

Fontenay-aux-Roses, le 28 juillet 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté

AVIS IRSN N° 2021-00139

Objet : Avis relatif à la demande d'accord de conditionnement des fines et résines du silo HAO en colis CFR HAO

Réf. : [1] Lettre ASN CODEP-DRC-2019-023703 du 26 juillet 2019

Par lettre citée en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a sollicité l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le dossier de demande d'accord de conditionnement des déchets de faible granulométrie, entreposés dans le silo de l'atelier haute activité oxyde (HAO) de l'INB n°80 de l'établissement Orano La Hague, en colis de fines et résines HAO dits « CFR HAO ».

1. CONTEXTE TECHNIQUE ET ENJEUX

En 1978, l'INB n°80, dénommée atelier HAO, a été mise en service dans l'usine UP2-400 du site de la Hague pour permettre le traitement d'assemblages de combustibles irradiés issus des filières dites « oxydes », à savoir les combustibles à base d'oxyde d'uranium ou d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium. Durant son exploitation, de 1978 à 2004, environ 4 564 tonnes de métal lourd initial ont été traitées. Le traitement des assemblages consistait en leur cisailage à la verticale puis en leur immersion dans une solution d'acide nitrique chaud afin de dissoudre l'oxyde contenu dans les tronçons et de permettre la séparation ultérieure de l'uranium, du plutonium et des produits de fission. Les tronçons d'assemblages de combustibles ainsi vidés, appelés coques, et leurs extrémités, appelées embouts, étaient transférés vers la piscine 907 du Stockage Organisé des Coques (SOC) pour être mises en curseur¹. De 1978 à 1987, ces curseurs ont été dirigés vers le silo HAO dans lequel étaient vidés, en vrac, leurs contenus et leurs couvercles. À partir de 1991, ces déchets dits de structures (coques et embouts) ont été entreposés exclusivement dans les piscines du SOC et non plus dans le silo HAO. Les résines usées, issues du traitement des eaux de la piscine 907, ont également été envoyés dans le silo HAO jusqu'à l'arrêt de la filtration de la piscine début 2014. Le cisailage a engendré une quantité variable d'éclats et de fines, dites fines de cisailage. La dissolution de l'oxyde a également généré des fines insolubles micrométriques, dites fines de dissolution, qui sont des composés intermétalliques² à base de platinoïdes. Ces fines de cisailage et de

¹ Conteneur cylindrique en inox dont le couvercle était équipé d'un joint en silicone

² En chimie des complexants, un composé intermétallique est un complexe contenant plusieurs métaux différents.

dissolution ont été transférées dans le silo HAO jusqu'en 1998, année de la dernière campagne de traitement de combustibles réalisée dans cet atelier.

Les déchets entreposés dans le silo HAO doivent être repris et conditionnés par Orano dans le respect des prescriptions fixées par la décision ASN n°2014-DC-0472 modifiée par la décision n°2020-DC-0690. Pour cela, les déchets seront repris dans le silo HAO à l'aide d'un grappin avant d'être lavés, triés et orientés en fonction de leur typologie vers la filière de conditionnement la mieux adaptée. Ainsi, les coques et les embouts seront transférés vers l'atelier ACC pour être compactés et conditionnés dans des colis CSD-C avec les fines de cisailage de granulométrie supérieure au millimètre. Les fines et résines, de granulométrie inférieure au millimètre, recueillies dans le bac de décantation des effluents après lavage des coques et embouts, ou par pompage dans le silo, seront transférées dans une cuve d'alimentation implantée dans la cellule de cimentation contiguë à la cellule de reprise. Après caractérisation, le contenu de la cuve sera transféré vers un panier muni d'une pale perdue³ dans lequel la cimentation sera réalisée. Ce panier, après mûrissement de l'enrobé cimentaire, sera introduit dans un fût ECE vide qui sera ensuite scellé par deux couvercles. Les fonctions de confinement et de tenue mécanique du colis CFR HAO sont assurées par son conteneur constitué par le fût ECE réutilisé et de ses couvercles munis de pastilles de respiration en inox fritté PORAL®. L'enrobé cimentaire n'assure qu'une fonction de blocage des déchets radioactifs au sein d'un ensemble compact et stable. La protection radiologique des travailleurs est assurée par les dispositions opérationnelles prises par l'exploitant dans ses installations sur la base des caractéristiques radiologiques des colis.

Une fois produits, les colis CFR HAO (déchets de catégorie MA-VL) seront entreposés dans l'atelier Déstockage / Extension Entreposage de Déchets Solides (D/E EDS) sur le site Orano de La Hague en attente de leur stockage dans l'installation Cigéo, actuellement en projet. La production totale de colis CFR HAO est estimée par Orano à 125 colis, en cohérence avec le nombre prévisionnel de 121 colis annoncé dans la version E du programme industriel de gestion des déchets établie en 2017 en vue du stockage dans Cigéo.

Les principaux enjeux de sûreté associés aux colis CFR HAO sont le maintien dans le temps de ses performances mécaniques et de confinement au cours des phases de fabrication, d'entreposage et d'exploitation du stockage ainsi que la maîtrise des risques en lien avec la production de dihydrogène de radiolyse. En réponse à la demande de l'ASN et compte tenu de ces enjeux, le présent avis traite successivement : (i) des caractéristiques des déchets à conditionner en colis CFR HAO, (ii) des paramètres visant à garantir les performances du colis CFR HAO, (iii) du programme de qualification du colis CFR HAO et (iv) du comportement du colis en entreposage et en stockage.

