

Fontenay-aux-Roses, le 21 octobre 2019

Monsieur le Président de l'Autorité de Sûreté Nucléaire

Avis IRSN n° 2019-00238

Objet : Avis relatif à la demande d'accord de conditionnement d'Orano selon la spécification de production de colis standard de déchets vitrifiés (CSD-V) en pot de fusion DIRP SP 16-00258

Réf. : 1. Lettre ASN CODEP-DRC-2017-017260 du 1^{er} juin 2017

Par lettre en référence, vous avez demandé l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le dossier transmis par Orano en support à sa demande d'accord de conditionnement selon la spécification évoluée de production de colis standard de déchets vitrifiés (CSD-V) en pot de fusion DIRP SP 16-00258, dite « spécification évoluée » dans la suite du document.

En réponse aux demandes de l'ASN, l'IRSN a examiné les modifications apportées par la spécification évoluée au regard de la démonstration des performances mécaniques et de confinement du CSD-V en entreposage et en phase d'exploitation du stockage Cigéo, de son acceptabilité dans les installations d'entreposage de l'établissement Orano de La Hague et dans l'installation de stockage Cigéo ainsi qu'au regard de son comportement après fermeture du stockage. Il ressort de cet examen les éléments exposés dans le présent avis.

Adresse courrier
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses
Cedex France

Siège social
31, av. de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
Standard +33 (0)1 58 35 88 88
RCS Nanterre B 440 546 018

1. Contexte technique

La décision ASN n°2008-DC-0125 du 16 décembre 2008 autorise la production de CSD-V en pot de fusion pour le conditionnement de solutions de produits de fission issues principalement du traitement de combustibles usés UOX présentant des taux de combustion élevés, conformément à la spécification de production 300 AQ 60. Orano indique que le conditionnement de solutions de produits de fission selon cette spécification peut conduire à limiter le taux d'incorporation des solutions dans les CSD-V pour respecter les paramètres garantis : dans le cas de combustibles usés présentant des temps de refroidissement faibles (inférieurs à 5 ans), la limitation du taux d'incorporation vise à respecter les limites d'activités en ¹³⁷Cs et ⁹⁰Sr, dans le cas de combustibles usés présentant des temps de refroidissement élevés (supérieurs à 19 ans), elle vise à respecter la dose α cumulée à 10 000 ans. Aussi, pour apporter de la souplesse à l'exploitation des ateliers de vitrification R7 et T7 de son établissement de La Hague, en facilitant l'incorporation de solutions issues de combustibles usés

variés tout en évitant d'augmenter significativement le nombre de CSD-V à produire par tonne de combustible retraité, Orano sollicite une évolution de la spécification de production consistant en :

- l'augmentation de la valeur maximale de la dose α cumulée à 10 000 ans de 1.10^{19} désintégrations α/g^1 de verre à $2,5.10^{19}$ α/g de verre, afin de vitrifier des solutions présentant des teneurs en actinides mineurs plus élevées ;
- le remplacement des activités maximales en ^{137}Cs et ^{90}Sr par la limitation de la puissance thermique du colis à la production à 3 000 W. Orano indique que l'abandon de la limitation de l'activité en ^{137}Cs et ^{90}Sr permet d'augmenter la masse nominale de verre par colis de 400 à 410 kg.

Les caractéristiques du conteneur en acier inoxydable austénitique utilisé pour le conditionnement des solutions de produits de fission, le domaine de composition des verres produits, le procédé de fabrication ainsi que les paramètres garantis et complémentaires du CSD-V, à l'exclusion de ceux mentionnés ci-avant et de la valeur maximale de la contamination surfacique non fixée à l'expédition, mise en cohérence avec les standards en vigueur pour le transport des matières radioactives, restent inchangés par rapport à la spécification de production 300 AQ 60.

Les CSD-V sont toujours destinés à être entreposés dans l'usine Orano de La Hague puis stockés en couche géologique dans l'installation Cigéo actuellement en projet.

2. Performances du CSD-V en entreposage et en phase d'exploitation du stockage

Les performances mécaniques et de confinement du CSD-V en entreposage et en phase d'exploitation du stockage reposent sur le conteneur. La démonstration des performances mécaniques et de confinement d'un CSD-V en dynamiques lente (situation normale de manutention et de gerbage) et rapide (situation accidentelle de chute) se fonde, quelle que soit la spécification de production, sur les caractéristiques géométriques et les caractéristiques mécaniques minimales requises du conteneur ainsi que sur une masse totale de colis de 550 kg.

