



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 2 décembre 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2022-00225

Objet : Transport - Modèle de colis RAJ-II
Démonstration de la tenue mécanique et thermique à l'égard des conditions accidentelles de transport

Réf. : [1] Lettre ASN CODEP-DTS-2022-019118 du 27 avril 2022.
[2] Règlement de transport de l'AIEA - SSR-6 - Édition 2012.

Par lettre citée en première référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) sollicite l'avis et les observations de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le niveau de sûreté en mécanique et en thermique à l'égard des conditions accidentelles de transport (CAT) décrit dans le dossier de sûreté du modèle de colis RAJ-II, transmis à l'appui de la demande de validation présentée par la société Global Nuclear Fuel (GNF, ci-après dénommée « le requérant »).

Le modèle de colis RAJ-II, chargé d'assemblages combustibles neufs destinés aux réacteurs à eau bouillante (REB) ou aux réacteurs à eau pressurisée (REP), est actuellement agréé aux États-Unis en tant que colis de type B(U) pour matières fissiles, mais ne l'est plus en France depuis 2017. Le requérant demande à l'ASN une validation du certificat pour un agrément en tant que colis industriel de type 2 (IP-2) pour le transport d'un contenu constitué de deux assemblages combustibles de type REB, appelés GNF2, par voie routière. À cet égard, le requérant a révisé le dossier de sûreté du modèle de colis RAJ-II et apporté des éléments de réponse aux demandes de l'ASN formulées en 2016 et 2021.

De l'évaluation des documents transmis, l'IRSN retient les principaux éléments suivants.

1. DESCRIPTION DU MODÈLE DE COLIS

Emballage

L'emballage RAJ-II, de forme générale parallélépipédique, se compose d'un conteneur externe et d'un conteneur interne. Le conteneur externe est constitué de tôles en acier inoxydable, délimitant un espace rempli de blocs de bois et de papier en nid d'abeille. La cavité du conteneur externe accueille le conteneur interne, qui est muni d'isolant thermique en silicate d'alumine. La cavité du conteneur interne est divisée en deux espaces qui reçoivent chacun un assemblage combustible. Les parois de ces deux espaces sont recouvertes d'une protection en mousse en polyéthylène d'épaisseur variable en fonction des assemblages combustibles transportés.

En réponse à une demande de l'ASN, le requérant présente les caractéristiques mécaniques des composants de sûreté dans la plage de températures réglementaires, basées d'une part sur des essais de qualification sur la plage

MEMBRE DE
ETSON

de températures réglementaires, d'autre part sur une analyse bibliographique. Toutefois, le requérant ne justifie pas que les valeurs issues de la bibliographie couvrent celles fabriquées pour le modèle de colis RAJ-II. **Aussi, l'IRSN estime que la demande de l'ASN reste à prendre en compte.**

Contenu

Le contenu de l'emballage RAJ-II est constitué d'au plus deux assemblages combustibles neufs GNF2 destinés aux réacteurs REB. Le requérant indique, dans le dossier de sûreté, une masse maximale autorisée pour ces assemblages différente de celle retenue pour les démonstrations de sûreté de tenue mécanique du modèle de colis RAJ-II en CAT lors des extrapolations. **Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation n° 1 en annexe 1 au présent avis.**

2. COMPORTEMENT MÉCANIQUE EN CAT

S'agissant de l'étude du comportement mécanique du modèle de colis RAJ-II à l'issue des épreuves réglementaires simulant les CAT, le requérant s'appuie, d'une part sur des essais de chute réalisés avec des spécimens du modèle de colis RAJ-II à température ambiante dans différentes configurations de chute, d'autre part sur des simulations numériques basées sur des recalages sur les différentes épreuves mécaniques des spécimens d'emballage. Afin d'étudier les configurations de chute non testées, il réalise ensuite une extrapolation en température des modèles numériques et étudie l'influence des orientations de chutes non testées. Enfin, le requérant évalue, par calculs numériques, la tenue mécanique des crayons combustibles GNF2 pour des chutes verticale et horizontale en simulant le cumul des épreuves mécaniques et thermiques simulant les CAT.