2. CARACTERISTIQUES DES DECHETS

Les caractéristiques physico-chimiques des fines de cisailage et de dissolution ont été définies à partir de prélèvements de coques, de fines de cisailages et de fines de dissolution lors de l'exploitation de l'atelier HAO. Pour les résines, l'exploitant s'est appuyé sur les caractéristiques des résines neuves. Les caractéristiques radiologiques des fines de cisailages et des résines ont été estimées sur la base de leurs historiques d'irradiation et des taux d'entraînement et de rétention des radionucléides dans ces catégories de déchets, acquis sur des déchets réels ou représentatifs. Les caractéristiques radiologiques des fines de dissolution ont été évaluées sur la base des prélèvements réalisés en cours d'exploitation de l'atelier HAO et de calculs. L'IRSN relève que les résines du silo HAO n'ont, à ce stade, pas fait l'objet de caractérisation directe.

L'IRSN considère que l'inventaire radiologique présenté par Orano au stade de ce dossier de demande d'accord de conditionnement correspond à la meilleure connaissance disponible à ce jour en vue du dimensionnement du colis CFR HAO. L'IRSN souligne toutefois qu'il sera important de conforter ces estimations par les

³ Dans un tel procédé, la pale rotative permettant le mélange des différents composants est désolidarisée du dispositif d'agitation mécanique et reste solidaire de l'enrobé une fois celui-ci constitué.

caractérisations, radiologiques notamment, prévus par Orano pour chaque lot de déchets avant leur conditionnement en colis CFR HAO.

S'agissant des caractéristiques physico-chimiques, l'IRSN considère que les méthodes présentées par l'exploitant pour estimer les spectres granulométriques des fines et résines, complétées par des caractérisations en amont de la cimentation, sont recevables. Orano prévoit, en effet, de mesurer la masse volumique ainsi que la proportion de déchet et de résine contenu dans la cuve avant cimentation de chaque colis. Toutefois, afin de conforter les connaissances et de valider les hypothèses prises dans les études de dimensionnement du colis CFR HAO (densité et rhéologie des fines vieilles, état de dégradation des résines, etc.), **l'IRSN estime nécessaire la réalisation de caractérisations physico-chimique poussées (densité, vitesse de sédimentation, composition chimique, etc.) des fines et des déchets organiques du silo HAO prélevés lors des premières opérations de reprises, puis selon une périodicité à définir pour tenir compte de l'hétérogénéité et de l'évolution attendue des caractéristiques de ces déchets au fur et à mesure des opérations de reprise.** Ces caractérisations supplémentaires des fines et résines permettront de vérifier leur compatibilité avec le procédé de tri granulométrique et le domaine de qualification du procédé de cimentation assurant la fonction de blocage des déchets. Ce point fait l'objet de la recommandation n°1 en annexe du présent avis. A l'issue de l'expertise, ORANO a annoncé qu'il mettrait en œuvre un programme périodique de vérification des hypothèses dimensionnantes concernant les caractéristiques des déchets à cimenter en colis CFR HAO.

3. PARAMETRES VISANT A GARANTIR LES PERFORMANCES DU COLIS CFR HAO

L'atteinte des performances mécaniques, de confinement et de protection radiologique attendues aux différentes étapes de gestion d'un colis, qui concourent à garantir la sûreté des opérations de production, d'entreposage et de stockage, repose sur la définition de paramètres garantis ainsi que leurs modalités de contrôle. Leur pertinence est notamment évaluée au regard de leur compatibilité avec les spécifications d'acceptation des colis de déchets dans les installations d'entreposage et de stockage, à savoir l'installation d'entreposage D/E EDS et l'installation Cigéo en projet. Les paramètres garantis définis par l'exploitant à la production sont les caractéristiques radiologiques du déchet conditionné (activités $\beta\gamma$ et α totales), le taux d'incorporation en déchets secs et la masse du colis fini. À ces paramètres garantis à la production, l'exploitant ajoute le débit de dose γ à 1 m, la contamination surfacique et la puissance thermique du colis comme paramètres garantis au désentreposage.

A la production, un taux d'incorporation massique en déchets secs (correspondant au rapport de la masse de déchets secs sur la masse d'enrobé cimentaire), borné à 15 %, permet selon l'exploitant de respecter le domaine de composition de l'enrobé cimentaire validé lors du programme de qualification (cf. chapitre 4.1 du présent avis). L'IRSN souligne que le respect du domaine de validité de la composition cimentaire de référence repose également sur une proportion minimale en résine conférant à l'enrobé une viscosité suffisamment élevée pour assurer un maintien des déchets en suspension et ainsi une répartition du déchet homogène dans le colis après prise du ciment (pas de ségrégation du déchet par différence de densité). L'IRSN estime que l'exploitant n'a pas apporté la démonstration qu'un taux d'incorporation massique en déchets secs limité à 15 % garantissait, *de facto*, le respect de la proportion minimale de résines et donc du domaine de validité. Comme mentionné au chapitre 2 du présent avis, la proportion de résines dans le déchet fait l'objet d'une analyse avant cimentation. Ainsi, l'atteinte de la proportion minimale de résine conditionne l'autorisation de déclenchement de la cimentation, ce qui est satisfaisant. **Toutefois, au regard de l'enjeu de sûreté associé au respect du domaine de validité de la composition cimentaire de référence, l'IRSN estime nécessaire que le respect d'une proportion de résine minimale dans le lot de déchets à enrober fasse l'objet d'un paramètre garanti.** Ce point fait l'objet de la recommandation n°2 en annexe au présent avis.

Formellement, l'IRSN note que le débit de dose γ à 1 m et la puissance thermique du colis ne sont garantis qu'au désentreposage du colis, soit avant leur envoi vers le stockage, alors que ces paramètres, obtenus par calculs à

partir de données radiologiques mesurées à la production, contribuent à assurer la sûreté des personnels ainsi qu'à démontrer la compatibilité des colis CFR HAO avec les installations de production et d'entreposage. Ce point fait l'objet de la recommandation n°3 en annexe du présent avis.

