



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 27 juillet 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2023-00117

Objet : Poursuite du conditionnement en colis C1PG^{SP} sur Iceda au delà du 31 décembre 2023 – Compléments des études « colis » intégrées au référentiel de conditionnement à l'indice F

Réf. : Lettre CODEP-DRC-2023-001420 du 31 janvier 2023

La décision CODEP-DRC-2021-013808 du 19 juillet 2021, autorisant le conditionnement des déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) en colis C1PG^{SP} dans l'installation de conditionnement et d'entreposage des déchets activés (INB n°173/Iceda), soumet la poursuite du conditionnement au-delà du 31 décembre 2023 à la transmission d'études ou de compléments relatifs au comportement thermique des colis en phases de fabrication et d'entreposage, à l'effet de la radiolyse et du séchage au cours de l'entreposage sur la tenue mécanique du colis ainsi qu'au phénomène de carbonatation. Le 28 décembre 2022, Electricité de France (EDF) a transmis à l'ASN une mise à jour du référentiel de conditionnement en colis C1PG^{SP} intégrant les résultats de telles études. Par lettre citée en référence, l'ASN sollicite l'avis de l'IRSN sur la poursuite du conditionnement à Iceda des déchets MA-VL en colis C1PG^{SP} au-delà du 31 décembre 2023, sur la base des résultats de ces études. L'ASN demande également la position de l'IRSN sur les éléments de justification visant à abroger les prescriptions [C1PG^{SP}-4] et [C1PG^{SP}-5] de la décision précitée, ainsi que les réponses aux demandes [D-C1PG^{SP}-4], [D-C1PG^{SP}-5] et [D-C1PG^{SP}-6] du courrier ASN CODEP-DRC-2021-013776 du 19 juillet 2021, rappelées en annexe du présent avis.

1. CONTEXTE TECHNIQUE

Le référentiel de conditionnement en colis C1PG^{SP} couvre les déchets activés de démantèlement (essentiellement des aciers noirs et inoxydables, des matériaux absorbants et du Pyrex) des centrales nucléaires de première génération et de Creys-Malville, ainsi que des déchets activés d'exploitation (grappes, doigts de gants, etc.) des centrales nucléaires à eau pressurisée. Le conditionnement de ces déchets en colis C1PG^{SP} consiste, après découpe éventuelle des déchets, à les immobiliser par un coulis cimentaire dans un panier cylindrique en acier inoxydable. Ce panier est ensuite placé et immobilisé au moyen du même coulis cimentaire dans un conteneur cylindrique en béton armé hautes performances bouché par la coulée d'un béton de même formulation que celle du conteneur.

Les colis C1PG^{SP} sont destinés à être entreposés dans un hall ventilé de l'installation Iceda pendant plusieurs décennies, avant leur envoi pour stockage dans l'installation Cigéo. Le principal enjeu de sûreté associé au colis

MEMBRE DE
ETSON

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, par la production d'hydrogène, ainsi que par la carbonatation des matériaux cimentaires. Ces effets sont à considérer tant au cours des phases de fabrication et d'entreposage dans Iceda que lors de la phase d'exploitation de Cigéo, l'Andra envisageant le stockage direct de ces colis, sans conteneur de stockage.

2. COMPORTEMENT THERMIQUE DES COLIS C1PG^{SP}

L'exothermie importante des coulis cimentaires fluides lors de leur prise et la puissance thermique des déchets ont conduit EDF à identifier un risque de réaction sulfatique interne¹ (RSI) pour les colis C1PG^{SP}. La maîtrise de la température durant les phases de fabrication et d'entreposage des colis constitue donc un enjeu important consistant, 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 conditions d'entreposage dans Iceda la température à cœur du coulis cimentaire reste inférieure à 65°C et 75°C, respectivement en fonctionnement normal et en cas de perte prolongée de la ventilation. Ces températures maximales ont fait l'objet de l'expertise de l'IRSN dans son avis de novembre 2018 relatif à l'accord de conditionnement en colis C1PG^{SP}.

2.1. COMPORTEMENT THERMIQUE DU COLIS C1PG^{SP} EN PHASE DE FABRICATION

Au stade du précédent avis de l'IRSN de novembre 2018, une première étude du comportement thermique des colis avait été conduite par EDF au moyen d'un modèle qualifié par des essais en inactif à l'échelle 1:1. Cette étude montrant un dépassement de la température seuil de 75°C pour certaines valeurs de paramètres de fabrication (température du coulis, température des locaux, etc.), EDF avait indiqué initier une nouvelle étude pour affiner la modélisation du comportement thermique des colis et les valeurs de paramètres de procédé à garantir pour respecter le seuil de 75°C. Dans ce cadre, l'IRSN recommandait également qu'EDF tienne compte des différentes natures de déchets à conditionner (déchets métalliques et Pyrex).