2.1. REPRÉSENTATIVITÉ DES ESSAIS DE CHUTE

Bien qu'en lien avec une demande de l'IRSN et des demandes de l'ASN relatives à la représentativité des spécimens d'emballage RAJ-II des chutes réalisées, le requérant n'a pas apporté, dans le dossier de sûreté du modèle de colis RAJ-II, de nouveaux éléments démontrant la représentativité des spécimens d'emballage et des assemblages factices utilisés lors des essais dans la plage de températures réglementaires. Il s'appuie uniquement sur son système qualité pour garantir cette représentativité. **En l'état, l'IRSN estime que la représentativité des spécimens de chute et leur caractère enveloppe du modèle de colis RAJ-II, notamment concernant les pastilles, n'est toujours pas acquise.**

2.2. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES COMPOSANTS UTILISÉS DANS LES MODÈLES NUMÉRIQUES

En réponse à des demandes de l'ASN portant sur les caractéristiques mécaniques des composants utilisés dans les modèles numériques dans la plage de températures réglementaires, le requérant a apporté des précisions sur les caractéristiques mécaniques des différents composants modélisés, en particulier pour les absorbeurs de chocs, la mousse en polyéthylène et le silicate d'alumine. Concernant le papier en nid d'abeille et la mousse en polyéthylène, il retient des coefficients dynamiques des lois de comportement basés sur les recalages des spécimens de chute à température ambiante. L'IRSN relève que ces recalages ne tiennent pas compte de la dispersion des caractéristiques des matériaux en fabrication et de leur variabilité en température. En outre, en particulier pour le papier en nid d'abeille, le requérant ne présente ni le pic élastique en contrainte, ni les contraintes, ni le point de talonnement à partir duquel le matériau se durcit fortement. S'agissant du bois et du silicate d'alumine, l'IRSN considère que des imprécisions demeurent concernant la représentativité du facteur de durcissement lié à la vitesse de déformation des matériaux. Enfin, le requérant ne précise pas les énergies reprises par le sapin et le silicate d'alumine en CAT au regard des autres composants. **En l'état, l'IRSN estime que le requérant ne répond que partiellement aux demandes de l'ASN portant sur les caractéristiques mécaniques utilisées dans les modèles numériques.**

2.3. RECALAGES

Le requérant a effectué les recalages de l'ensemble des simulations numériques sur les résultats des essais de chute à température ambiante. Toutefois, il ne justifie pas que le maillage retenu permet de représenter correctement les phénomènes physiques étudiés concernant le niveau d'accélération, de contrainte et de déformation des composants de sûreté du modèle de colis RAJ-II. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 1 en annexe 2 au présent avis.**

En réponse à des demandes de l'ASN, le requérant a tout d'abord ajusté la masse du modèle numérique à celle du spécimen d'essai. **L'IRSN estime que ceci est satisfaisant.** Pour le cas particulier de la chute quasi-horizontale avec fouettement sur couvercle, le requérant ne vérifie pas que les résultats sont suffisamment enveloppés afin de s'abstenir du recalage des accélérations de cette chute. Pour les autres configurations de chute testées, l'analyse comparative des accélérations des autres recalages montre des déphasages en accélération et en temps. Pour l'IRSN, les modèles numériques ne sont donc pas représentatifs du comportement des spécimens de chute, notamment pour les interactions dynamiques, d'une part entre le conteneur interne et les assemblages combustibles, d'autre part entre les assemblages combustibles eux-mêmes. Aussi, l'IRSN considère que la justification de la suffisance des modèles numériques pour reproduire les phénomènes physiques, nécessaire à l'évaluation du comportement du combustible du modèle de colis RAJ-II en cas de chute représentative des CAT, est à compléter. **En l'état, l'IRSN estime que le requérant ne répond pas complètement aux demandes de l'ASN portant sur la représentativité des modèles numériques de recalage.**

2.4. EXTRAPOLATIONS

Les extrapolations par calcul numérique, réalisées par le requérant, visent à définir les accélérations maximales vues par les assemblages combustibles GNF2 du modèle de colis RAJ-II en chutes verticale et horizontale.