S'agissant de l'exhaustivité des paramètres garantis, l'IRSN estime nécessaire que l'exploitant définisse un ou plusieurs paramètres garantis permettant de garantir la maîtrise des risques liés à la manutention, la résistance au gerbage ainsi qu'à la chute et à la corrosion au cours des différentes phases de vie du colis. En outre, dans la mesure où le système respirant PORAL® doit permettre d'assurer un confinement de la matière et la maîtrise du risque d'explosion lié au dégagement de dihydrogène, l'IRSN juge nécessaire que les caractéristiques du système respirant, perméabilité et pouvoir filtrant notamment, soient considérées comme des paramètres garantis. De la même manière, l'IRSN recommande que l'exploitant définisse un ou plusieurs paramètres garantis permettant la maîtrise du taux de dégazage au cours des différentes phases de vie du colis puisque que sa limitation contribue à la maîtrise du risque d'explosion et constitue un point prépondérant de l'acceptabilité du colis CFR HAO en stockage. Enfin, l'IRSN note l'intérêt que l'exploitant définisse un ou plusieurs paramètres garantis permettant de garantir la sous-criticité des colis CFR HAO lors des différentes étapes de sa gestion. Ces points font l'objet des recommandations n°4 à 7 en annexe du présent avis.

4. PROGRAMME DE QUALIFICATION DU COLIS CFR HAO

Le programme de qualification a pour objectif de montrer que les paramètres de fabrication du colis permettent d'atteindre les niveaux de performances mécaniques, de protection radiologique et de confinement requis à chacune des phases de sa gestion. Le maintien dans le temps de ces performances et les exigences relatives aux futures conditions d'entreposage et de stockage des colis produits, tel que le débit de dihydrogène de radiolyse, doivent également faire l'objet d'études en vue de la qualification du colis à produire. Ce point est examiné au chapitre 5 du présent avis.

4.1. ENROBE CIMENTAIRE

La formulation du ciment d'enrobage des fines et résines du silo HAO ainsi que ses modalités d'élaboration ont été mises au point à l'échelle du laboratoire sur des éprouvettes intégrant des proportions variables de simulants des fines et résines du silo HAO. En l'absence de spécifications d'acceptation des colis en stockage profond au début du programme de qualification (2008), les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ces éprouvettes ont été déterminées sur la base d'épreuves techniques équivalentes à celles requises pour l'acceptation de colis au centre de stockage de l'Aube (CSA). En outre, l'exploitant a réalisé, entre 2014 et 2016, des essais sur des éprouvettes à base de déchets réels (boues radioactives issues de la piscine 907 par laquelle ont transité les déchets du silo HAO) afin de conforter les propriétés de la formulation cimentaire mise au point avec des simulants inactifs. Le comportement, le temps de prise et la résistance mécanique de l'enrobé obtenu sont conformes aux exigences liées à la fonction de blocage de la matrice cimentaire. De plus, la mise en œuvre d'un enrobé cimentaire à partir d'un échantillon de déchet réel, sans procéder à une irradiation gamma externe, a permis d'approcher l'effet des particules alpha sur la prise de l'enrobé cimentaire (absence de dégradation suite au dégagement de dihydrogène de radiolyse dans un enrobé encore liquide), et de valider les rendements radiolytiques retenus pour l'estimation du taux de dégazage de dihydrogène. Ce point est détaillé au chapitre 5.1. L'IRSN note également que des essais de cimentation ont été menés avec des résines préalablement irradiées afin de s'assurer de l'absence d'effet de l'irradiation des résines sur la rhéologie et la résistance mécanique des enrobés HAO. Enfin, des essais de cimentation à l'échelle 1 avec simulants ont été réalisés par Orano afin de démontrer le caractère transposable des résultats obtenus sur éprouvettes à un colis réel. **L'IRSN estime que l'ensemble des essais mis en œuvre par Orano concourent à démontrer, d'une part la faisabilité de cimentation de tels déchets, d'autre part l'adéquation de la matrice cimentaire avec les performances mécaniques attendues du colis.**

Ce programme d'essais a également permis à Orano de définir le domaine de qualification de la formulation de référence pour la cimentation des fines et résines du silo HAO en termes de taux d'incorporation maximal en déchets et réactifs cimentaires ainsi qu'en termes de proportion minimale de résine. Ce dernier paramètre a pour finalité l'obtention d'un enrobé suffisamment fluide pour être malaxable et suffisamment visqueux pour être homogène en empêchant la sédimentation des fines de cisailages et de dissolutions plus denses que les résines. A cet égard, l'IRSN souligne que la proportion minimale de résines pourrait ne pas être respectée lors de la production des derniers colis dont les déchets sont issus de la partie basse du silo HAO. En effet, les fines de dissolution, en raison de leur densité plus élevée, auront tendance à sédimenter en partie basse du silo à l'inverse des résines. Aussi, les opérations de reprises des déchets du silo HAO s'effectuant de haut en bas, les derniers colis présenteront a priori une proportion plus élevée en fines de dissolution et moins élevée en résine avec le risque que la quantité de résine ne soit pas suffisante pour respecter la proportion minimale de résine garantissant l'homogénéité de l'enrobé et donc ses propriétés mécaniques. Aussi, **l'IRSN estime nécessaire qu'Orano démontre la faisabilité de la cimentation des déchets issus de la partie basse du silo et présentant une teneur réduite en résine. Dans l'hypothèse où la faisabilité de la cimentation de ces déchets ne pourrait être démontrée, l'IRSN estime que l'exploitant devra prévoir un conditionnement intermédiaire de ces déchets afin de ne pas retarder les opérations de vidange complète du silo HAO.** Ces points font l'objet de la recommandation n°8 en annexe au présent avis. En tout de cause, le conditionnement des déchets compatibles avec la formulation cimentaire de référence devra être réalisé dans les meilleurs délais.

La robustesse de la formulation cimentaire à différents phénomènes susceptibles de conduire à une dégradation de la matrice cimentaire (retrait, carbonatation, réaction alcali-silice et réaction sulfatique interne) a été démontrée par l'exploitant.