Ainsi, EDF a réalisé des essais complémentaires, consistant à bloquer cinq paniers remplis avec 400 kg de déchets de type crayons en acier inoxydable, instrumentés en thermocouples et contenant chacun une résistance chauffante à 170 W. EDF justifie le caractère enveloppe des paniers ainsi constitués par la puissance thermique maximale et par la masse minimale de déchets retenues (400 kg contre une masse dite réaliste de 1990 kg² et une masse maximale de 2500 kg), correspondant aux limites autorisées par le domaine de fonctionnement d'Iceda. En effet, cette faible masse de déchets minimise la dissipation de chaleur liée à la présence de déchets métalliques, tandis que le volume de coulis, et donc son exothermie liée aux réactions d'hydratation, est maximisé. L'IRSN relève que, dans une configuration enveloppe vis-à-vis de la puissance thermique et de la masse de déchets, les températures maximales mesurées à cœur des colis instrumentés montrent une bonne répétabilité et sont comprises entre 67,5°C et 68,4°C. Les résultats de ces essais complémentaires tendent donc à confirmer le respect du seuil de maîtrise du risque de RSI fixé à 75°C en phase de fabrication. L'IRSN souligne toutefois que ces essais complémentaires ne prennent pas en compte les différences de comportement thermique entre les déchets de différentes natures (métalliques et Pyrex).

¹ La RSI correspond à la formation d'ettringite (trisulfo-aluminate de calcium) secondaire (ou différée) du fait de la présence conjointe de sulfates en solution et d'aluminates en phase solide, associée à un cycle de température. En effet, l'ettringite primaire, stable à température ambiante, se décompose au-delà d'un seuil de température proche de 65°C. Lors d'une diminution de la température, l'ettringite secondaire peut se former en occupant un volume plus important, pouvant conduire à un gonflement interne susceptible de porter atteinte aux propriétés mécaniques du matériau cimentaire.

² Masse dite 'réaliste' permettant d'après EDF d'obtenir un bon niveau de remplissage avec une répartition homogène de l'activité radiologique dans le volume panier/colis.

Eu égard à ce dernier point, l'IRSN relève que, parallèlement à ces essais complémentaires, EDF a poursuivi le développement d'un modèle numérique du comportement thermique des colis C1PG^{SP} intégrant la chaleur d'hydratation du coulis lors de sa prise, la conduction des différents matériaux présents dans le colis, les pertes radiatives et les échanges avec l'air ambiant. La cohérence des profils de température expérimentaux et modélisés conduit EDF à qualifier ce modèle de prédictif. Concernant le pic thermique, l'IRSN note un écart inférieur à 1°C entre ces deux profils de température. Ce modèle a notamment permis à EDF de simuler le comportement thermique d'un colis rempli de déchets acier inoxydable/Pyrex dans une configuration pénalisante (masse de déchets minimale de 400 kg, puissance thermique maximale de 170 W, températures maximales de la cellule de blocage et du coulis cimentaire respectivement de 28°C et 10°C³), avec une hypothèse pénalisante minorant la conductivité thermique du Pyrex, et par conséquent celle du coulis intégrant les déchets. La température maximale atteinte au cours de cette modélisation est de 74°C. Les modélisations ont donc permis de prendre en compte les différences de conductivité thermique entre les déchets de différente nature (métalliques et Pyrex) pour évaluer le comportement thermique des colis C1PG^{SP} en phase de fabrication. A cet égard, bien que la température calculée soit proche de la valeur seuil de 75°C, l'IRSN considère que la nature différente des déchets contenus ne remet pas en cause la maîtrise du risque de RSI, compte tenu du caractère pénalisant des hypothèses de calcul (masse minimale et puissance thermique maximale des déchets en particulier). **Aussi, malgré la faible marge observée par rapport au seuil de maîtrise du risque de RSI en phase de fabrication, l'IRSN estime que les études complémentaires transmises par EDF confirment l'absence de risque de RSI en phase de fabrication, et ce pour les différentes natures de déchets pouvant être conditionnés en colis C1PG^{SP}.**

2.2. COMPORTEMENT THERMIQUE DES COLIS C1PG^{SP} EN PHASE D'ENTREPOSAGE

Dans sa demande [D-C1PG^{SP}-6], l'ASN préconise la définition d'une température de l'air extrait des halls d'entreposage représentative d'une température à cœur des colis de 65°C, cette température pouvant constituer un paramètre garanti à maîtriser afin de s'assurer de l'absence de risque de RSI en phase d'entreposage.

