



Fontenay-aux-Roses, le 26 juin 2024

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2024-00094

Objet : Transport – Étude générique « Fuel Integrity Project 1.0 » de la société Orano NPS

Réf. :

- [1] Saisine ASN CODEP-DTS-2023-044080 du 02 octobre 2023.
- [2] Règlement de l'AIEA n° SSR-6 – Édition 2018 : « Règlement de transport des matières radioactives ».
- [3] Lettre ASN CODEP-DTS-2018-042147 du 13 novembre 2018.
- [4] Guide NUREG-2216 d'août 2020 : « Standard Review Plan for Transportation Packages for Spent Fuel and Radioactive Material: Final Report ».
- [5] Hirose et al., 2015 : « Fuel rod mechanical under dynamic load condition on high burnup spent fuel of BWR and PWR ».
- [6] Lettre ASN CODEP-DTS-2015-018820 du 22 juin 2015.

Par la saisine citée en première référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) demande l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur l'utilisation du guide technique nommé « Fuel Integrity Project 1.0 » (FIP) transmis par la société Orano NPS, dénommé ci-après « le requérant »¹.

Ce guide technique concerne les modèles de colis chargés d'assemblages combustibles, neufs ou irradiés, destinés aux réacteurs à eau pressurisée (REP) et à eau bouillante (REB). Il a pour objectif de déterminer les hypothèses à prendre en compte dans les démonstrations de sûreté visant à répondre aux exigences du règlement des transports de matières radioactives cité en deuxième référence. Ces hypothèses, reposant sur les études et essais réalisés dans le cadre du projet FIP, ont évolué au gré des nouveaux éléments apportés dans le cadre de ce projet, qu'il s'agisse de l'évolution de l'état de l'art ou de réponses aux demandes de l'ASN. À cet égard, en réponse à la lettre de l'ASN citée en troisième référence, le requérant a mis à jour son guide en 2020.

Dans ce contexte, l'ASN demande l'avis de l'IRSN sur l'emploi du guide technique, particulièrement pour ce qui concerne son champ d'application et les hypothèses retenues pour les assemblages de combustibles neufs ou irradiés, en portant une attention particulière aux taux de rupture des crayons des combustibles retenus en conditions normales ou accidentelles de transport. De l'expertise du guide technique, l'IRSN retient les points importants ci-après.

¹ À des fins de compréhension, la présente fiche fera référence au « requérant » pour les différents noms qu'il a pu posséder au cours de son histoire : « Transnucléaire » jusqu'en 2002, « COGEMA Logistics » jusqu'en 2006, « TN International » ou « AREVA TN » jusqu'en 2018, puis « Orano TN » jusqu'en 2019 avant de prendre le nom d'« Orano NPS ».

1. CONTEXTE

1.1. HISTORIQUE

Le projet FIP a été initié en 2000 par le requérant et la société INS, à la suite d'une demande de l'ASN visant à consolider les démonstrations de sûreté concernant le comportement mécanique des assemblages combustibles en conditions accidentelles de transport. Ce projet a conduit le requérant à établir un guide technique destiné à définir les données et les analyses techniques nécessaires au développement de nouveaux colis de transport d'assemblages combustibles. Le guide technique porte sur la définition du comportement des assemblages dans des configurations de chute en position verticale ou horizontale (éventuellement avec fouettement) fondée sur des essais mécaniques et des calculs analytiques réalisés sur des crayons ou tronçons de crayons de combustibles, irradiés ou non, et des essais de chute de prototypes d'emballages chargés d'assemblages factices. Le guide technique, qui tient également compte d'éléments de la littérature, est destiné *in fine* à définir des hypothèses à considérer dans les démonstrations de sûreté relatives au transport des assemblages combustibles, neufs ou irradiés, pour les conditions normales (CNT) et accidentelles de transport (CAT).

