



Fontenay-aux-Roses, le 17 juillet 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2023-00113

---

<b>Objet</b>	<b>Réacteurs électronucléaires (tous paliers) – EDF</b> <b>Nouvelle démarche de justification de la tenue mécanique des assemblages de combustible en cas d'accident de référence</b>
<b>Réf.</b>	[1] Saisine ASN - CODEP-DCN-2023-010450 du 22 février 2023. [2] Avis IRSN - 2020-00050 du 30 mars 2020. [3] Décision ASN - 2021-DC-0706 du 23 février 2021.

---

Conformément à la demande formulée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en référence [1], l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné l'acceptabilité, au plan de la sûreté, de la nouvelle démarche de justification de la tenue mécanique des assemblages de combustible en situation d'accident de référence (ADR)<sup>1</sup> proposée par EDF.

### 1. CONTEXTE

Dans le cadre du quatrième réexamen périodique (RP4) des réacteurs de 900 MWe du palier CP0 exploités en gestion de combustible CYCLADES et du palier CPY exploités en gestion de combustible PARITÉ MOX, EDF a étudié la tenue mécanique des composants des assemblages de combustible dans les conditions accidentelles les plus pénalisantes, à savoir : lors d'un séisme, d'un accident par perte de réfrigérant primaire (APRP) et pour l'ADR. L'objectif de cette étude est de vérifier la tenue mécanique des assemblages afin de garantir les fonctions de sûreté relatives à la maîtrise de la réactivité et au refroidissement du cœur. L'étude limitative concerne la tenue mécanique des grilles d'assemblage aux sollicitations latérales rencontrées au cours des transitoires accidentels.

Afin de vérifier le respect des exigences de sûreté, EDF avait, dans le référentiel de sûreté associé au RP3 900, défini un critère de découplage visant à vérifier l'absence de flambage<sup>2</sup> des grilles irradiées.

---

<sup>1</sup> L'ADR résulte d'une superposition des sollicitations dues au séisme et à l'accident par perte de réfrigérant primaire (APRP) les plus pénalisantes, considérée, de manière conventionnelle, comme la sollicitation enveloppe pour le dimensionnement des assemblages de combustible.

<sup>2</sup> Le flambage des grilles se traduit par la déformation plastique des plaquettes internes qui s'accompagne de la mise en losange des cellules des grilles.

Les études réalisées dans ce référentiel de sûreté respectaient ce critère. Toutefois, les évolutions d'hypothèses<sup>3</sup> retenues dans le cadre du RP4 900 ont conduit EDF à transmettre des études présentant des déformations permanentes de certaines grilles d'assemblage nécessitant le développement d'une démarche de justification nouvelle et complexe.

Cette nouvelle démarche de justification de la tenue mécanique des grilles a fait l'objet d'une première expertise de l'IRSN dans le cadre de la préparation de l'avis en référence [2]. Plusieurs réserves avaient alors été formulées portant sur la représentativité des essais permettant de caractériser la limite d'absence de flambage des grilles et leur comportement au-delà de cette limite, ainsi que sur la démarche de justification de la tenue mécanique des assemblages lors des transitoires accidentels en présence de grilles déformées afin de garantir le respect des exigences de sûreté. Considérant notamment les réserves émises par l'IRSN et les engagements pris par EDF sur le sujet, l'ASN avait formulé une prescription technique<sup>4</sup> [3] portant sur la réalisation d'essais, plus représentatifs que les essais de référence alors valorisés, afin de caractériser la limite d'absence de flambage des grilles d'assemblage, ainsi que sur la définition de dispositions à mettre en œuvre en cas de dépassement de cette limite pour garantir le respect des exigences de sûreté.

En réponse à ses engagements, EDF ainsi transmis un dossier présentant une nouvelle démarche de justification de la tenue mécanique des assemblages en transitoires accidentels reposant notamment sur l'adaptation de la modélisation du comportement des assemblages afin de prendre en compte la présence de grilles d'assemblage déformées.

L'ASN souhaite ainsi recueillir l'avis de l'IRSN [1] sur l'acceptabilité, au plan de la sûreté, des éléments transmis par EDF relatifs à la nouvelle démarche de justification de la tenue mécanique des assemblages de combustible en situation d'ADR.

Afin de répondre à la demande de l'ASN, l'expertise de l'IRSN a plus précisément porté sur :

- la représentativité du modèle mécanique de rangée d'assemblages et les effets de l'interaction entre les rangées d'assemblages, dus à la présence des grilles déformées, sur la dynamique du transitoire accidentel ;
- l'analyse des effets d'une variabilité de la limite d'absence de flambage des grilles avec le taux de combustion de l'assemblage pour le calcul mécanique de rangée d'assemblages ;
- le mode de cumul des sollicitations dues au séisme et à l'APRP retenu pour la justification de la tenue mécanique des assemblages pour l'ADR.