Orano a étudié l'effet des modifications apportées par la spécification évoluée, dont la puissance thermique maximale du colis à la production de 3 000 W, sur la tenue mécanique et la tenue à la corrosion du conteneur en acier. En effet, le maintien prolongé des aciers inoxydables austénitiques à des températures élevées, telles que celles rencontrées lors du refroidissement du conteneur après son remplissage, est susceptible d'entraîner une modification de leur structure métallurgique, laquelle conditionne leur tenue mécanique et leur tenue à la corrosion. A ce sujet, l'IRSN relève que les hypothèses considérées par Orano pour modéliser l'exposition thermique du conteneur sont bien enveloppes des conditions d'élaboration du CSD-V selon la spécification évoluée. Les résultats de la modélisation montrent que les températures maximales atteintes en différents points du conteneur (jusqu'à environ 850°C en fond de conteneur) et la cinétique de refroidissement du conteneur sont comparables entre un CSD-V à produire selon la spécification évoluée et un CSD-V produit selon la spécification 300 AQ 60. Pour ce qui concerne l'augmentation de la valeur maximale de la dose α cumulée à 10 000 ans de 1.10^{19} α/g de verre à $2,5.10^{19}$ α/g de verre, compte tenu des débits de dose maximaux et de la nature des rayonnements, du gonflement maximal du verre ainsi que de la pression maximale en hélium atteignable dans le vide apical du CSD-V, Orano n'attend pas d'altération des

¹ α/g dans la suite du présent avis.

propriétés de l'acier du conteneur, ce dont convient l'IRSN. L'IRSN considère donc que la tenue mécanique et la tenue à la corrosion du conteneur d'un CSD-V à produire selon la spécification évoluée devraient être similaires à celles d'un CSD-V produit selon la spécification 300 AQ 60.

L'IRSN remarque par ailleurs que l'augmentation de la masse nominale de verre par colis de 400 à 410 kg conduit à une masse totale d'environ 510 kg pour un colis, ce qui reste inférieur à la masse de 550 kg retenue dans la démonstration des performances mécaniques d'un CSD-V (cf. *supra*).

Compte tenu de l'ensemble des éléments ci-avant, l'IRSN estime que les modifications apportées par la spécification évoluée ne sont pas de nature à remettre en cause la démonstration des performances mécaniques et de confinement d'un CSD-V en entreposage et en phase d'exploitation du stockage.

3. Acceptabilité du CSD-V dans les installations d'entreposage et de stockage

A l'issue de leur fabrication, les CSD-V sont placés dans les entreposages des ateliers R7 et T7 où ils séjournent jusqu'à ce que leurs caractéristiques, puissance thermique et débit de dose notamment, soient compatibles avec leur transport interne puis leur entreposage dans les installations E/EV SE² et E/EV LH³ où ils resteront jusqu'au moment de leur désentreposage pour être envoyés vers le stockage Cigéo.

Les entreposages des ateliers R7 et T7 d'une part, et les entreposages E/EV SE et E/EV LH d'autre part, sont dimensionnés pour accueillir des colis de déchets vitrifiés présentant une puissance thermique inférieure ou égale à 4 000 W et 2 000 W respectivement. Orano a indiqué que la puissance thermique maximale observée sur l'ensemble des CSD-V produits à ce jour selon la spécification 300 AQ 60 est inférieure à 2 750 W. Bien que la spécification évoluée permette la production de CSD-V présentant une puissance thermique de 3 000 W, les scénarios de traitement des combustibles usés envisagés à ce jour par Orano conduisent à un CSD-V de référence⁴ présentant une puissance thermique de l'ordre de 2 700 W. **Aussi, la production de CSD-V selon la spécification évoluée ne devrait pas entraîner de modification sensible de l'exploitation des entreposages.**

Le maintien des conditions sous-critiques dans les entreposages précités de l'établissement de La Hague repose notamment sur une masse maximale de plutonium de 110 g par colis, laquelle constitue, à l'instar de la spécification de production 300 AQ 60, un paramètre garanti dans la spécification évoluée. **Ceci n'appelle donc pas de commentaire.**

Par ailleurs, la spécification évoluée prévoit le gerbage des CSD-V dans les puits des entreposages E/EV SE et E/EV LH jusque 13 niveaux contre 12 niveaux selon la spécification de production 300 AQ 60. L'IRSN rappelle que dans le cadre de l'examen de la spécification de production de CSD-V en creuset froid 300 AQ 063, l'empilement de 13 CSD-V n'avait pas soulevé de réserve. Etant donné, d'une part que les caractéristiques mécaniques minimales requises du conteneur sont identiques quelle que soit la spécification de production, d'autre part que la démonstration des performances mécaniques des CSD-V considère une masse totale enveloppe de 550 kg par colis, **l'IRSN estime que le**

² Extension entreposage verre sud-est.