Afin d'étudier l'évolution de la température à cœur des colis au cours de leur entreposage et, le cas échéant, de confirmer la représentativité de la température de l'air extrait des halls, EDF a développé un modèle couplé du comportement aérodynamique et thermique d'un hall d'entreposage d'Iceda. Estimant les temps et puissance de calcul trop importants en régime instationnaire⁴ pour une modélisation 3D, EDF a retenu un modèle simplifié dit « thermique/fluide OD ». Ainsi, la modélisation du comportement aérodynamique s'effectue par zones au sein desquelles sont calculées des températures moyennes de l'air par des bilans d'énergie comprenant l'énergie résiduelle des colis et l'effet de la ventilation. La modélisation du comportement thermique du hall intègre :

- les échanges convectifs entre l'extérieur et le bâti, considérés à partir des températures extérieures, des vitesses du vent et de l'apport solaire à travers les transferts radiatifs ;
- les échanges convectifs entre la peau des colis et l'air du hall, calculés à partir de la température d'air moyenne de la zone considérée et un coefficient d'échange convectif de $4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;
- les échanges de conduction à travers les colis et le bâti ;
- les échanges radiatifs entre chaque colis et son environnement (le bâti).

Afin de qualifier ce modèle simplifié, EDF a réalisé une modélisation 3D en régime stationnaire avec des hypothèses similaires, à savoir un hall plein rempli progressivement pendant 30 ans par des colis contenant 400 kg de déchets métalliques et présentant une puissance thermique maximale de 170 W (soit une puissance résiduelle totale de 80 kW par hall d'entreposage). La comparaison des résultats obtenus avec les deux modèles montre un faible écart entre, d'une part les températures moyennées de l'air du hall, d'autre part les

³ EDF définit des paramètres garantis de procédé imposant une température du coulis inférieure à 10°C et une température de l'air à l'extraction de la cellule de blocage entre 5°C et 25°C.

⁴ Prenant en compte les variations de températures extérieures.

températures à cœur des colis (écart de 0,3°C). L'IRSN relève également que la faible valeur du coefficient d'échange retenu pour évaluer les échanges thermiques entre la peau des colis et l'air du hall permet, en minimisant les échanges thermiques, de maximiser la température à cœur des colis. L'IRSN estime ainsi que la démarche retenue par EDF pour développer et qualifier un modèle simplifié de comportement couplé aérodynamique et thermique d'un hall d'entreposage d'Iceda est adaptée à la réalisation de l'étude.

En situation normale de fonctionnement de la ventilation, EDF considère quatre scénarios prenant en compte des données météorologiques différentes : les données météorologiques de l'année 2003 sur le site de Bugey, ces mêmes données incrémentées de 2°C puis 4°C afin de prendre en compte le réchauffement climatique et un scénario prolongeant indéfiniment les températures caniculaires de l'été 2003. Pour l'ensemble de ces scénarios, la température à cœur des colis obtenue avec le modèle simplifié reste inférieure au seuil de maîtrise du risque de RSI fixé à 65°C en fonctionnement normal, avec une asymptote thermique inférieure à 64°C pour le dernier scénario. De la même manière, la température à cœur des colis reste inférieure au seuil de 65°C lors de modélisations similaires considérant un hall rempli de colis contenant 400 kg d'un mélange de déchets acier inoxydable/Pyrex. Des modélisations considérant des remplissages de colis plus proches de l'attendu pour l'ensemble de la production de colis C1PG^{SP} (730 kg et 1460 kg de déchets métalliques par colis) ont également été réalisées par EDF afin d'apprécier les marges liées à ce paramètre. Dans ces configurations, le pic thermique à cœur des colis est proche de 55°C. L'IRSN relève qu'EDF aurait pu retenir, par souci de cohérence, les chroniques de températures définies dans le référentiel « grand chaud » du site de Bugey. Ce référentiel préconise en effet d'appliquer un profil de température sinusoïdal avec un minimum à 27,5°C et un maximum à 44,4°C, illustrant les variations jour/nuit, et ce pendant 14 jours consécutifs avec une température initiale de 23,5°C. **Néanmoins, eu égard aux hypothèses particulièrement pénalisantes adoptées par EDF dans le cadre de cette étude thermique, en particulier celles liées à la puissance thermique maximale par colis et à la masse minimale de déchets par colis retenues pour l'ensemble des colis entreposés, situation peu réaliste à l'échelle de l'ensemble de la production de colis C1PG^{SP}, l'IRSN estime que les résultats des modélisations effectuées par EDF confirment le respect du seuil de maîtrise du risque de RSI en fonctionnement normal.**