Le requérant évalue ces accélérations pour différentes chutes uniquement à froid. À cet égard, il retient sans justification une température différente pour les composants en acier inoxydable de celle des autres composants. **Toutefois, l'IRSN convient que cet écart ne devrait pas être de nature à mettre en cause l'évaluation de l'accélération du modèle de colis RAJ-II.**

À la suite de la mise à jour des modèles numériques, et notamment la masse du modèle de colis RAJ-II, le requérant n'a pas réévalué le niveau d'accélération des assemblages combustibles pour les configurations de chute à la température atteinte en conditions normales de transport (CNT). Or, une hausse de la masse a pour conséquence de maximiser les écrasements, ce qui pourrait conduire à un choc rigide de talonnement induisant des décélérations plus élevées que celles considérées dans les études actuelles. **Pour répondre à une demande de l'ASN sur ce point, l'IRSN estime ainsi que le requérant doit s'assurer que les accélérations des assemblages combustibles des modèles numériques d'extrapolation à froid du modèle de colis RAJ-II couvrent celles des extrapolations aux températures atteintes en CNT.**

Par ailleurs, à l'issue des extrapolations, le requérant retient de manière enveloppe les accélérations des assemblages combustibles maximales obtenues, d'une part à basse température pour les chutes verticale et horizontale avec un impact sur la surface latérale du couvercle du conteneur externe, d'autre part en tenant compte d'une masse diminuée de 10 %. Toutefois, l'IRSN estime que ces marges de sûreté ne sont pas suffisantes pour couvrir, d'une part la non prise en compte de l'effet de fouettement sur la surface latérale du couvercle pour le cas de la chute horizontale dans la plage des températures réglementaires, d'autre part les incertitudes liées à la robustesse de la modélisation adoptée pour les calculs numériques. **Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation n° 2 en annexe 1 au présent avis.**

D'autre part, le requérant ne précise pas le niveau de déformation plastique dans les vis des couvercles des conteneurs à l'issue des calculs d'extrapolation. L'IRSN rappelle qu'une rupture des vis pourrait mettre en cause les hypothèses retenues dans les études de sûreté-criticité. **Pour répondre à une demande de l'ASN sur ce point, l'IRSN estime ainsi que le requérant doit compléter sa démonstration en s'assurant de la représentativité de la**

modélisation des vis de couvercles adoptée sur les simulations numériques du modèle de colis RAJ-II au regard des résultats des essais de chute.

En outre, le requérant n'a pas évalué la tenue mécanique du modèle de colis RAJ-II à la suite du cumul des épreuves mécaniques représentatives des CNT et CAT. Néanmoins, l'IRSN convient que, sur la base des éléments du dossier de sûreté, ce cumul d'épreuves n'est pas de nature à mettre en cause la tenue mécanique du modèle de colis RAJ-II. **En tout état de cause, il appartient au requérant de confirmer ce point par une étude comme le prévoit le règlement de transport de l'AIEA, cité en deuxième référence, pour les contenus fissiles.**

Enfin, en réponse à une demande de l'ASN et afin de trouver la configuration la plus pénalisante pour le cas de la chute avec effet de fouettement, le requérant a effectué des calculs en faisant varier l'angle de chute uniquement à la température ambiante, sans justifier cette valeur sur la plage des températures réglementaires. **En l'état, l'IRSN estime donc que cela ne permet pas de répondre de manière complète à la demande de l'ASN portant sur le caractère pénalisant de l'angle de chute retenu pour le cas de la chute avec effet de fouettement.**