4.2. REQUALIFICATION DES FÛTS ECE ET DES COUVERCLES

Le conteneur utilisé pour le conditionnement des fines et résines issues du silo HAO est un fût ECE réutilisé, muni de 2 couvercles, à l'intérieur duquel sera placé un panier neuf contenant les déchets cimentés. Ces fûts ECE, en acier inoxydable 316 L, ont été au préalable utilisés pour l'entreposage sous eau à D/E EDS de déchets issus des ateliers R1/T1 et ont été vidangés dans l'atelier ACC. Le premier couvercle, également réutilisé, est constitué d'une couronne usinée et d'un disque étanche, soudé à la couronne, comportant 6 pastilles de respiration PORAL®. La démarche de requalification des fûts ECE en conteneur des colis CFR HAO a conduit l'exploitant à définir des exigences concernant les critères d'acceptation des fûts comme conteneur. Ceux-ci devront, après contrôle visuel, être exempts de déformation, d'eau et de déchets et présenter un état de surface, intérieur comme extérieur, conforme à un fût neuf. En raison de l'utilisation première de fûts ECE mentionnée précédemment, **l'IRSN estime peu probable que la démarche retenue par l'exploitant, reposant sur un simple contrôle visuel, soit à même de garantir le bon état des fûts réutilisés, notamment vis-à-vis du risque de corrosion localisée (ce point est développé au chapitre 5 du présent avis).** Ce point fait l'objet de la recommandation n°9 en annexe au présent avis.

S'agissant des couvercles réutilisés, l'exploitant indique qu'ils devront permettre une diffusion des gaz au travers des pastilles PORAL® identique à celle d'un couvercle neuf et le maintien de cette perméabilité durant les différentes phases de vie du colis. Dans une démarche de requalification des pastilles PORAL®, Orano a réalisé des mesures de perméabilité à l'air de pastilles PORAL® sur deux couvercles internes de fûts ECE anciens, soit 12 pastilles PORAL®⁴. En premier lieu, l'IRSN convient de la pertinence du critère étudié, la perméabilité, qui permet de rendre compte des risques de colmatage ou de percement. Les premiers résultats obtenus, qui montrent le

⁴ Ces fûts ECE ont été utilisés sur le site de la Hague pour l'entreposage de coques et embouts sous eau. Une quantité importante de vapeur d'eau, produite par évaporation de l'eau de noyage des coques et embouts entraînée par la puissance thermique du colis, a diffusé à travers leurs filtres PORAL®.

maintien de la perméabilité des pastilles, sont de nature à démontrer le maintien des fonctions d'évacuation des gaz de radiolyse ou de confinement des matières et des aérosols, ce qui est satisfaisant. L'IRSN estime toutefois que ces résultats nécessitent d'être confirmés sur un nombre plus représentatif de pastilles **et recommande qu'Orano définisse et mette en œuvre une stratégie d'échantillonnage et de caractérisation des pastilles PORAL® des couvercles réutilisés afin de s'assurer que leur perméabilité soit conforme à l'exigence liée à la réutilisation des couvercles de fûts ECE, à savoir une diffusion gazeuse au travers des pastilles PORAL® du couvercle identique à des fûts neufs.** A l'issue de l'expertise, Orano a annoncé sa volonté de mettre en œuvre un programme complémentaire de caractérisation des pastilles PORAL® de couvercles de fût ECE.

4.3. PERFORMANCES MECANIQUES DU COLIS CFR HAO

S'agissant de la tenue à la chute, l'exploitant indique que les résultats des essais réalisés sur les fûts ECE de coques et embouts sous eau, soit une chute de 2 m, sont transposables aux colis CFR HAO, dont le conteneur et la masse sont similaires et conformes aux exigences de l'atelier d'entreposage D/E EDS. L'exploitant indique que les résultats de ces essais réalisés dans des conditions représentatives de l'entreposage, à savoir une chute sur un autre colis à l'étage inférieur ou au sol, compte-tenu de l'entreposage de type pyramidal, ont montré le maintien de l'intégrité physique et un niveau de déformation des colis ne remettant pas en cause leur capacité de confinement. L'IRSN considère que la nature du contenu des fûts, un enrobé cimentaire de déchets de fine granulométrie dans le cas du colis CFR HAO, des déchets centimétriques entreposés en vrac sous eau dans l'autre cas, et leurs réponses à une sollicitation mécanique sont très différentes. Toutefois, l'IRSN relève qu'en situation accidentelle de chute hors domaine de qualification, les rejets atmosphériques sont équivalents pour le fût ECE de coques et embouts sous eau à ceux d'un fût FCE de coques et embouts cimentés, dont le comportement mécanique est plus représentatif d'un colis CFR HAO. L'IRSN estime que ces éléments sont de nature à confirmer l'acceptabilité des colis CFR HAO vis-à-vis de leur tenue à la chute, d'une part en entreposage dans D/E EDS, d'autre part en conditions de stockage, la configuration en entreposage étant enveloppe de celle attendue en phase d'exploitation du stockage (chute de 1,2 m du colis primaire sur une dalle indéformable). Par ailleurs, la démonstration de la tenue à la chute du colis CFR HAO en entreposage dans D/E EDS pourra faire l'objet d'une attention particulière lors du réexamen de sûreté de l'INB 116 à venir.

Dans les spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaire MA-VL dans Cigéo, l'Andra demande en outre que le producteur justifie que les conditions thermiques et hydriques d'entreposage n'ont pas conduit à une remise en cause de sa tenue à la chute initialement garantie ou, le cas échéant, à une augmentation de la fraction de l'inventaire radiologique mobilisable en cas de chute du colis. Une telle démonstration est conditionnée au maintien de l'intégrité du conteneur vis-à-vis du risque de corrosion pendant la période d'entreposage. Ce point est examiné au chapitre 5.2.

