte tenu de l'enjeu associé à la production d'hydrogène de radiolyse, EDF prévoit l'instrumentation d'un colis C1PG^{SP} afin de conforter, par des résultats expérimentaux, les estimations de production d'hydrogène obtenues par calcul et de confirmer le respect de la valeur maximale de 40 L/an fixée par l'Andra dans les spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires dans Cigéo pour un colis placé seul dans un conteneur de stockage. L'IRSN rappelle les incertitudes résiduelles quant à l'estimation de la production annuelle d'hydrogène de radiolyse par les colis et recommande qu'EDF procède, dès que possible, à l'instrumentation d'un colis afin de mesurer le débit d'hydrogène annuel et de confronter le résultat obtenu aux estimations faites. Ce point fait l'objet de la recommandation R8 en annexe du présent avis.

VIII. Acceptabilité du colis dans le stockage et comportement après fermeture du stockage

Il existe des incertitudes quant au maintien des performances du colis C1PG^{SP} au cours de son entreposage dans ICEDA. Pour lever ces incertitudes, EDF a lancées, fin 2017, des études complémentaires sur le comportement du béton et donc sur la tenue mécanique et le confinement du colis C1PG^{SP} (cf. paragraphe VI). Aussi, il faut attendre les résultats de ces études pour se prononcer sur l'acceptabilité des colis C1PG^{SP} dans Cigéo, *a fortiori* dans le cas d'un stockage de ces colis sans conteneur de stockage, ce qui constitue l'option envisagée par l'Andra au stade du Dossier d'options de sûreté (DOS).

Par ailleurs, si les caractéristiques du colis C1PG^{SP} sont en adéquation avec la puissance thermique de 60 W définie à ce jour dans les spécifications d'acceptation des colis primaires dans Cigéo, des valeurs spécifiques de puissance thermique pourraient être définies par l'Andra pour les colis primaires MA-VL dits « à décroissance thermique lente ». Or, du fait de la présence d'^{108m}Ag notamment, l'IRSN considère que la décroissance thermique de certains colis C1PG^{SP} pourrait relever de ces dispositions particulières.

Enfin, si les études montrent une production d'hydrogène de radiolyse inférieure à 40 L/an/colis, valeur maximale fixée par l'Andra dans les spécifications préliminaires d'acceptation des colis

primaires dans Cigéo pour un colis placé seul dans un conteneur de stockage, l'IRSN rappelle les incertitudes relatives à cette estimation et remarque qu'elle ne tient pas compte de l'hydrogène susceptible d'être produit par corrosion des éléments métalliques du colis (armatures et déchets) en conditions de stockage. Sur ce dernier point, EDF a indiqué qu'un programme d'étude était en cours pour évaluer la production d'hydrogène additionnelle associée à la corrosion et vérifier que les quantités totales d'hydrogène produites ne remettent pas en cause le respect de la valeur maximale susmentionnée.

En tout état de cause, EDF a indiqué au cours de l'examen que l'acceptabilité du colis C1PG^{SP} dans le stockage Cigéo sera à nouveau analysée à réception des spécifications d'acceptation des colis primaires qui seront transmises dans le cadre de la DAC de l'installation de stockage.

Pour ce qui concerne le comportement des colis C1PG^{SP} après fermeture du stockage, EDF a indiqué au cours de l'examen qu'il retenait un relâchement instantané et complet (relâchement labile) à 300 ans¹⁰ des radionucléides contenus dans les déchets. Considérant les incertitudes relatives au maintien des performances du colis C1PG^{SP} au cours de son entreposage dans ICEDA puis au cours de la période d'exploitation et de réversibilité du stockage, l'IRSN estime que l'échéance à 300 ans pour le début du relâchement n'est pas démontrée. En outre, dans le cadre de l'expertise du DOS de Cigéo, l'IRSN a examiné les modèles de relâchement proposés par l'Andra pour chaque type de colis attendu dans le stockage, dont les colis contenant des déchets métalliques tels que les colis C1PG^{SP}. Sur la base de cet examen, l'IRSN a estimé que le modèle de relâchement progressif au gré des mécanismes de corrosion utilisé par l'Andra pour traduire le relâchement des produits d'activation contenus dans des pièces métalliques était applicable. En regard de ce modèle, l'IRSN note que le relâchement labile retenu par EDF pour la totalité des colis C1PG^{SP} apparaît excessivement conservatif. **Compte tenu des éléments susmentionnés, l'IRSN estime qu'EDF devrait reconsidérer les hypothèses retenues (date de début et modèle de relâchement) pour définir le relâchement des radionucléides contenus dans les déchets conditionnés en colis C1PG^{SP} après fermeture du stockage.**

IX. Conclusion

L'IRSN note que les éléments apportés par EDF en support à sa demande d'accord de conditionnement des déchets MA-VL en colis C1PG^{SP} dans ICEDA sont globalement satisfaisants du point de vue de l'inventaire des déchets à conditionner, du programme de qualification du colis C1PG^{SP} produit, des paramètres garantis ainsi que de la surveillance des colis C1PG^{SP} en entreposage dans ICEDA.