2.5. COMPORTEMENT DES ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES GNF2

En lien avec des demandes de l'ASN relatives à la démonstration de l'intégrité des gaines combustibles, le requérant évalue par calcul numérique la tenue mécanique des assemblages combustibles GNF2 en positions verticale et horizontale, en tenant compte des accélérations enveloppes issues des modèles numériques d'extrapolation à froid et du chargement thermique représentatif de l'épreuve de feu. À cet égard, il présente les valeurs d'accélération et les durées d'impact retenues pour les chutes verticale et horizontale et évalue par calcul numérique le niveau de déformation plastique maximale aux extrémités des gaines combustibles à l'issue du cumul des épreuves de chute et d'incendie.

Bien que ces éléments soient de nature à améliorer les démonstrations de sûreté, le requérant ne détaille pas les dimensions des différents composants modélisés, la représentativité de la modélisation adoptée, le bilan de masse et le maillage retenu dans les modèles numériques. En l'absence d'éléments étayés sur les caractéristiques dimensionnelles, l'IRSN estime que la représentativité de ces modèles n'est pas suffisamment justifiée pour s'assurer de la prise en compte des phénomènes physiques parfois complexes mis en jeu au niveau des crayons combustibles. En outre, les caractéristiques mécaniques retenues dans les modèles numériques ne sont pas non plus justifiées et leur représentativité n'est donc pas démontrée. Par ailleurs, le requérant ne spécifie pas dans le dossier de sûreté du modèle de colis RAJ-II les différents coefficients de dilatation thermique utilisés dans les modèles. Or, ces coefficients sont nécessaires pour évaluer les rattrapages de jeux entre les composants et les contraintes associées dans les gaines combustibles. En outre, le requérant retient des valeurs de pression de remplissage des crayons combustibles légèrement inférieures à celles définies dans le dossier de sûreté. Enfin, le requérant ne justifie pas la représentativité de la fréquence du filtre des accélérations retenue pour étudier, d'une part la tenue mécanique du modèle de colis RAJ-II lors des recalages et des extrapolations des épreuves mécaniques, d'autre part la tenue mécanique des crayons combustibles GNF2 lors des CAT.

Aussi, l'IRSN estime que le requérant doit compléter sa démonstration concernant les points suivants :

- la justification des valeurs de fréquence de filtrage et des accélérations maximales retenues pour les modèles thermomécaniques d'assemblages combustibles, au regard des incertitudes relatives, d'une part à la représentativité et à la robustesse des modèles numériques de recalage, d'autre part au caractère enveloppe des extrapolations dans la plage des températures réglementaires du modèle de colis RAJ-II ;
- la représentativité des modèles thermomécaniques d'assemblages combustibles vis-à-vis du modèle de colis RAJ-II pour ce qui concerne les dimensions, la masse, les conditions aux limites et les phénomènes physiques relatifs à un conteneur interne déformable, aux interactions gaine-gaine et pastille-gaine, aux crayons d'eau et à la chute sur poinçon ;
- la justification, pour la température des CAT, d'une part de l'extrapolation des caractéristiques mécaniques des composants utilisées dans les modèles thermomécaniques d'assemblages combustibles,

d'autre part du caractère enveloppe des caractéristiques mécaniques du zircaloy-2 constituant les gaines combustibles GNF2 ;

- la présentation et la justification des coefficients de dilatation thermique des composants utilisés dans les modèles thermomécaniques d'assemblages combustibles au regard des caractéristiques thermiques du modèle de colis RAJ-II ;
- la justification de la pression interne maximale dans les crayons combustibles GNF2 transportés en modèle de colis RAJ-II, dans la plage de températures réglementaires utilisée dans l'étude de tenue des gaines, au regard des spécifications de fabrication et de leurs tolérances.