En situation accidentelle (perte de la ventilation), EDF ne considère que la convection naturelle dans son modèle simplifié, avec deux scénarios prenant en compte des échanges conductifs, convectifs et radiatifs : des pertes de ventilation le 1^{er} juillet en début de période chaude et début août, lorsque les colis sont les plus chauds, avec dans les deux cas une prolongation de la canicule sur plusieurs mois. La température des colis, remplis de 400 kg de déchets, atteint le seuil de 75°C respectivement après sept et six semaines sans ventilation. Au cours de l'instruction, EDF a également modélisé l'évolution de la température à cœur des colis dans les mêmes conditions en considérant des scénarios d'arrêt de la ventilation de trois semaines au début de l'été et au milieu de l'été. Pour ces deux situations, la remise en fonctionnement de la ventilation permet de revenir sous le seuil de 65°C en moins d'une semaine. L'IRSN estime comme EDF que ces délais sont suffisants pour, d'une part rétablir la ventilation avant le dépassement du critère de 75°C au sein des colis, d'autre part revenir sous le seuil de 65°C après rétablissement de la ventilation.

Sur la base de ces résultats de modélisations, montrant le respect du seuil de 65°C à cœur des colis dans des configurations pénalisantes, EDF conclut à l'absence de besoin de fixer un paramètre garanti relatif à la température de l'air à l'extraction de la ventilation des halls d'entreposage pour maîtriser la température à cœur des colis, tel que préconisé par la demande [D-C1PG^{SP}-6] de l'ASN. L'IRSN relève que la température de l'air à l'extraction des halls d'entreposage résulte de l'échauffement de l'air par la puissance thermique des colis entreposés et des échanges thermiques avec le génie civil, caractérisé par une inertie thermique présentant des fluctuations jours/nuits et saisonnières. Par conséquent, la température de l'air à l'extraction des halls d'entreposage ne peut être simplement corrélée à celle à cœur des colis. **Compte tenu de cette difficulté et de la démonstration d'EDF de la maîtrise du risque de RSI, l'IRSN convient de l'absence de besoin de fixer un paramètre garanti sur la température de l'air à l'extraction des halls pour assurer le respect de la température à cœur des colis en entreposage.** Nonobstant, l'IRSN rappelle que la température de l'air à l'extraction constitue le seul indicateur mesurable représentatif de l'environnement des colis. A ce titre, l'IRSN estime que son suivi

concourra à la démonstration de sûreté du maintien des performances du colis lors de la phase d'exploitation du stockage.

3. ESTIMATION DE LA PRODUCTION D'HYDROGENE

3.1. CORROSION DES DECHETS METALLIQUES

Les colis C1PG^{SP} contiennent des déchets constitués de divers alliages métalliques dont la corrosion constitue une source de production d'hydrogène. Au stade du précédent avis de l'IRSN de novembre 2018, des études étaient en cours pour évaluer la production d'hydrogène par corrosion des déchets métalliques afin de l'intégrer à la production totale d'hydrogène par le colis.

Ainsi, EDF a évalué la quantité d'hydrogène de corrosion de ces déchets métalliques en réalisant des essais de corrosion sur deux matériaux (poudre d'acier inoxydable austénitique 304L et barreau d'alliage argent-indium-cadmium recomposé) dans des conditions expérimentales représentatives des conditions d'entreposage et de stockage des colis. Sur cette base, EDF a estimé le débit d'hydrogène produit par la corrosion des déchets métalliques pour deux configurations de remplissage des colis (400 kg ou 1990 kg de déchets) et deux types de déchets (crayons en acier inoxydable ou crayons absorbants en argent-indium-cadmium des paliers 900 MW et 1300 MW). Avec ces hypothèses, EDF obtient des débits d'hydrogène de corrosion d'au plus 9,45 L/an/colis. L'IRSN note qu'EDF considère l'ensemble des surfaces pouvant être exposées à la corrosion (surfaces internes et externes des gaines des crayons, surface externe des crayons, etc.) et convient du caractère pénalisant des géométries considérées lors des essais de corrosion (poudre et barreau) au regard de celles attendues après découpe. **Aussi, l'IRSN estime que la réponse apportée par EDF à la demande [D-C1PG^{SP}-4] est satisfaisante.**