Le dernier avis de l'IRSN sur ce sujet, en 2011, recommandait notamment la limitation de l'application de la méthode aux assemblages combustibles neufs étant donné que les phénomènes de rupture fragile et de fluage thermique associés aux assemblages combustibles irradiés n'avaient pas été étudiés par le requérant. En outre, cet avis soulignait l'importance, compte tenu des résultats d'essais et des incertitudes associées, de fixer un critère de quantité de matière radioactive susceptible de se disperser hors d'un crayon de combustible neuf à 25 % de sa masse, de prendre en compte un facteur de sécurité de 2 sur les accélérations, au regard des incertitudes sur le comportement dynamique du contenu (panier et assemblages) et d'étudier le comportement des assemblages en chute oblique.

Par ailleurs, le requérant a complété le guide technique en se fondant sur les essais mentionnés ci-avant, avec la caractérisation du type d'endommagement des assemblages et crayons combustibles (élasticité, glissement ou rupture) et les propriétés des matériaux. En revanche, il n'a pas étudié le risque de rupture fragile des crayons combustibles irradiés, ce qui le conduit notamment à considérer, de manière pénalisante, un rejet de 100 % des pastilles combustibles en dehors des gaines des crayons pour les études relatives à la prévention des risques de criticité et au relâchement d'activité.

1.2. ORGANISATION DU GUIDE TECHNIQUE

Le premier chapitre du guide technique résume les données concernant les assemblages combustibles et les essais réalisés dans le cadre du projet FIP, donne un aperçu des endommagements possibles et présente la méthode à utiliser pour élaborer les démonstrations de sûreté.

Les chapitres suivants, organisés en annexes, présentent des modèles mécaniques, des données sur les matériaux notamment des crayons combustibles, des exemples d'applications, des spécifications de tests, des rapports et des analyses sur lesquels reposent les hypothèses et méthodes de démonstrations proposées dans le guide technique.

Le requérant a ajouté, dans la dernière mise à jour du guide technique, deux notes de synthèse concernant respectivement les combustibles neufs et irradiés. Ces notes synthétisent la démarche générale de la méthode FIP sur l'ensemble des domaines de sûreté pour lesquels la dispersion de la matière hors de gaines des crayons et la déformation des assemblages présentent des enjeux.

Par ailleurs, le requérant a joint un tableau de synthèse des réponses aux recommandations formulées par l'IRSN dans son avis de 2011. **Ceci est satisfaisant** puisque le requérant clarifie ainsi sa position sur l'ensemble des problématiques restées en suspens. Toutefois, de nombreuses réponses sont orientées uniquement sur la prévention des risques de criticité, comme cela était souvent le cas à l'origine du projet FIP qui concernait d'abord le combustible neuf. Or les éléments présentés dans le guide technique sont également utilisés dans les

démonstrations de sûreté relatives au comportement thermique des modèles de colis, au relâchement d'activité et à la radioprotection. **Aussi l'IRSN estime que les justifications apportées dans le tableau de synthèse pourraient être complétées pour prendre en compte explicitement l'ensemble des risques concernés lorsque ceci est pertinent.**

1.3. CHAMP D'APPLICATION DU GUIDE TECHNIQUE

Le champ d'application du guide technique est limité au cadre des essais et études auxquels il fait référence, c'est-à-dire, en particulier, les assemblages standards de types REP et REB, certains types de gaines, des taux de combustion actuellement rencontrés dans les réacteurs électronucléaires français et des endommagements constatés à l'issue de chutes dans des configurations latérales et axiales. Le guide technique n'exclut pas des différences dans la conception des assemblages, à condition que les méthodes d'évaluation soient adaptées en suivant les mêmes principes que ceux énoncés dans le guide technique. **À cet égard, il appartient au requérant de justifier tout écart des caractéristiques des assemblages combustibles étudiés dans ses dossiers de sûreté par rapport aux données présentées dans le guide technique (caractéristiques géométriques, taux de combustion, composition chimique et micro-structurale des gaines).**