5. COMPORTEMENT DU COLIS ENTREPOSAGE ET EN STOCKAGE

Les fonctions attendues du colis CFR HAO sont de garantir le confinement des radionucléides non-gazeux et d'assurer la tenue mécanique et la manutention des colis pendant toute la durée d'entreposage et la phase d'exploitation de Cigéo, soit environ 150 ans. Etant donné la présence d'un enrobé cimentaire riche en eau et de déchets présentant une activité radiologique importante, les études ont concerné plus particulièrement l'analyse du comportement des constituants de l'enrobé cimentaire du CFR HAO au cours des différentes étapes de vie du colis, vis-à-vis du risque de dégagement de dihydrogène produit par radiolyse. Il convient en particulier d'examiner la compatibilité de ces dégagements (dihydrogène de radiolyse notamment) avec les exigences actuellement définies par l'Andra pour l'acceptabilité des colis à Cigéo. Une attention particulière a également été apportée au risque de corrosion du conteneur qui porte la fonction de confinement des déchets.

5.1. PRODUCTION DE DIHYDROGENE DE RADIOLYSE

Afin de déterminer la production annuelle d'hydrogène par radiolyse d'un colis, Orano s'est appuyé sur le modèle DOREMI (Description Opératoire de la Radiolyse de l'Eau dans les Matériaux Irradiés), développé par le CEA. La phénoménologie considérée par le modèle DOREMI prend en compte la production dite primaire de dihydrogène à la suite de l'interaction rayonnement / matière entre les déchets radioactifs et l'enrobé cimentaire riche en eau. Cette production primaire est calculée via des rendements radiolytiques primaires. De nombreuses réactions chimiques, dites secondaires, entrent ensuite en jeu. Parmi elles, des boucles réactionnelles peuvent consommer du dihydrogène créé par voie primaire. Ce phénomène, dit de « recyclage du dihydrogène », conduit alors à une diminution du dégazage de dihydrogène hors de l'enrobé. Cette approche de modélisation a été complétée par la mise en œuvre d'expérimentations, notamment sur des déchets en provenance de la piscine 907, ayant permis de conforter les rendements radiolytiques retenus et de mettre en évidence un recyclage partiel du dihydrogène lorsque l'enrobé cimentaire conserve une humidité élevée permettant un transfert gazeux plus lent au sein du réseau de pores. **L'IRSN estime que la démarche d'évaluation de la production de dihydrogène de radiolyse, par une approche combinant des expériences et des modélisations, est pertinente et intègre les meilleures connaissances disponibles à ce jour sur les phénomènes considérés.**

Pour un colis représentatif de la population de colis CFR HAO à produire, le modèle DOREMI évalue la production de dihydrogène de radiolyse à $165 \text{ NL H}_2 \cdot \text{an}^{-1}$ à 40 ans, échéance à laquelle l'envoi vers Cigéo est envisagé. Une étude statistique, reposant sur un modèle DOREMI simplifié, a permis d'appréhender la variabilité des colis CFR HAO à produire eu égard à la stratification des déchets dans le silo HAO. Ainsi, d'après Orano, 95 % des colis présenteront un débit de production de dihydrogène entre 54 et $303 \text{ NL H}_2 \cdot \text{an}^{-1}$ à 40 ans, 2,5 % des colis (soit 3 colis sur un total de 125 colis à produire) présenteront un débit inférieur à $54 \text{ NL H}_2 \cdot \text{an}^{-1}$ à 40 ans et 2,5 % présenteront un débit supérieur à $303 \text{ NL H}_2 \cdot \text{an}^{-1}$ à 40 ans. Parmi ces 3 colis les plus émissifs, le colis le plus pénalisant vis-à-vis de la production de dihydrogène de radiolyse pourrait présenter un dégagement compris entre 320 et $360 \text{ NL H}_2 \cdot \text{an}^{-1}$ à 40 ans. Une incertitude de 10 % est retenue arbitrairement sur ces valeurs, ce qui conduit Orano à déclarer un débit maximal de dihydrogène pour les colis CFR HAO d'environ $400 \text{ NL H}_2 \cdot \text{an}^{-1}$.

En premier lieu, l'IRSN relève que la valeur d'incertitude de 10 % sur le taux de dégazage en dihydrogène des colis CFR HAO ne fait l'objet d'aucune justification. Par ailleurs, l'IRSN souligne que les émissions de dihydrogène de radiolyse par le colis CFR HAO au cours du temps relèvent de phénomènes complexes, non linéaires et parfois antagonistes. A titre d'illustration, le taux de saturation en eau de l'enrobé agit sur deux mécanismes antagonistes : d'une part la production primaire de dihydrogène, qui augmente avec la quantité d'eau radiolysable dans l'enrobé, d'autre part le phénomène dit de recyclage dont l'occurrence dépend du temps de séjour des espèces primaires dans l'enrobé et donc de sa saturation influant sur la diffusion du dihydrogène dans l'eau porale. Or, Orano n'a pas considéré de séchage de l'enrobé dans son analyse, ce qui conduit l'IRSN à s'interroger sur le conservatisme de son évaluation du taux de dégazage de dihydrogène. Enfin, l'IRSN rappelle les incertitudes liées à l'état de connaissance des déchets du silo HAO avant leur reprise, objets de la recommandation n°1. **Aussi, préalablement à l'accord de conditionnement et afin de conforter le caractère enveloppe de l'évaluation du taux de dégazage des colis CFR HAO, l'IRSN estime nécessaire qu'Orano réalise une étude de sensibilité de cette évaluation au regard des paramètres et phénomènes d'intérêts (caractérisation des déchets, taux de saturation en eau des enrobés cimentaires et efficacité du phénomène de recyclage du dihydrogène de radiolyse, etc.).** Ce point fait l'objet de la recommandation n°10 en annexe au présent avis.