Les conclusions de cette expertise sont présentées dans les paragraphes suivants.

---

<sup>3</sup> Il s'agit de la prise en compte du phénomène de déformation latérale des assemblages en fonctionnement normal, de l'évolution du référentiel d'APRP (taille des brèches) et de l'évolution de la valeur de la raideur des grilles d'assemblage à la suite de la résorption d'une anomalie d'étude.

<sup>4</sup> Décision n°2021-DC-076 de l'ASN du 23 février 2021 : [Étude-D]

I.– Au plus tard le 30 juin 2023, l'exploitant réalise des essais permettant de caractériser la limite de flambage des grilles des assemblages de combustible. À la même date, l'exploitant évalue le comportement mécanique des assemblages en situation d'accident de perte de réfrigérant primaire de quatrième catégorie cumulée avec un séisme survenant de manière concomitante sur la base d'une méthode validée, intégrant des hypothèses et des règles adaptées aux incertitudes et aux limites des connaissances des phénomènes mis en jeu.

II.– En cas de dépassement de la valeur garantissant l'absence de flambage, l'exploitant définit des dispositions à mettre en œuvre pour assurer la maîtrise de la réactivité et le refroidissement du cœur dans cette situation et le calendrier associé.

## 2. REPRÉSENTATIVITÉ DU MODÈLE MÉCANIQUE DE RANGÉE D'ASSEMBLAGES

Les efforts d'impact au niveau des grilles induits par les mouvements de l'enveloppe du cœur et des plaques du cœur lors des transitoires accidentels sont évalués avec un outil de calcul scientifique mécanique modélisant la dynamique de rangée d'assemblages.

Ce modèle permet de simuler le comportement vibratoire d'une rangée « isolée » d'assemblages soumise à des sollicitations latérales de type séisme ou APRP. Les efforts d'impact maximaux calculés au niveau des grilles d'assemblage (et entre les grilles et le cloisonnement) sont comparés à la limite d'absence de flambage des grilles.

Les études réalisées dans le cadre du RP4 900 ayant mis en évidence des déformations permanentes (ou résiduelles) de grilles d'assemblage de combustible, EDF a proposé une extension du modèle dynamique de rangée d'assemblages au-delà de la limite d'absence de flambage des grilles afin d'évaluer ces déformations permanentes des grilles en cas d'APRP<sup>5</sup>. Au-delà de la limite d'élasticité des grilles, deux types de déformations permanentes des grilles sont observés : une déformation dans la direction de l'impact, appelée enfoncement résiduel, et une déformation dans la direction orthogonale à l'impact, appelée déversement. Les amplitudes de déformation permanente de grille estimées dans le cadre de l'avis en référence [2] ont alors conduit l'IRSN à interroger EDF sur les effets éventuels des interactions entre les rangées d'assemblages qui ne peuvent plus être exclues lors des transitoires accidentels d'APRP et d'ADR. En effet, les déversements des grilles estimés peuvent être supérieurs aux jeux inter-assemblages présents en réacteur. À ce titre, EDF s'est engagé à analyser les résultats des essais multi-rangées d'assemblages disponibles afin de statuer sur les effets éventuels des interactions entre les rangées d'assemblages sur la dynamique des transitoires accidentels.

En réponse à cet engagement, EDF a fourni une analyse des programmes d'essais sismiques menés en France et au Japon au cours desquels des configurations multi-rangées d'assemblages ont été testées sur une table vibrante avec des intensités sismiques variables. Cette analyse porte sur les effets potentiels des interactions entre les rangées d'assemblages sur les efforts d'impact entre les grilles mesurés lors des transitoires accidentels. Les résultats de ces essais montrent le caractère équivalent voire enveloppe des efforts d'impact enregistrés sur les grilles d'une configuration mono-rangée d'assemblages par rapport à ceux observés pour une configuration multi-rangées d'assemblages présentant des déformations permanentes de grilles et mettant en œuvre des interactions entre les rangées d'assemblages attenantes.

Pour l'IRSN, les éléments apportés par EDF permettent de justifier de manière satisfaisante l'absence d'effet notable des interactions entre les rangées d'assemblages en présence de déformations permanentes de grilles, et *in fine* de conclure sur l'équivalence du comportement dynamique des rangées avant et après le flambage de certaines grilles en transitoire accidentel.

**En conclusion, compte tenu de l'ensemble des éléments présentés par EDF, l'IRSN estime que le calcul basé sur le modèle dynamique de type mono-rangée d'assemblages à l'échelle d'un cœur est conservatif par rapport à une configuration multi-rangées d'assemblages.**

---

<sup>5</sup> À ce jour, aucune étude ne met en évidence un dépassement de critère d'absence de flambage en cas de séisme.