3.2. RADIOLYSE DES MATERIAUX CIMENTAIRES

Afin de compléter sa précédente évaluation du débit de dihydrogène de radiolyse produit par les colis C1PG^{SP}, EDF a d'une part réévalué l'effet du séchage en déterminant expérimentalement la perméabilité à l'eau du béton, paramètre influant l'évolution de la saturation en eau du béton, d'autre part évalué la production d'hydrogène liée à la radiolyse de l'eau porale du béton du bouchon.

La perméabilité du béton de la coque et du bouchon du colis a été réévaluée en déterminant des courbes expérimentales de perte de masse sur des éprouvettes en béton de formulation identique au béton de la coque, auxquelles ont été appliquées un modèle thermo-hydro-mécanique (THM). L'IRSN relève que cette valeur reste du même ordre de grandeur que celle utilisée précédemment par EDF, issue d'études bibliographiques. EDF a ensuite estimé, sur la base de modélisations, le débit d'hydrogène produit par radiolyse de l'eau porale contenue dans le coulis cimentaire ainsi que dans le béton de la coque et du bouchon du colis. La démarche d'évaluation du débit d'hydrogène a été jugée satisfaisante lors de la précédente expertise de l'IRSN, ayant fait l'objet d'un avis en novembre 2018. **L'intégration de la radiolyse de l'eau porale du bouchon et de l'effet du séchage dans la réévaluation du débit d'hydrogène de radiolyse des matériaux cimentaires n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

3.3. ESTIMATION DU DEBIT D'HYDROGENE

Les modélisations réalisées par EDF montrent que les débits d'hydrogène d'un colis C1PG^{SP}, incluant la production par corrosion des déchets et par radiolyse des matériaux cimentaires, sont d'au plus 25 L/an durant la phase d'entreposage dans Iceda, et d'au plus 40 L/an lors du stockage dans Cigéo, le pic de production étant atteint au bout d'une centaine d'années. L'étude de sensibilité à la perméabilité du béton a par ailleurs montré qu'une augmentation de la perméabilité conduisait à un pic de production avancé dans le temps (autour de 80 ans) et légèrement au-dessus de 40 L/an. **L'IRSN note que les modélisations effectuées par EDF conduisent à une évaluation du débit d'hydrogène respectant les spécifications préliminaires d'acceptation à Cigéo des colis C1PG^{SP} (60 L/an dans le cas de colis C1PG^{SP} stockés directement sans conteneur de stockage, et 100 L/an pour**

les colis C1PG^{SP} mis en conteneurs de stockage), établies au stade de la demande d'autorisation de création de Cigéo. L'IRSN rappelle par ailleurs que les résultats des modélisations feront l'objet de confirmations par des mesures réalisées suite à l'instrumentation de colis conditionnés dans Iceda, ce qui est prévu par EDF dès que le dispositif permettant cette instrumentation sera disponible et qu'un colis C1PG^{SP} suffisamment actif sera produit.

4. PERFORMANCES DU COLIS C1PG^{SP} SOUS L'EFFET DE LA PRODUCTION D'HYDROGENE ET DU SECHAGE

La démonstration du maintien des performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP} sur la durée d'entreposage dans Iceda n'ayant pas été apportée au stade de la décision n° CODEP-DRC-2021-013808, les prescriptions [C1PG^{SP}-4] et [C1PG^{SP}-5] ont imposé un référentiel restreint à EDF, limitant la puissance thermique maximale des colis entreposés dans un même hall d'entreposage à 30 kW et imposant une humidité relative supérieure à 50 %. Les contraintes mécaniques s'exerçant dans le colis, du fait de la pression d'hydrogène de radiolyse et du retrait de dessiccation, avaient en effet été évaluées pour une humidité relative supérieure à 50 %, certes représentative de l'air extrait des halls d'entreposage mais pas de l'environnement proche des colis en entreposage. Ce point fait l'objet de la demande [D-C1PG^{SP}-5] de l'ASN.