³ Extension entreposage verre La Hague.

⁴ Colis correspondant à un scénario de traitement de combustibles usés de référence défini par Orano.

dimensionnement du conteneur est compatible avec l'empilement de 13 CSD-V à produire selon la spécification évoluée.

En revanche, l'IRSN estime qu'Orano devrait s'assurer que les caractéristiques radiologiques maximales des CSD-V à produire selon la spécification évoluée (activité totale et débit de dose plus élevés que dans le cas de la spécification de production 300 AQ 60), associées à la possibilité d'un gerbage sur 13 niveaux, ne remettent pas en cause le zonage radiologique des entreposages de colis de déchets vitrifiés de son établissement de La Hague.

Pour ce qui concerne le stockage des CSD-V à produire selon la spécification évoluée, l'IRSN a examiné l'adéquation de leurs caractéristiques avec les spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo du 26/06/2017 établies par l'Andra.

Les critères d'acceptation relatifs à la masse, la géométrie, le confinement, la contamination surfacique externe, le taux de vide, le comportement à la chute, le dégagement de radionucléides gazeux ainsi que les substances constitutives du colis n'appellent pas de remarque, les exigences fixées dans la spécification évoluée assurant leur respect.

S'agissant de la maîtrise du risque de criticité, du comportement du colis en cas de sollicitation thermique ou du débit de dose du colis, les exigences quantitatives ne sont pas définies par l'Andra à ce stade.

Pour ce qui concerne la puissance thermique à réception dans l'installation de stockage, l'Andra retient à ce stade une valeur maximale de l'ordre de 500 W par colis de haute activité (HA). Les calculs réalisés par Orano montrent que, pour les scénarios de traitement de combustibles usés qu'il prévoit, un CSD-V produit selon la spécification évoluée et présentant une puissance thermique de 3 000 W à la production nécessiterait un entreposage sur une durée comprise entre 52 et 68 ans avant d'atteindre une puissance thermique de 500 W. En se basant sur la limite fixée par l'Andra pour l'activité en ^{137}Cs par colis à réception, l'IRSN évalue à une cinquantaine d'années la durée d'entreposage d'un CSD-V de référence produit selon la spécification évoluée pour le rendre acceptable dans l'installation de stockage. Ces durées d'entreposage sont compatibles avec l'ordonnement des livraisons de colis primaires à Cigéo retenu au stade de la version E du Programme industriel de gestion des déchets. Pour autant, l'IRSN souligne que, à l'instar de la spécification 300 AQ 60, la spécification évoluée fixe les caractéristiques du CSD-V à produire indépendamment des caractéristiques des solutions à vitrifier, lesquelles peuvent évoluer en fonction des scénarios de traitement. Aussi, l'IRSN estime qu'il n'est pas exclu qu'un scénario de traitement de combustibles usés, pour lequel la spécification évoluée serait respectée, mais conduisant par exemple à une décroissance thermique lente des CSD-V (vitrification de solutions issues du traitement de combustibles MOX présentant un temps de refroidissement important) ou à une activité en ^{137}Cs élevée (vitrification de solutions issues du traitement de combustibles présentant un temps de refroidissement très faible), puisse conduire à la production de CSD-V non compatibles avec cet ordonnancement. A ce sujet, dans le cadre de l'examen par l'IRSN des spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo, Orano a indiqué, qu'en cas de déploiement de la spécification évoluée, il pourrait être nécessaire de prolonger l'entreposage des CSD-V de quelques années afin de respecter les exigences liées à leur activité en ^{137}Cs et à leur puissance thermique (cf. avis IRSN n°2019-00178 du 24/07/2019). **A cet égard, sur la base de son avis n°2019-00129 du 14**

juin 2019 relatif aux besoins en entreposage des colis de déchets HA et Moyenne activité à vie longue (MA-VL), l'IRSN n'identifie pas de difficulté majeure liée à cette extension de durée d'entreposage.

Compte tenu des éléments ci-avant, l'IRSN considère qu'il n'y a pas, en l'état des connaissances, d'élément rédhibitoire à l'entreposage et au stockage des CSD-V à produire selon la spécification évoluée.