Cependant, des incertitudes ont été relevées par l'IRSN quant au maintien des performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP} durant toute la période d'entreposage dans ICEDA, puis au cours de la période d'exploitation et de réversibilité du stockage Cigéo. Aussi, le référentiel de conditionnement des déchets MA-VL en colis C1PG^{SP} dans ICEDA, tel que transmis en vue du présent examen, devra faire l'objet de compléments au travers notamment de la transmission des résultats des études lancées fin 2017 par EDF sur le comportement du béton et la tenue mécanique et le

¹⁰ L'échéance de 300 ans est à considérer par rapport à la date de production du colis et s'appuie sur la durabilité du colis selon EDF, par analogie avec les conteneurs de type C1PG déjà utilisés pour le conditionnement de ses déchets FMA-VC stockés au CSA.

confinement du colis C1PG^{SP}.

L'IRSN note que, au cours de l'analyse qu'il a menée, EDF a proposé de définir un référentiel de conditionnement dit « restreint » reposant sur la limitation de la puissance thermique dans les halls d'entreposage, de manière à ce que l'humidité relative de l'air ambiant s'inscrive dans le domaine de validité des modèles utilisés par EDF dans l'évaluation des contraintes mécaniques s'exerçant dans le colis. L'IRSN considère que ce référentiel restreint peut permettre de lever les incertitudes relatives au maintien des performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP} durant toute la période d'entreposage dans ICEDA, puis au cours de la période d'exploitation et de réversibilité du stockage Cigéo, sous réserve qu'EDF prenne en compte les recommandations formulées en annexe du présent avis.

Pour le Directeur général, par ordre

GAY Didier

Adjoint au Directeur de l'Environnement

Recommandations

L'IRSN recommande qu'EDF :

- R1. réalise une étude de sensibilité de la carbonatation du béton du conteneur et de son bouchon, à la température et à l'humidité relative, sur un domaine permettant de couvrir les conditions auxquelles seront soumis les colis C1PG^{SP} en entreposage dans ICEDA ;
- R2. adapte les valeurs des paramètres à retenir dans le procédé de fabrication du colis C1PG^{SP} (température du coulis cimentaire de blocage, température des locaux etc.) en fonction des résultats de l'étude en cours destinée à affiner la modélisation des déchets dans le colis C1PG^{SP}. Cette adaptation devra permettre de garantir le respect d'une température inférieure à 75°C au cœur du coulis cimentaire pour prévenir les risques de réaction sulfatique interne et devra tenir compte, d'une part des incertitudes associées aux résultats du modèle de comportement thermique des colis C1PG^{SP} au moment du pic thermique en phase de blocage des déchets, d'autre part des différentes natures de déchets susceptibles d'être conditionnés ;
- R3. évalue la pertinence de retenir comme paramètre garanti pour la phase d'entreposage la température de l'air à l'extraction de la ventilation de chaque hall d'entreposage. Cette évaluation se basera sur l'étude aéraulique 3D qu'EDF doit remettre en appui de sa demande d'autorisation de mise en service d'ICEDA. Le paramètre garanti qui sera retenu doit permettre de justifier le respect des températures seuil de, respectivement, 65 et 75°C à cœur du coulis cimentaire, en fonctionnement normal et en cas de perte prolongée de la ventilation, fixées pour prévenir les risques de réaction sulfatique interne ;
- R4. dès lors qu'il n'aura pas été possible de justifier que la quantité d'hydrogène issue de la radiolyse de l'eau porale du béton constitutif du conteneur et de son bouchon est négligeable, réévalue la production d'hydrogène de radiolyse d'un colis C1PG^{SP}. Cette réévaluation prendra en compte la contribution de la radiolyse de l'eau porale du coulis cimentaire ainsi que celle de l'eau porale du béton et sera faite pour un colis non optimisé vis-à-vis du remplissage (arrangement 1) et pour un colis optimisé vis-à-vis du remplissage (arrangement 4) ;
- R5. présente, dans une mise à jour du référentiel de conditionnement des déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) en colis C1PG^{SP} dans ICEDA, la réévaluation de la production d'hydrogène de radiolyse d'un colis C1PG^{SP}. Cette réévaluation prendra en compte, lorsqu'ils seront connus, les résultats des études de détermination de la perméabilité à l'eau du béton du conteneur et de son bouchon et couvrira le cas d'un colis non optimisé vis-à-vis du remplissage (arrangement 1) et celui d'un colis optimisé vis-à-vis du remplissage (arrangement 4) ;

- R6. évalue les contraintes mécaniques exercées sur le colis C1PG^{SP} dans les conditions d'entreposage attendues dans un hall dont la puissance thermique serait limitée (référentiel dit « restreint »), et justifie le maintien des performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP} (incluant en particulier la tenue à la chute du colis lors de manutentions) sur la durée d'entreposage dans ICEDA ;
- R7. mesure en continu la température de l'air à l'extraction de la ventilation de chaque hall afin de s'assurer du conservatisme des hypothèses retenues dans les études du comportement du colis C1PG^{SP} en entreposage dans ICEDA vis-à-vis du risque de réaction sulfatique interne ;
- R8. procède, dès que possible, à l'instrumentation d'un colis afin de conforter les estimations de production d'hydrogène par des résultats expérimentaux.