En l'état, l'IRSN estime que les éléments présentés par le requérant ne permettent pas de répondre aux demandes de l'ASN relatives à la démonstration de l'intégrité des gaines combustibles.

2.6. AUTRES DEMANDES

Lors de la précédente demande de validation, le requérant basait la démonstration du maintien de l'intégrité des assemblages combustibles GNF2 sur une similitude entre les modèles de colis RA-3D et RAJ-II, ce qui avait conduit l'ASN à formuler plusieurs demandes. Depuis, le requérant a mis à jour la démonstration de sûreté en supprimant la référence au modèle de colis RA-3D et en s'appuyant uniquement sur les résultats des épreuves mécaniques des spécimens du modèle de colis RAJ-II et des simulations numériques associées. **Aussi, les demandes de l'ASN portant sur les similitudes des modèles de colis RA-3D et RAJ-II peuvent être considérées caduques et donc soldées de fait.**

En réponse à une demande de l'ASN relative à la chute sur poinçon, le requérant s'appuie sur l'absence de rupture lors des essais à température ambiante pour considérer que la limite d'élasticité et la résistance mécanique ne varient pas dans la plage des températures réglementaires. Pour l'IRSN, cet argument n'est cohérent ni avec le chapitre de description du dossier de sûreté dans lequel des variations sont définies, ni avec certaines normes de spécification des matériaux métalliques. En outre, le poinçon impacte des composants organiques et polymères disposés entre les deux conteneurs, sensibles aux effets de la température. **Aussi, l'IRSN estime que la demande de l'ASN relative à la chute sur poinçon reste à prendre en compte.**

Enfin, en réponse à une demande de l'ASN relative à l'impact différé, le requérant indique qu'un système de cales axiales et longitudinales est mis en place avant le transport afin de s'assurer que les jeux sont négligeables entre les assemblages combustibles et les surfaces internes des logements. Le requérant précise également la nature de ces composants et indique qu'un contrôle de ces cales est effectué avant le transport. **L'IRSN estime que ceci permet de répondre de manière satisfaisante à la demande de l'ASN.**

3. COMPORTEMENT THERMIQUE EN CAT

Pour rappel, l'ASN a formulé plusieurs demandes portant sur la représentativité des essais thermiques et sur l'intégrité des gaines combustibles GNF2 à la suite du cumul des épreuves de chute et de feu.

Concernant les caractéristiques des spécimens de crayon utilisés, le requérant présente des éléments dimensionnels (épaisseur des gaines, diamètre des pastilles...) différents de ceux présentés dans le dossier de sûreté du modèle de colis RAJ-II. **Aussi, l'IRSN estime que la demande de l'ASN sur ce point reste à prendre en compte.**

En réponse à une demande de l'ASN, le requérant présente les conditions d'essais et justifie le conservatisme des échanges convectifs autour des crayons. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN et permet de répondre de manière satisfaisante à la demande de l'ASN.**

En réponse à une demande de l'ASN relative aux mesures réalisées lors des essais thermiques, le requérant décrit la température relevée de chaque thermocouple en fonction du temps, les variations du diamètre externe des crayons testés, les ruptures des crayons constatés sur certains essais et la variation de la pression interne des

crayons combustibles en fonction de la température. Il n'a toutefois pas réalisé d'analyse de sûreté pour expliquer les phénomènes observés. À cet égard, l'IRSN relève que la faible longueur des crayons d'essais pourrait masquer les effets des contraintes dues à la dilatation différentielle. D'autre part, une perte de pression dans les crayons à la température minimale des essais n'a pas été justifiée par le requérant. Par ailleurs, le requérant n'a pas évalué l'état des crayons à l'issue des chutes au regard de l'état des gaines, du caractère fragile des pastilles et du risque de dispersion de la matière en CAT. **Aussi, l'IRSN estime que le requérant ne répond pas de manière totalement satisfaisante à la demande de l'ASN.**