2. HYPOTHÈSES RETENUES

Les types de combustibles étudiés dans le guide technique sont de types UOX (oxyde d'uranium) et MOX (oxyde mixte d'uranium et de plutonium) qui se distinguent, au regard des risques pour le transport des matières radioactives, de la manière suivante :

- les assemblages neufs UOX sont en général classés en matière de faible activité spécifique (LSA), ils possèdent une faible puissance thermique et sont transportés en colis du type IP ou A. Dans ce cas, seul le risque de criticité est significatif ;
- les assemblages neufs MOX possèdent une puissance thermique moyenne et une quantité de A_2 significative, ils sont transportés en colis du type B. Dans ce cas, tous les risques sont à étudier ;
- les assemblages irradiés, UOX ou MOX, possèdent une puissance thermique élevée et une quantité de A_2 significative, ils sont transportés en colis du type B. Dans ce cas, tous les risques sont également à étudier.

2.1. ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES NEUFS

2.1.1. Conditions normales de transport

Pour les CNT, le requérant s'appuie sur les études menées sur des combustibles irradiés afin de justifier que le risque de rupture des gaines des combustibles neufs est marginal. Il conclut que seul un dommage des gaines des combustibles neufs est à retenir pour l'étude de relâchement d'activité dans laquelle il retient un taux de crayons ruptés, qu'il considère pénalisant, de 2 %. L'IRSN note que la justification de l'exploitant est qualitative, bien qu'il dispose d'éléments techniques sur les caractéristiques mécaniques des gaines et les efforts rencontrés en cas de chute lui permettant une approche quantitative. **Toutefois, compte tenu de la ductilité des gaines étudiées, l'IRSN considère que le taux de rupture de gaines retenu est adapté.**

Par ailleurs, le requérant ne considère pas de dispersion de matière radioactive en dehors des gaines pour les autres analyses de sûreté. **L'IRSN estime que l'exploitant pourrait, par cohérence, considérer une dispersion de matière radioactive en dehors des gaines pour l'ensemble des analyses de sûreté.**

2.1.2. Conditions accidentelles de transport

Pour les CAT, le requérant a identifié les différents modes d'endommagement des crayons et les risques associés. En cas de chutes verticales, les endommagements peuvent être :

- des ruptures de gaines, par flambage, provoquant une dispersion de matière radioactive en dehors des gaines à prendre en compte dans les démonstrations de sûreté : quantité de matière dans la cavité plus élevée pour les études de relâchement d'activité et de criticité, risque de concentration de matière dans des zones sensibles pour les études de radioprotection et du comportement thermique du modèle de colis ;
- des glissements des assemblages et des crayons combustibles ou déplacements de matière dans le plénum des crayons combustibles ayant une influence sur la géométrie du milieu fissile pour les études de criticité et la position de la matière radioactive considérée dans les études de radioprotection et du comportement thermique du modèle de colis ;
- une expansion ou compaction du faisceau de crayons ayant principalement une influence sur la géométrie du milieu fissile pour les études de criticité.

En cas de chute horizontale, les endommagements peuvent se présenter sous forme :

- de ruptures de gaines par flexion ou cisaillement provoquant une perte d'étanchéité des gaines de combustible ;
- d'expansions ou de compactations du faisceau de crayons.

Ces éléments n'appellent pas de remarque.

S'agissant des ruptures de gaines conduisant à une dispersion de matière en dehors de ces dernières, le requérant considère un taux de 25 % de dispersion de matière radioactive en dehors des crayons ruptés. En effet, il considère une fragmentation des pastilles sur 50 % de la longueur du crayon, qui seraient donc susceptibles d'être dispersées en dehors du crayon, et un facteur de rétention de ces fragments par les gaines de 50 %. **Ceci est cohérent avec les conclusions de l'avis de l'IRSN de 2011 et n'appelle pas de remarque.**