Dans ses études complémentaires, EDF évalue par modélisation la pression maximale atteinte dans le coulis et dans la coque du colis, pour des colis remplis de 1990 kg de déchets, avec une humidité relative dans les halls de 30 %. Le phénomène de séchage par perte d'eau adsorbée en surface des pores du béton, attendu pour une humidité inférieure à 50 %, a ainsi été pris en compte par EDF en complément du séchage capillaire de manière à étendre le domaine de validité du modèle pour des humidités relatives faibles. Le modèle a été qualifié par comparaison avec des résultats expérimentaux. Les résultats de ces études montrent des évolutions asymptotiques de la pression dans le coulis et la coque, avec des pressions maximales de l'ordre de 7 bars dans le coulis de blocage et de l'ordre de 3 bars dans la coque. Selon EDF, ces résultats montrent la capacité du colis C1PG^{SP} à évacuer l'hydrogène produit avant l'atteinte de pressions pouvant conduire à l'endommagement du colis, pour une humidité relative de 30 %. EDF a également réalisé une modélisation THM des colis afin d'évaluer la tenue mécanique du colis sous l'effet de la production d'hydrogène et du séchage du colis au cours de l'entreposage, en tenant compte de l'ensemble des constituants du colis. Cette modélisation intègre la production d'hydrogène par corrosion et par radiolyse, ainsi que la température et la saturation des matériaux. EDF considère des conditions de température et d'humidité dans les halls d'entreposage pénalisantes, à savoir une température extérieure de 34°C et une puissance thermique maximale dans les halls de 80 kW, conduisant à une température dans les halls de 48°C et à une humidité relative de 30 %⁵. EDF compare les résultats obtenus à un critère de tenue mécanique du béton de 5,19 MPa défini à l'aide d'essais normalisés de résistance en traction par fendage du béton de la coque. Bien que des zones en traction dépassant le seuil de 5,19 MPa soient identifiées en peau de colis, EDF indique que celles-ci ne remettent pas en cause le maintien dans le temps (150 ans) des propriétés de confinement et de tenue mécanique du colis dans la mesure où une épaisseur saine de 5,4 cm, garantissant le confinement apporté par la coque du colis, est maintenue. L'IRSN note que cette épaisseur saine minimale est cohérente avec celle retenue pour le stockage de colis de type C1PG au Centre de stockage de l'Aube, ce qui est satisfaisant. **L'IRSN relève que le modèle utilisé par EDF intègre désormais le phénomène de séchage par perte d'eau adsorbée en surface des pores du béton, attendu dans des conditions d'humidité relative faibles (inférieure à 50 %) et des hypothèses pénalisantes, eu égard à la puissance thermique des colis, permettant de s'assurer du maintien des performances du colis dans l'environnement proche des colis, objet de la demande [D-C1PG^{SP}-5].** En conséquence, l'IRSN estime que les éléments apportés

⁵ L'humidité relative constante égale à 30 % a été calculée par EDF sur la base d'une température dans le hall d'entreposage égale à 48°C et de l'hygrométrie moyenne la plus basse relevée sur une année sur le site de Bugey.

par EDF vis-à-vis de la tenue mécanique du colis C1PG^{SP} sous l'effet de la production d'hydrogène et du séchage concourent à l'abrogation des prescriptions [C1PG^{SP}-4] et [C1PG^{SP}-5].

5. CARBONATATION DU BETON CONSTITUTIF DE LA COQUE DU COLIS C1PG^{SP} ET RISQUE DE CORROSION DES ARMATURES

La carbonatation correspond à la formation de carbonate de calcium (ou calcite) par dissolution de l'hydroxyde de calcium (portlandite) par le dioxyde de carbone (CO₂) de l'air ayant diffusé dans l'eau porale du matériau cimentaire. La carbonatation conduit à une acidification de l'eau porale du matériau cimentaire, favorisant des phénomènes de corrosion des armatures métalliques du conteneur C1PG^{SP}, et pouvant porter atteinte à la cohésion mécanique du colis par formation de produits de corrosion expansifs en surface des armatures du conteneur. Les essais de carbonatation du béton constitutif de la coque et du bouchon du colis C1PG^{SP} menés par EDF dans le cadre de la demande d'accord de conditionnement du colis C1PG^{SP} avaient été réalisés dans des conditions d'humidité relative importante, non représentatives de l'environnement proche des colis en entreposage, ce qui avait conduit l'ASN à imposer des limitations en lien avec la puissance thermique des colis dans un hall d'entreposage [C1PG^{SP}-4] et l'humidité relative de ce hall [C1PG^{SP}-5].