Enfin, concernant des demandes de l'ASN relatives au caractère enveloppe des essais thermiques et aux conséquences des déformations des crayons combustibles à l'issue des épreuves mécaniques en CAT, le requérant montre que, lors des essais thermiques, les gaines testées résistent jusqu'à la température réglementaire de l'épreuve de feu. En outre, il estime que les calculs numériques relatifs au niveau de déformation des crayons combustibles montrent la présence de marges suffisantes pour garantir le maintien de leur intégrité à l'issue des épreuves des CAT. Bien que ces éléments soient de nature à améliorer les démonstrations de sûreté, ils pourraient être mis en cause au vu des besoins de compléments identifiés aux paragraphes 2 et 3 du présent avis. En outre, l'IRSN relève que le requérant n'a pas réalisé d'essai traitant le cas des crayons combustibles en position horizontale, qui est la position de transport. Cette configuration pourrait engendrer des sollicitations thermiques différentes de l'essai mettant en œuvre des crayons combustibles en position verticale et conduire ainsi à une sous-évaluation des contraintes thermomécaniques dans les crayons. **Aussi, l'IRSN estime que les éléments présentés par le requérant ne permettent pas de répondre de manière suffisante aux demandes de l'ASN sur ces points.**

4. CONCLUSION

Afin de répondre à plusieurs demandes de l'ASN, le requérant a mis à jour sa stratégie de démonstration de la tenue mécanique et thermique à l'égard des CAT du modèle de colis RAJ-II, chargé de deux assemblages combustibles neufs GNF2 destinés aux réacteurs de type REB. Bien que ces nouveaux éléments soient en partie de nature à améliorer la démonstration de sûreté relative à la tenue mécanique et thermique à l'égard des CAT du modèle de colis RAJ-II, le requérant n'a pas répondu de manière satisfaisante à de nombreuses demandes de l'ASN portant sur plusieurs points nécessaires à l'atteinte d'un niveau de sûreté conforme aux exigences du règlement de transport de l'AIEA, cité en deuxième référence. Cela concerne en particulier la représentativité des essais de chute et des modèles de recalage, le caractère enveloppe des modèles d'extrapolation, ainsi que la représentativité et le caractère enveloppe des modèles thermomécaniques et des essais thermiques. À cet égard, le requérant devra également prendre en compte les recommandations formulées en annexe 1 au présent avis.

Par ailleurs, l'IRSN considère que le requérant devrait tenir compte de l'observation formulée en annexe 2 au présent avis.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Eric LETANG

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE 1 DE L'AVIS IRSN N° 2022-00225 DU 2 DÉCEMBRE 2022

Recommandations de l'IRSN

Recommandation n° 1

L'IRSN recommande que le requérant démontre la tenue mécanique du modèle de colis RAJ-II en tenant compte des masses maximales du contenu (deux assemblages combustibles GNF2) et d'UO₂ mentionnées dans le dossier de sûreté.

Recommandation n° 2

L'IRSN recommande que le requérant évalue l'effet de fouettement sur la surface latérale du couvercle pour le cas de la chute quasi-horizontale, à prendre en compte pour évaluer la tenue du couvercle et des assemblages combustibles du modèle de colis RAJ-II, dans la plage de températures réglementaires.

ANNEXE 2 DE L'AVIS IRSN N° 2022-00225 DU 2 DÉCEMBRE 2022

Observation de l'IRSN

Observation n° 1

L'IRSN estime que le requérant devrait étudier l'influence du maillage, retenu dans le modèle numérique simulant les chutes représentatives des conditions accidentelles de transport pour les éléments importants pour la sûreté, sur le niveau d'accélération, de contrainte et de déformation des composants de sûreté du modèle de colis RAJ-II, en particulier des vis des couvercles, de la mousse en polyéthylène, du silicate d'alumine et du papier en nid d'abeille.