S'agissant des études liées à la prévention des risques de criticité, au comportement thermique et à la radioprotection, le requérant propose de cumuler dans les démonstrations de sûreté les endommagements observés à l'issue des chutes verticales et horizontales représentatives des CAT. **Ceci est satisfaisant.**

Par ailleurs, pour les études du comportement thermique et de radioprotection, le requérant considère le tassement du réseau de crayons et le glissement des crayons, fondés sur des résultats d'essais. Toutefois, il ne prend pas en compte l'effet d'un impact différé, que ce soit entre les pastilles, les crayons, les assemblages et le colis. Or cet impact pourrait augmenter les accélérations et les dommages sur les crayons combustibles. **Par conséquent, l'IRSN estime que le requérant pourrait considérer l'effet de l'impact différé dans les endommagements à retenir pour les études du comportement thermique et de radioprotection.**

Pour ce qui concerne le relâchement d'activité, le requérant considère 100 % des crayons ruptés, **ce qui est satisfaisant.** S'agissant de l'effet sur les températures du colis des endommagements et déplacements des crayons, qui pourrait conduire à une augmentation de la pression dans l'enceinte de confinement, le requérant considère que, lorsque des marges significatives existent sur le critère de relâchement d'activité, ce phénomène est du second ordre et n'est pas nécessairement à prendre en compte. **Sur le principe, ceci est acceptable. Il appartient au requérant de présenter cette justification, notamment les marges évoquées, dans ses dossiers de sûreté.**

2.2. ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES IRRADIÉS

Le requérant indique que la méthode FIP présentée dans le guide technique peut être utilisée pour tout type d'assemblage combustible irradié sous réserve d'en justifier au cas par cas l'applicabilité compte tenu du caractère fragile des gaines combustibles irradiées et de l'absence de prise en compte du risque de fluage de ces gaines dans la méthode FIP. Aussi, le requérant a retenu, dans son guide technique, des approches pénalisantes de sûreté. **Ce principe est satisfaisant.**

2.2.1. Conditions normales de transport

À l'instar du combustible neuf, le requérant considère comme marginal le risque de rupture fragile, compte tenu des résultats d'essais de chute sur des crayons irradiés, des essais de compression réalisés sur les gaines de combustible irradié et du retour d'expérience de situations incidentelles rencontrées en exploitation.

En outre, le guide technique s'appuie sur l'étude citée en cinquième référence qui présente des résultats d'essais de compression, axiale et latérale, réalisés sur des gaines de combustibles irradiées. Or l'IRSN relève que ces essais ne sont *a priori* pas représentatifs puisque le tronçon de crayon est encastré aux deux extrémités, ce qui n'est pas le cas des crayons dans leurs assemblages. Ceci pourrait augmenter sa résistance notamment à l'égard du flambement. Par ailleurs, les caractéristiques de ces gaines combustibles sont différentes de celles des assemblages irradiés dans des réacteurs français. **Aussi, la représentativité de ces résultats n'est pas acquise.** Cette observation est également applicable pour l'utilisation de cette publication dans le cadre des démonstrations de sûreté relatives aux conditions accidentelles de transport.

De plus, le retour d'expérience présenté dans le guide technique ne fait état que d'une seule situation de transport *a priori* incidentelle et d'un faible nombre d'évènements en installations qui ne sauraient être représentatives de la diversité des combustibles, des types de gaines transportées et des CNT.

Aussi, l'IRSN considère que les éléments présentés par le requérant ne permettent pas de considérer le risque de rupture comme marginal et que le caractère ductile des gaines des combustibles neufs n'est pas transposable au cas des combustibles irradiés. À cet égard, dans la publication citée en quatrième référence sur laquelle s'appuie le guide technique, il est indiqué que l'autorité américaine considère pour les CNT un taux de rupture des gaines de 3 %, indépendamment de la fonction de sûreté étudiée.