4. Comportement du CSD-V après fermeture du stockage

Comportement intrinsèque du verre - Cristallisation et effet des désintégrations a

Le verre est un solide amorphe (non cristallin). La cristallisation du verre, ou dévitrification, conduit à la formation d'hétérogénéités préjudiciables au maintien de ses propriétés de confinement. La maîtrise du risque de cristallisation du verre repose sur la composition des solutions à vitrifier, un refroidissement rapide du verre puis son maintien à des températures inférieures à sa température de début de cristallisation (610°C pour les verres de type R7/T7) avec une marge d'au moins 100°C⁵ (soit 510°C, dénommée température margée dans la suite du présent avis).

Pour ce qui concerne l'incorporation de quantités importantes d'actinides dans le verre, les études menées par le CEA ont montré que le risque d'hétérogénéité dans le verre est lié à la cristallisation de phases apatites riches en terres rares et en actinides au degré d'oxydation +III et peut être apprécié en fonction de la teneur en ces éléments. Sur la base des compléments apportés par le CEA au cours de l'examen, l'IRSN estime que la teneur maximale en terres rares et en actinides au degré d'oxydation +III pouvant être atteinte pour un CSD-V produit selon la spécification évoluée ne devrait pas conduire à la formation d'hétérogénéités préjudiciables à la qualité de la matrice vitreuse.

S'agissant du scénario de refroidissement du verre à l'issue de son élaboration, l'ensemble des études menées sur les verres R7/T7 montrent que leur refroidissement est de l'ordre de 1°C/minute jusqu'à 610°C, température de début de cristallisation, puis se fait plus lentement ensuite. Les résultats des modélisations thermiques réalisées par Orano sur la base d'hypothèses enveloppes des conditions d'élaboration des CSD-V selon la spécification évoluée montrent que la température au cœur du verre atteint une température inférieure à 600°C moins de 24 heures après son élaboration. A cet égard, Orano indique que les observations au Microscope électronique à balayage (MEB) sur des verres inactifs simulant les verres R7/T7, traités thermiquement selon un refroidissement de 1°C/min et selon un isotherme de 65 heures à 600°C, n'ont montré aucun signe de cristallisation.

En outre, les calculs réalisés par Orano montrent que la température margée de 510°C à cœur du verre⁶ n'est pas atteinte dans les conditions d'entreposage et de transport d'un CSD-V produit selon la spécification évoluée et présentant une puissance thermique maximale de 3 000 W à la production. Toutefois, l'IRSN relève que le cumul de dose α , du fait de la création de défauts et de l'augmentation du désordre dans le verre, provoque une augmentation de l'énergie interne du verre

⁵ cf. la Règle fondamentale de sûreté (RFS) n°III.2.b du 12/11/1982 relative aux dispositions particulières applicables à la production, au contrôle, au traitement, au conditionnement et à l'entreposage des déchets de haute activité conditionnés sous forme de verre et résultant du traitement de combustibles irradiés dans des réacteurs nucléaires à eau ordinaire sous pression.

⁶ Respectée environ 70 heures après l'élaboration du CSD-V.

et conduit donc à une énergie stockée. Une élévation de la température du verre⁷ peut entraîner la restauration des défauts et le relâchement progressif de cette énergie. Les évaluations faites par Orano en considérant par conservatisme un relâchement total et instantané de l'énergie stockée ainsi que des conditions pénalisantes d'entreposage et de transport, conduisent à une température à cœur du verre qui pourrait être supérieure à la température margée de 510°C. Elle resterait toutefois inférieure à la température de début de cristallisation de 610°C.

Compte tenu des éléments susmentionnés, l'IRSN estime que les modifications apportées par la spécification évoluée ne sont pas susceptibles de remettre en cause la maîtrise du risque de cristallisation de la matrice vitreuse.

Pour ce qui concerne l'effet des désintégrations α (du fait des interactions rayonnement/matière et de la génération d'hélium) sur le comportement intrinsèque des verres de type R7/T7, Orano s'appuie sur les résultats d'un programme d'études expérimentales et de modélisation engagé dès 2001 par le CEA. L'IRSN souligne que ces études couvrent bien les débits de doses susceptibles d'être rencontrés dans les verres à produire selon la spécification évoluée ainsi que des cumuls de dose α atteignant la valeur de $2,5 \cdot 10^{19}$ α/g de verre (voire plus dans certains essais) correspondant à la valeur du paramètre garanti à 10 000 ans.