S'agissant de la maîtrise du risque d'explosion en entreposage dans D/E EDS, la démonstration de sûreté liée au phénomène de radiolyse dans les colis repose sur la dilution de la concentration en dihydrogène dans l'atmosphère par la ventilation et, en cas d'arrêt de cette ventilation, sur la suffisance des délais d'intervention avant atteinte de la limite d'explosivité du dihydrogène dans l'atmosphère du local d'entreposage. L'IRSN relève que le taux de dégazage des colis CFR HAO, estimé par l'exploitant, est nettement inférieur à celui des fûts ECE de coques et embouts sous eau considérés dans la démonstration de sûreté de l'entreposage. L'IRSN note donc

l'existence de marges satisfaisantes vis-à-vis du dimensionnement de la ventilation et des délais d'intervention avant atteinte de la limite d'explosivité en cas d'arrêt de la ventilation.

S'agissant de la maîtrise du risque d'explosion en conditions de stockage, l'IRSN relève en préambule que le débit maximal annuel de dihydrogène estimé d'un colis CFR HAO est bien supérieur à la valeur limite de dégagement de dihydrogène par colis retenue par l'Andra dans les spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo, à savoir 40 NL H₂.an⁻¹. Il y est toutefois spécifié que « *des dispositions particulières d'exploitation des hottes de transfert et une gestion spécifique du remplissage de l'alvéole rendront possible, au cas par cas, la prise en charge d'un nombre limité de colis dont le taux de dégazage est supérieur à 40 L (H₂) par an et par colis de stockage* ». Le Dossier d'Option de Sécurité (DOS) de l'installation Cigéo de 2017 précise que les dispositions particulières mentionnées dans les spécifications préliminaires d'acceptation permettent ainsi de couvrir les potentiels lots de colis primaires pour lesquels le taux de dégazage pourrait être supérieur à 100 NL H₂.an⁻¹ par colis de stockage. À la famille de colis COG-440, correspondant aux colis CFR HAO, sont ainsi associées une valeur moyenne de 120 NL H₂.an⁻¹ et une valeur haute de 300 NL H₂.an⁻¹ pouvant concerner quelques colis de stockage, à raison d'un colis CFR HAO par colis de stockage. A l'instar de son positionnement dans le cadre de l'expertise du DOS de Cigéo, l'IRSN rappelle que l'analyse de la prise en charge de colis dont la production d'hydrogène serait supérieure à 40 NL H₂.an⁻¹ et la mise en œuvre de dispositions spécifiques permettant de les accepter devra être présentée par l'Andra dans le cadre de la demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation Cigéo. **L'IRSN souligne en particulier que la valeur haute de 300 NL H₂.an⁻¹ par colis de stockage est un critère dimensionnant important pour la sûreté de la phase d'exploitation de l'installation Cigéo et qu'elle devra être confirmée par les analyses de sûreté dans le cadre de la DAC et lors de la mise à jour des spécifications préliminaires d'acceptation des déchets à Cigéo.**

À l'échelle d'un alvéole de stockage MAVL conçu pour accueillir de l'ordre de quelques milliers de colis primaires et compte tenu du faible nombre de colis CFR HAO à produire (de l'ordre de 125), l'IRSN estime qu'une gestion spécifique du remplissage de l'alvéole mixant des colis CFR HAO avec des colis ne présentant pas de taux de dégazage ou des taux très faibles permettra de respecter la valeur moyenne de 40 NL H₂.an⁻¹ par colis de stockage. **La démonstration de l'exclusion du scénario d'atteinte d'une atmosphère explosive dans les alvéoles MAVL due aux dégagements de dihydrogène des colis devra toutefois être complétée au stade de la DAC au regard de l'efficacité, de la fiabilité et de la disponibilité du système de ventilation qui sera mis en œuvre.**

S'agissant de la hotte qui assure le transfert d'un colis de stockage de la surface jusqu'aux alvéoles de stockage, l'IRSN estimait, dans le cadre de l'expertise du DOS de Cigéo, que la possibilité d'atteinte d'une atmosphère explosive ne pouvait être exclue à ce stade en cas d'immobilisation avec un colis dont le débit d'hydrogène serait supérieur à la valeur de 40 NL H₂.an⁻¹, et nécessite une intervention humaine rapide pour la mise en place du système de balayage, dispositif mobile prévue par l'Andra dans cette situation. Les taux de dégazage évalués par Orano dans le cadre de la demande d'autorisation de conditionnement en CFR HAO dépassant la valeur cible de 40 NL H₂.an⁻¹, **l'IRSN n'est pas en mesure, à ce stade, de se prononcer sur l'acceptabilité des colis CFR HAO à Cigéo, celle-ci étant conditionnée à la démonstration de la maîtrise des risques d'explosion en phase d'exploitation du stockage, en particulier pour ce qui concerne la hotte de transfert.**

Enfin, l'IRSN relève, au vu des résultats de l'évaluation de la production de gaz de radiolyse menée par Orano et des incertitudes sur les différents paramètres permettant cette évaluation, qu'on ne peut pas exclure que quelques colis ne respectent pas la valeur haute de 300 NL H₂.an⁻¹ retenue et, qu'en tout état de cause, des dispositions particulières devraient être mise en œuvre pour en assurer la gestion.

Ces éléments renforcent les recommandations n°6 et 10 visant à l'établissement de paramètres garantis et à la réalisation d'une étude de sensibilité aux paramètres et phénomènes d'intérêts pour la maîtrise du taux de dégazage du dihydrogène, en cohérence avec les exigences de l'Andra pour l'acceptation des colis dans Cigéo.

La modélisation réalisée par Orano constitue une base pertinente à considérer pour la démonstration de sûreté des étapes de gestion du colis. Toutefois, l'IRSN considère que l'évaluation du taux de dégazage comporte une part d'incertitude irréductible compte tenu de la complexité des phénomènes et de l'état de connaissances.