EDF a mené de nouveaux essais de carbonatation accélérée sur des éprouvettes de même formulation que le béton constitutif de la coque et du bouchon des colis C1PG^{SP} avec un état de saturation des éprouvettes proche de 60 %, une concentration de 3 % de CO₂ et une température de 50°C, conditions imposées par la norme et favorisant la carbonatation. L'IRSN relève que les résultats de ces essais mettent en évidence une absence de carbonatation dans l'épaisseur du béton après 259 jours. **Or le phénomène de séchage au cours du temps en hall d'entreposage désature le béton, et par conséquent ne favorise pas la carbonatation. Aussi, l'IRSN estime que les résultats de ces essais permettent d'exclure le risque de carbonatation dans l'épaisseur de la coque et du bouchon, et par conséquent le risque de corrosion des armatures.**

Malgré l'exclusion du risque de corrosion des armatures, EDF a mené une étude sur le risque d'endommagement de la coque des colis lié au gonflement des armatures. La contrainte générée par le gonflement lié à la corrosion des armatures a ainsi été comparée à la résistance en traction du béton du colis. EDF a ainsi défini une épaisseur corrodée minimale de 0,004 mm, en deçà de laquelle EDF considère qu'une fissuration du béton ne conduit pas à un endommagement significatif du colis. Afin d'estimer les épaisseurs corrodées pouvant être atteintes à l'issue de l'entreposage et du stockage, EDF a ensuite établi expérimentalement une loi de cinétique de corrosion de l'acier noir dans une solution représentative du milieu cimentaire. EDF estime ainsi des épaisseurs corrodées de 0,0016 mm à 50 ans et légèrement inférieures à 0,004 mm à 150 ans. L'IRSN estime que la démarche d'EDF, consistant à évaluer le risque d'éclatement du béton, en complément des essais de carbonatation accélérée dont les résultats tendent à exclure le risque de carbonatation du béton, et donc de corrosion des armatures, est satisfaisante. En outre l'IRSN convient du caractère pénalisant des hypothèses prises lors de cette évaluation (hypothèse d'une corrosion des armatures dès le début de l'entreposage, vitesse de corrosion déterminée expérimentalement sur cinq ans et extrapolée linéairement ensuite, etc.). **Aussi, malgré la faible marge estimée à 150 ans par rapport à l'épaisseur corrodée minimale des armatures dans l'éventualité d'un phénomène de carbonatation, l'IRSN estime que ces études complémentaires confirment l'absence de risque d'endommagement des colis C1PG^{SP} lié aux phénomènes de carbonatation et concourent à l'abrogation des prescriptions [C1PG^{SP}-4] et [C1PG^{SP}-5].**

6. TENUE A LA CHUTE DES COLIS C1PG^{SP}

Au stade du précédent avis de l'IRSN de novembre 2018, l'IRSN avait recommandé, eu égard à la durée et aux conditions d'entreposage dans Iceda, qu'EDF démontre la tenue à la chute d'un colis vieilli. Dans cet objectif, EDF a simulé la chute d'un colis aux propriétés mécaniques dégradées. Pour cela, EDF a développé un modèle évaluant la dégradation du béton sous impact. Les résultats d'essai de chute d'un colis neuf ont permis à EDF de

qualifier ce modèle, la zone endommagée calculée sur un colis neuf étant plus étendue que celle observée lors de l'essai de chute. Afin de prendre en compte les performances mécaniques dégradées d'un colis après 50 ans d'entreposage, EDF considère un abaissement des limites de rupture à la compression et à la traction de 20 %, ainsi qu'une augmentation ou un abaissement du module d'Young de 20 %. Les résultats des modélisations conduisent EDF à conclure à la tenue à la chute d'un colis vieilli pour les différentes évolutions des paramètres mécaniques considérés. L'IRSN relève qu'EDF ne justifie pas le choix des valeurs d'abaissement des limites de ruptures ainsi que de modification du module d'Young, la valeur de 20 % étant qualifiée de forfaitaire. L'IRSN convient de la difficulté de déterminer des valeurs d'abaissement des limites de ruptures ainsi que de modification du module d'Young après 50 ans d'entreposage. A défaut de justifier le caractère pénalisant de ces paramètres, l'IRSN suggère qu'EDF réalise de nouvelles modélisations, en faisant varier ces paramètres représentatifs de la dégradation des propriétés mécaniques, afin d'évaluer les marges disponibles. En tout état de cause, l'IRSN estime que ces nouvelles modélisations ne sauraient constituer une justification suffisante de la tenue à la chute des colis vieilliss compte tenu des incertitudes liées à l'évolution des propriétés mécaniques des colis durant leur entreposage. Ainsi, même si les résultats des essais de tenue à la chute des colis neufs, couplés à ceux des études sur les pathologies usuelles pour ce type de colis (carbonatation et risques RSI notamment), fournissent une indication de la bonne tenue à la chute de colis vieilliss à l'issue de leur entreposage, **l'IRSN estime, afin de confirmer cette indication, qu'EDF devrait mettre en œuvre, avant expédition à Cigéo, des essais de chute de colis inactifs vieilliss en conditions réelles d'entreposage.**