L'IRSN note qu'il ressort de ce programme que le verre de type R7/T7 conserve son état vitreux et que les modifications observées de son état structural et de certaines de ses propriétés macroscopiques (atteignant un plateau à partir d'une valeur de dose α cumulée comprise entre 1 et $4 \cdot 10^{18}$ α/g de verre) ne sont pas de nature à remettre en cause son intégrité. De plus, la génération d'atomes d'hélium n'a pas d'effet sur les propriétés macroscopiques du verre du fait d'un nombre suffisant de sites d'accueil dans les volumes libres de celui-ci. **Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

Comportement du verre à la lixiviation

Le CEA a conduit des études de lixiviation sur des verres inactifs de référence, des verres dopés en actinides et des verres inactifs irradiés par des ions pour évaluer les conséquences de l'augmentation du débit de dose α et du cumul de dose α ⁸ sur les deux principaux régimes d'altération sous eau du verre que sont le régime de vitesse initiale puis le régime de vitesse résiduelle. L'IRSN estime que les valeurs de débit de dose α et de dose α cumulée prises en compte dans ces études permettent de couvrir différents scénarios d'évolution du stockage quant à l'échéance à laquelle l'eau arrivera au contact des verres.

Ces études montrent que les désintégrations α ne modifient pas la phénoménologie d'altération du verre mais induisent une augmentation de la valeur de la vitesse d'altération résiduelle *a priori* attribuable au cumul de dose α . A cet égard, l'IRSN note qu'une expérience a mis en évidence une augmentation maximale d'un facteur 3 de la valeur de la vitesse d'altération résiduelle d'un verre dopé en actinides par rapport à un verre de référence inactif.

De plus, cette augmentation de la valeur de la vitesse d'altération résiduelle est observée jusqu'à une

⁷ Du fait par exemple d'une perte de la ventilation forcée en entreposage.

⁸ Du fait de l'augmentation de la valeur maximale de la dose α cumulée à 10 000 ans de $1 \cdot 10^{19}$ α/g de verre à $2,5 \cdot 10^{19}$ α/g de verre.

valeur de dose α de l'ordre de 1.10^{18} α /g de verre. La dégradation du comportement du verre à la lixiviation du fait du cumul de dose α concerne donc autant les CSD-V à produire selon la spécification évoluée objet du présent avis que les CSD-V déjà produits à ce jour, notamment selon la spécification 300 AQ 60.

De manière générale, l'IRSN souligne que les études réalisées dans le cadre de la spécification évoluée ont permis d'améliorer la connaissance des vitesses d'altération des verres sous eau, en particulier au regard de l'effet des désintégrations α .

A cet égard, l'IRSN rappelle que les vitesses d'altération des verres sont utilisées par l'Andra pour l'évaluation de la capacité de confinement et de l'impact radiologique du stockage après sa fermeture. A ce sujet, Orano a indiqué, à l'issue du présent examen, poursuivre avec le CEA des études visant à confirmer la phénoménologie d'altération du verre produit selon la spécification évoluée et à comprendre les mécanismes sous-tendant l'augmentation de la valeur de la vitesse d'altération résiduelle. L'IRSN remarque qu'à ce stade, les données disponibles sur les vitesses d'altération des verres produits selon la spécification évoluée ne tiennent pas compte de l'influence des paramètres environnementaux liés au projet de stockage Cigéo (température, pH, espèces en solution, conditions potentiellement insaturées). **Aussi, l'IRSN considère que les études en cours devraient prendre en compte l'effet des paramètres environnementaux liés au projet de stockage Cigéo sur les valeurs de vitesses d'altération, afin de permettre d'affiner l'évaluation de la capacité de confinement et de l'impact radiologique du stockage après sa fermeture.**

5. Conclusion

L'IRSN estime que la spécification évoluée de production CSD-V en pot de fusion est acceptable du point de vue des performances mécaniques et de confinement du CSD-V. De plus l'IRSN considère, qu'il n'y a pas, en l'état des connaissances, d'élément réhibitoire à l'acceptation du CSD-V à produire selon la spécification évoluée dans les installations d'entreposage de l'établissement Orano de La Hague et dans l'installation de stockage Cigéo en projet.

S'agissant du comportement des CSD-V après fermeture du stockage, les études réalisées dans le cadre de la spécification évoluée ont permis d'améliorer la connaissance des vitesses d'altération des verres sous eau, en particulier au regard de l'effet des désintégrations α . Néanmoins, compte tenu de la contribution majoritaire des CSD-V à l'inventaire radiologique du stockage, l'IRSN souligne l'intérêt de confirmer et compléter cette connaissance afin de permettre à l'Andra d'affiner l'évaluation de la capacité de confinement et de l'impact radiologique du stockage après sa fermeture.

Pour le Directeur général, par délégation

Didier GAY

Adjoint au Directeur de l'Environnement