### 3. EFFET DE LA VARIABILITÉ DE LA LIMITE D'ABSENCE DE FLAMBAGE AVEC LE TAUX DE COMBUSTION

La limite d'absence de flambage des grilles diminue avec le taux de combustion des assemblages de combustible. Dans la démarche actuelle, les études relatives à la justification de la tenue mécanique des assemblages en transitoire accidentel sont réalisées conventionnellement pour deux cas limites : une étude dite en configuration début de vie où tous les assemblages constituant la rangée sont neufs et une étude en configuration fin de vie où tous les assemblages présentent un taux de combustion maximal<sup>6</sup>.

À l'issue de l'expertise réalisée dans le cadre de l'avis en référence [2], l'IRSN avait estimé que la pertinence de l'hypothèse d'étude susmentionnée pour évaluer les enfoncements résiduels de grilles sur une rangée d'assemblages n'était pas démontrée et que les hypothèses de calculs devaient être adaptées afin d'identifier les cas pénalisants à retenir compte tenu de la variabilité des configurations de cœur des réacteurs d'EDF. En réponse à cette réserve, EDF a analysé la sensibilité des enfoncements résiduels à la limite d'absence de flambage des grilles en réalisant différents calculs de rangée d'assemblages présentant des taux de combustion variables et représentatifs des configurations de cœur de réacteurs de 900 MWe. Les résultats de calcul montrent des augmentations limitées d'enfoncements résiduels de grilles à certaines positions du cœur. Au cours de la présente expertise, EDF s'est engagé à réaliser les études à venir en considérant, pour les différents assemblages, des caractéristiques variables en fonction des taux de combustion moyen assemblage pour être représentatif des cœurs de réacteurs en exploitation. **L'IRSN estime satisfaisant cet engagement.**

### 4. MODE DE CUMUL DES SOLLICITATIONS DUES AU SÉISME ET À L'APRP POUR LA JUSTIFICATION DE LA TENUE MÉCANIQUE DES ASSEMBLAGES POUR L'ADR

EDF a proposé une nouvelle démarche de cumul des sollicitations dues au séisme et à l'APRP afin de justifier le comportement mécanique des grilles d'assemblage pour l'ADR. À ce titre, EDF a prévu de conserver la démarche actuelle<sup>7</sup> uniquement pour les cas où la limite d'absence de flambage des grilles serait respectée en situation de séisme, d'APRP et d'ADR. En revanche, si une des deux sollicitations ou leur cumul conduit à un enfoncement résiduel de grille, EDF a prévu de traduire ces sollicitations sous forme d'énergies mécaniques d'impact en lieu et place des efforts d'impact maximaux. Le cumul de ces deux énergies est ensuite traduit en enfoncement résiduel de grille à l'aide d'une corrélation déduite d'essais. Au cours de l'expertise, EDF a apporté des éléments concernant la construction et la validation de cette corrélation.

**L'IRSN estime acceptable le principe de la nouvelle démarche de cumul des sollicitations dues au séisme et à l'APRP proposée par EDF afin de justifier le comportement mécanique des assemblages de combustible en situation d'ADR.**

**Nonobstant, l'IRSN statuera ultérieurement sur l'acceptabilité de la corrélation reliant l'énergie d'impact à l'enfoncement résiduel de grille, qui sera définie en s'appuyant sur les résultats de nouveaux essais de flambage. Ces nouveaux essais, qui visent à répondre à la prescription technique de l'ASN [3], sont plus représentatifs que les essais de référence actuellement valorisés.**

---

<sup>6</sup> La valeur maximale fixée par la réglementation française est de 52 GWj/tU.

<sup>7</sup> Cette démarche repose sur la vérification du critère de découplage relatif à l'absence de flambage des grilles d'assemblage à l'issue de l'ADR. En pratique, les efforts d'impact maximaux sont calculés à l'aide d'un modèle de rangée d'assemblages pour le cas du séisme et de l'APRP. Le cumul quadratique de ces efforts est ensuite comparé au critère afin de garantir les exigences de sûreté.

## 5. CONCLUSION

En réponse aux réserves de l'IRSN émises dans le cadre de l'avis en référence [2], EDF a fourni une adaptation de la démarche de justification de la tenue mécanique des grilles d'assemblage en transitoires accidentels (APRP, séisme et ADR). À l'issue de la présente expertise, l'IRSN estime acceptables, au plan de la sûreté, les éléments transmis par EDF relatifs à la nouvelle démarche de justification du comportement mécanique des assemblages de combustible en situation d'ADR.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au directeur de l'expertise de sûreté