Nonobstant, pour ce qui concerne les études de relâchement d'activité, le requérant retient un taux de rupture des gaines de 5 % pour les colis de transport et de 100 % pour les colis transportés à l'issue d'un entreposage de longue durée. **Ceci est acceptable.**

2.2.2. Conditions accidentelles de transport

Les modes d'endommagement des crayons combustibles irradiés sont fondés, d'une part sur les mêmes essais sur combustible neuf que ceux évoqués au paragraphe 2.1 du présent avis, d'autre part sur des essais réalisés sur crayons irradiés dans le cadre du projet FIP ou dans un autre cadre.

Le guide technique indique que la déformation du réseau de crayons est principalement due aux déformations plastiques des grilles qui ne sont pas sujettes à la rupture fragile. Le requérant indique en outre que ce comportement n'est pas significativement modifié par l'irradiation. Aussi, il retient pour la chute axiale des grilles intermédiaires non déformées et pour la chute latérale une première grille compactée, jusqu'à 32 mm dans le cas des REP et 20 mm dans le cas des REB, et le reste des grilles entièrement compacté. **Ceci est acceptable.**

S'agissant de la ruine des crayons combustibles irradiés, le requérant considère qu'au maximum deux ruptures simultanées peuvent avoir lieu sur le même crayon. À partir d'un traitement statistique de séries d'essais de flexion, en considérant des marges de sûreté, le requérant conclut que la dispersion peut être d'une pastille par crayon de type REP et de 3,5 pastilles par crayon de type REB. **Toutefois, comme évoqué au cours des expertises précédentes, l'IRSN souligne que la quantité de matière dispersée dépend notamment du faciès de rupture et de la masse totale des pastilles du crayon sous forme finement fragmentée. Par ailleurs, les essais réalisés sont peu nombreux et ne permettent pas de couvrir l'ensemble des situations d'irradiation et d'hydruration des gaines rencontrées.**

En tout état de cause, le requérant indique dans le guide technique que l'état des connaissances ne permet pas de statuer sur le comportement fragile des gaines en raison du manque de connaissance sur les problématiques liées à des phénomènes tels que l'hydruration ou le fluage pour de longues périodes après la sortie du réacteur. Aussi, il propose, pour chaque étude de sûreté, d'appliquer les marges de sûreté suivantes.

Pour les études de sûreté-criticité et de relâchement d'activité en CAT, la ruine complète des assemblages combustibles avec dispersion totale de la matière dans la cavité est considérée. **Ceci est satisfaisant.**

Pour les études du comportement thermique et de radioprotection, le requérant cumule les hypothèses de déplacement et de déformation des assemblages et celles concernant la dispersion de matière dans la cavité, de manière à maximiser la température des composants des modèles de colis et les débits d'équivalent de dose. **Ceci est satisfaisant.**

S'agissant en particulier de la dispersion de la matière en dehors des gaines, le guide technique propose de retenir un taux de dispersion en fonction de la longueur active de l'ensemble des crayons combustibles, selon que la tenue du panier est démontrée ou non. La matière dispersée est ensuite placée dans la cavité de la manière la plus pénalisante dans les études de radioprotection et de thermique. **Ceci a été validé par l'ASN dans ses courriers cités en troisième et sixième références pour certains modèles de colis. En tout état de cause, il appartient au requérant de justifier l'applicabilité de la méthode dans les autres cas.**

3. CONCLUSION

L'IRSN estime que le guide technique FIP peut servir de référence aux démonstrations de sûreté du requérant. Il apporte une base d'éléments techniques et de références qui permettent d'appréhender la problématique de la tenue mécanique des crayons combustibles de manière acceptable. Toutefois, s'agissant de son champ d'application, certaines hypothèses retenues dans le guide technique pourraient ne pas couvrir la diversité des situations présentées dans les dossiers de sûreté présentés à l'appui des demandes d'agrément. Ainsi, il appartient au requérant de montrer que le guide technique est applicable à chacune de ces situations.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Anne-Cécile JOUVE

Adjointe au Directeur de l'expertise de sûreté