Aussi, l'IRSN recommande que des mesures de dégagement de dihydrogène soient réalisées sur des colis CFR HAO afin de conforter le caractère enveloppe des résultats de modélisation du dégagement de dihydrogène et ainsi permettre de s'assurer de l'acceptabilité de ces colis en stockage. Orano devra notamment s'assurer de la représentativité des colis mesurés au regard de la variabilité de composition des déchets intégrés aux colis CFR HAO. Ce point fait l'objet de la recommandation n°11 en annexe au présent avis. A l'issue de l'expertise, Orano a annoncé qu'il mettra en place un programme de mesure du dégagement de dihydrogène sur des colis identifiés comme représentatifs, intégré à son programme de surveillance des colis CFR HAO en entreposage.

Dans l'éventualité où les données acquises lors du suivi en entreposage ne permettraient pas de démontrer le respect du critère pour l'ensemble des colis CFR HAO, Orano envisagerait de rendre alors systématique la mesure du dihydrogène des colis avant désentreposage pour garantir, colis par colis, le respect du critère Andra. L'exploitant précise que les éventuels colis présentant un dégagement de dihydrogène supérieur au critère d'acceptation des colis CFR HAO à Cigéo feraient ainsi l'objet d'une demande de prise en charge dérogatoire à Cigéo notamment par le recours à des dispositions particulières lors de la descente des colis en hotte de transfert vers les alvéoles (telle que l'utilisation de getters⁵ à dihydrogène) pour des colis qui dépasseraient 300 NL.an⁻¹ à la date d'expédition vers Cigéo. **L'IRSN souligne que l'efficacité de ces dispositions doit être démontrée et que la vérification de la faisabilité de leur mise en œuvre doit être anticipée et intégrée dans le dimensionnement de la hotte de transfert dès sa conception.**

5.2. RISQUE DE CORROSION DU COLIS CFR HAO

L'exigence de confinement des radionucléides non-gazeux en phase d'entreposage et d'exploitation du stockage nécessite de démontrer la maîtrise du risque de corrosion, généralisée et localisée, sur les faces interne et externe du colis, ainsi que sur son système respirant. L'IRSN a analysé le risque lié à la corrosion du colis CFR HAO sur la base des éléments phénoménologiques apportés par l'exploitant et d'après le retour d'expérience acquis sur 3454 fûts ECE présentant un taux de dégagement de dihydrogène similaire, munis du même nombre de pastilles que la configuration retenue pour les colis CFR HAO et entreposés depuis 1995 dans l'atelier D/E EDS. Les observations sur ces fûts ont montré le bon comportement dans le temps des filtres PORAL[®], notamment vis-à-vis de leur fonction respirante. **L'IRSN considère que ces éléments permettent de justifier la conception retenue.** Néanmoins, les risques de corrosion localisée ne peuvent être exclus à ce stade compte tenu notamment de la possible reprise d'humidité dans le colis au travers du système respirant et de la réutilisation des fûts ECE en conteneur, objet de la recommandation n°9 en annexe au présent avis. À ce titre, l'IRSN estime qu'il apparaît délicat de considérer que le retour d'expérience des fûts ECE depuis 1995, soit une vingtaine d'années, constitue une démonstration fiable du maintien de l'intégrité des pastilles PORAL[®] sur toute la durée de vie du colis CFR HAO depuis sa production jusqu'à la fin de la phase d'exploitation du stockage soit plus d'une centaine d'années. **Aussi, l'IRSN estime nécessaire la mise en œuvre d'un programme de surveillance des colis en entreposage afin de conforter la maîtrise du risque de corrosion.** A l'issue de l'expertise, Orano a annoncé qu'il intégrerait dans son programme de surveillance des colis en entreposage des mesures spécifiques relatives au risque de corrosion des conteneurs. En tout état de cause, cette surveillance devra permettre de prendre les mesures correctives adaptées, en cas de détection d'une corrosion avérée.

5.3. COMPORTEMENT APRES FERMETURE DU STOCKAGE

Pour ce qui concerne le comportement des colis CFR HAO après fermeture du stockage, l'ANDRA retient un relâchement complet et instantané des radionucléides contenus dans les déchets dès l'arrivée d'eau dans le stockage. Cette hypothèse, particulièrement conservatrice, n'appelle pas de remarque au regard de la démonstration de sûreté du stockage. En outre, des expériences de lixiviation ont été conduites par l'exploitant

⁵ Un getter (littéralement « attracteur » en anglais, du verbe to get, obtenir) est un piège à gaz permettant de réduire la concentration du dihydrogène présent dans l'atmosphère d'un volume confiné afin de prévenir les risques d'explosion.

afin de caractériser le comportement du colis CFR HAO en termes de formation de produits de dégradation hydrosolubles (PDH) susceptibles de favoriser la complexation des actinides et de faciliter la migration des radionucléides dans la couche géologique après la fermeture du stockage. Sur la base de ces expériences, l'IRSN constate, d'une part les incertitudes fortes sur la nature et les mécanismes de formation des PDH, d'autre part l'absence d'évaluation des conséquences de leur formation sur l'évaluation de sûreté à long terme du stockage géologique. **L'IRSN estime donc qu'il est utile de poursuivre les études sur les déchets organiques afin de consolider l'inventaire des PDH formés et permettre de caractériser leur impact, en conditions de stockage sur la mobilité des radionucléides.**

6. CONCLUSION

L'IRSN considère que les éléments apportés par Orano en support à sa demande d'accord de conditionnement des fines et résines du silo HAO en colis CFR HAO, objet de la présente expertise, sont globalement satisfaisants pour ce qui concerne la formulation et les propriétés de l'enrobé cimentaire ainsi que de l'acceptabilité en entreposage dans D/E EDS.

Cependant, l'IRSN estime que des compléments doivent être apportés quant à l'inventaire physico-chimique des déchets, à la réutilisation du conteneur et de son système respirant, à la maîtrise du risque de corrosion ainsi qu'à l'évaluation du taux de dégazage de dihydrogène. En outre, le référentiel de conditionnement tel que transmis en vue du présent examen nécessite d'être mis à jour et devra intégrer une liste consolidée de paramètres garantis compatibles avec les critères d'acceptation en entreposage dans D/E EDS et en stockage dans Cigéo.