7. CONCLUSION

L'IRSN estime que les résultats obtenus à la suite des études complémentaires relatives au comportement thermique des colis en phases de fabrication et d'entreposage, à l'évaluation de la production d'hydrogène de radiolyse et de corrosion, à l'effet de cette production d'hydrogène et du séchage au cours de l'entreposage sur la tenue mécanique du colis ainsi qu'aux risques liés au phénomène de carbonatation, sont de nature à permettre la poursuite du conditionnement de déchets MA-VL en colis C1PG^{SP} dans Iceda au-delà du 31 décembre 2023.

En particulier, l'IRSN considère que la démonstration du maintien des performances mécaniques et de confinement du colis C1PG^{SP} au regard des effets induits sur le béton par les phénomènes thermiques, par la production d'hydrogène, ainsi que par la carbonatation des matériaux cimentaires, d'une répond aux demandes [D-C1PG^{SP}-4] et [D-C1PG^{SP}-5], relatives à la prise en compte de la géométrie des déchets après découpe dans la production de dihydrogène par corrosion et au maintien des propriétés mécaniques en entreposage avec une humidité relative inférieure à 50%, d'autre part permet l'abrogation des prescriptions [C1PG^{SP}-4] et [C1PG^{SP}-5] qui limitent aujourd'hui la puissance thermique maximale des colis entreposés dans un même hall d'entreposage à 30 kW et imposent une humidité relative supérieure à 50 %. S'agissant du comportement thermique en phase d'entreposage, l'IRSN estime que le respect du seuil de maîtrise du risque RSI a été démontré par EDF au moyen du modèle couplé thermo-aéraulique développé et en retenant des hypothèses pénalisantes. Cette démonstration associée à la difficulté à corréliser la température de l'air extrait des halls d'entreposage à celle à cœur des colis concourent à l'absence de besoin de définir un paramètre garanti permettant le suivi de la température à cœur des colis, en réponse à la demande [D-C1PG^{SP}-6].

Enfin, s'agissant de la tenue à la chute d'un colis vieilli après 50 ans d'entreposage dans Iceda, l'IRSN estime qu'EDF devrait réaliser des essais de chute sur des colis inactifs vieillis en conditions réelles d'entreposage afin de confirmer leur tenue à la chute avant leur expédition à Cigéo.

IRSN
Le directeur général
Par délégation, Michel Baudry
Adjoint du directeur de l'environnement

ANNEXE A L'AVIS IRSN N° 2023-00117 DU 27 JUILLET 2023

PRESCRIPTIONS ET DEMANDES DE LA DECISION N°CODEP-DRC-2021-013808 ET DU COURRIER N°CODEP-DRC-2021-013776 DU 19 JUILLET 2021, RELATIVES AU PRESENT AVIS

[C1PG^{SP}-4] La puissance thermique maximale des colis C1PG^{SP} entreposées dans un même hall d'entreposage de l'installation nucléaire de base n°173 n'excède pas 30 kW.

[C1PG^{SP}-5] L'humidité relative en tout point de chaque hall d'entreposage est supérieure à 50 % en moyenne mensuelle.

[D-C1PG^{SP}-4] Je vous demande d'étudier la géométrie après découpe des déchets activés de démantèlement et d'évaluer l'impact de cette découpe sur la production de dihydrogène par corrosion. Les résultats de cette étude seront transmis au plus tard le 31 décembre 2022.

[D-C1PG^{SP}-5] Je vous demande de justifier que l'humidité relative dans l'environnement proche des colis en entreposage permet de garantir le maintien de leurs propriétés sur le long terme, en restant dans le domaine de valeurs mentionné dans le référentiel de conditionnement. Les résultats de cette étude seront transmis au plus tard le 31 décembre 2022.

[D-C1PG^{SP}-6] Je vous demande de définir, au plus tard le 31 décembre 2022, la température de l'air extrait des halls d'entreposage représentative d'une température à cœur des colis de 65°C. Cette température serait de nature à constituer le paramètre garanti à maîtriser pour assurer le respect de la température à cœur des colis en entreposage.