En particulier, l'IRSN souligne l'importance :

- d'une part des résultats des caractérisations complémentaires des déchets du silo HAO lors de leur reprise qui doivent permettre de valider les hypothèses prises dans le cadre des études de dimensionnement du colis CFR HAO ;
- d'autre part des mesures de dégagement de dihydrogène sur des colis CFR HAO en entreposage afin de démontrer le caractère enveloppe des résultats de modélisation et de s'assurer de leur éligibilité en stockage. A cet égard, l'IRSN rappelle, à l'instar de son positionnement dans le cadre de l'expertise du DOS de Cigéo, que l'acceptabilité de colis dont le taux de dégazage de dihydrogène serait supérieur à 40 NL.an^{-1} est conditionnée à la démonstration de la maîtrise des risques d'explosion pendant la phase d'exploitation de Cigéo qui devra être présentée par l'Andra dans le cadre de la DAC de l'installation.

Enfin, l'IRSN estime que des compléments au programme de qualification devront être réalisés afin de démontrer la faisabilité du conditionnement des déchets attendus en partie basse du silo dont la teneur en résines serait moindre.



IRSN
Le Directeur général
Par délégation
François BESNUS
Directeur de l'Environnement

ANNEXE A L'AVIS IRSN N° 2021-00139 DU 28 JUILLET 2021

Recommandations de l'IRSN

Recommandation n° 1

L'IRSN recommande qu'Orano réalise des caractérisations physico-chimiques lors des premières opérations de reprises, puis selon une périodicité à définir pour tenir compte de l'hétérogénéité et de l'évolution attendue des caractéristiques de ces déchets au fur et à mesure des opérations de reprise afin de confirmer les hypothèses retenues pour le dimensionnement du CFR HAO concernant notamment la composition physico-chimique, la masse et la sédimentation des fines et résines.

Recommandation n° 2

Dans la prochaine mise à jour du référentiel de conditionnement, l'IRSN recommande qu'Orano définisse comme paramètre garanti la proportion de résine minimale permettant le respect du domaine de validité de la formulation cimentaire de référence.

Recommandation n° 3

Dans la prochaine mise à jour du référentiel de conditionnement, l'IRSN recommande que, d'une façon formelle, les paramètres garantis relatifs à la puissance thermique et au débit de dose à 1 m du colis CFR HAO soient définis dès la phase de production du colis.

Recommandation n° 4

Dans la prochaine mise à jour du référentiel de conditionnement, l'IRSN recommande qu'Orano définisse un ou plusieurs paramètres garantis permettant de garantir la maîtrise des risques liés à la manutention, la résistance au gerbage ainsi qu'à la chute et à la corrosion au cours des différentes phases de vie du colis.

Recommandation n° 5

Dans la prochaine mise à jour du référentiel de conditionnement et compte tenu de la fonction de confinement portée par le fût ECE et les pastilles PORAL®, l'IRSN recommande que les caractéristiques du système respirant, perméabilité et pouvoir filtrant notamment, soient considérées comme des paramètres garantis.

Recommandation n° 6

Dans la prochaine mise à jour du référentiel de conditionnement et compte tenu des enjeux liés à la maîtrise du risque d'explosion, l'IRSN recommande que l'exploitant définisse un ou plusieurs paramètres garantis permettant la maîtrise du taux de dégazage en dihydrogène au cours des différentes phases de vie du colis. En particulier, l'IRSN souligne que le taux de dégazage visé par le respect de ce(s) paramètre(s) garanti(s) devra être compatible avec les conditions d'acceptation de tels colis à Cigéo.

Recommandation n° 7

Dans la prochaine mise à jour du référentiel de conditionnement l'IRSN recommande qu'Orano établisse un ou plusieurs paramètres garantis, à savoir des critères bornés, contribuant, en complément des exigences associées aux installations de production et d'entreposage et aux opérations de transport, à garantir la sûreté-criticité des colis CFR HAO, qu'ils soient isolés ou regroupés.

Recommandation n° 8

L'IRSN recommande qu'Orano démontre la faisabilité de la cimentation des déchets attendus en partie basse du silo. Dans l'hypothèse où la faisabilité de la cimentation de ces déchets ne pourrait être démontrée, l'IRSN estime que l'exploitant devra prévoir un conditionnement intermédiaire de ces déchets afin de ne pas retarder les opérations de vidange complète du silo HAO.

Recommandation n° 9

Préalablement au conditionnement et dans le cadre de la démarche de requalification des fûts ECE, l'IRSN recommande qu'Orano mette en œuvre des contrôles permettant de garantir un état de surface, intérieur comme extérieur, conforme à un fût neuf, notamment vis-à-vis du risque de corrosion localisée.

Recommandation n° 10

Préalablement à l'accord de conditionnement et afin de conforter le caractère enveloppe de l'évaluation du taux de dégazage des colis CFR HAO, l'IRSN recommande qu'Orano réalise une étude de sensibilité de cette évaluation au regard des paramètres et phénomènes d'intérêts (notamment caractérisation des déchets, taux de saturation en eau des enrobés cimentaires et efficacité du phénomène de recyclage du dihydrogène de radiolyse).

Recommandation n° 11

Compte tenu de l'enjeu associé à l'évaluation du taux de dégazage des colis CFR HAO, en lien avec l'acceptabilité du colis à Cigéo notamment, l'IRSN recommande que des mesures périodiques de dégagement de dihydrogène soient réalisées sur des colis CFR HAO en entreposage afin de démontrer le caractère enveloppe des résultats de modélisation du dégagement de dihydrogène et ainsi de vérifier l'acceptabilité de ces colis en stockage. Orano devra s'assurer de la représentativité des colis mesurés au regard de la variabilité de composition des déchets intégrés aux colis CFR HAO.