

Fontenay-aux-Roses, le 9 mars 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2022-00051

Objet : Réacteurs électronucléaires (tous paliers) – EDF
Modalité de prise en compte du phénomène de fléchissement des crayons.

Réf. : [1] Lettre ASN – CODEP-DCN-2022-006125 du 2 février 2022.
[2] Lettre ASN – CODEP-DCN-2014-020988 du 1^{er} juillet 2014.
[3] Lettre ASN – CODEP-DCN-2015-046507 du 24 décembre 2015.
[4] Lettre ASN – CODEP-DCN-2017-000364 du 18 mai 2017.
[5] Lettre ASN – CODEP-DCN-2019-003520 du 18 octobre 2019.

Conformément à la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) citée en référence [1], l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné l'acceptabilité, sur le plan de la sûreté, des nouvelles valeurs de pénalité relatives au fléchissement des crayons de combustible proposées par EDF au regard de leurs utilisations et notamment en ce qui concerne les types de combustible couverts. Par ailleurs, l'IRSN a analysé le mode de cumul de cette pénalité aux autres postes d'incertitudes et pénalités affectant la puissance linéique.

1. CONTEXTE

Lors du fonctionnement d'un réacteur, les crayons de combustible se déforment entre deux grilles de maintien du fait des contraintes mécaniques et hydrauliques ainsi que des effets liés à l'irradiation et à la température.

La surveillance des assemblages de combustible après une période d'irradiation a mis en évidence ce phénomène de fléchissement des crayons. Dans les espaces inter-grilles, les crayons de combustible présentent une courbure dont l'amplitude augmente au cours de l'irradiation, ce qui provoque l'ouverture ou la fermeture des espaces inter-crayons. Le fléchissement des crayons n'étant pas modélisé explicitement dans les études de sûreté, une pénalité de fléchissement permet la prise en compte de l'effet de la déformation du réseau de crayons de combustible sur l'évaluation du risque de perte d'intégrité de la gaine. Ce risque est évalué notamment à partir de l'estimation de la puissance linéique maximale dans le cœur.

La pénalité associée au phénomène de fléchissement, appliquée aux calculs de la puissance linéique, a été établie par le concepteur Westinghouse à la fin des années 70 à une valeur conventionnelle considérée comme enveloppe. La valeur de cette pénalité est identique pour tous les types de combustible du parc en exploitation et pour tout taux de combustion. Le mode de cumul de cette pénalité, aux autres postes d'incertitudes et

pénalités, retenu est quadratique¹.

De manière récurrente dans le passé, l'ASN, reprenant les avis de l'IRSN émis notamment dans le cadre des réexamens de sûreté successifs des installations, a demandé à EDF, par les courriers [2] à [4], de retenir un mode de cumul plus conservatif (cumul arithmétique²). En effet, bien que le phénomène de fléchissement des crayons soit observé, aucun modèle ne permet de le prédire actuellement. Ainsi, sa prise en compte dans la démonstration de sûreté doit faire l'objet d'une grande prudence afin de garantir le conservatisme de l'évaluation de la puissance linéique maximale. EDF n'a jamais répondu favorablement aux demandes formulées à cet égard par l'ASN dans les lettres [2] à [4].

Toutefois, dans le cadre des conclusions de la phase générique du quatrième réexamen périodique des réacteurs de 900 MWe (RP4 900) et comme rappelé dans la saisine en référence [1], l'ASN a accepté dans le principe la possibilité d'une répartition de la pénalité en une part dite systématique et une part aléatoire : la part systématique a vocation à être cumulée arithmétiquement avec les autres postes d'incertitudes et pénalités relatives à la puissance linéique, la part restante, dite aléatoire, étant cumulée quadratiquement.

En réponse à la demande n° 1 de l'ASN formulée dans la lettre en référence [5] dans le cadre du RP2 N4, EDF a proposé, pour tous les assemblages de combustible chargés sur les réacteurs du parc en exploitation et sur l'EPR, une réévaluation de la pénalité de fléchissement des crayons, dépendant du type de combustible et du taux de combustion. Par ailleurs, dans le cadre du RP4 900, une campagne de mesures d'espacement inter-crayons sur des assemblages irradiés de conception récente a été effectuée afin de vérifier le conservatisme de la loi décrivant le déplacement des crayons en fonction du taux de combustion, appelée, par la suite, loi FRAGEMMA³. Enfin, EDF propose un nouveau mode de cumul de cette pénalité aux autres postes d'incertitudes et pénalités relatives à la puissance linéique, cohérent avec la position prise par l'ASN dans le cadre du RP4 900.

L'ASN souhaite connaître l'avis de l'IRSN sur l'acceptabilité, sur le plan de la sûreté, des nouvelles valeurs de pénalité de fléchissement retenues par EDF. Notamment, l'ASN souhaite connaître la position de l'IRSN sur la suffisance de la base de données expérimentales sur laquelle repose la loi FRAGEMMA, ainsi que sur le nouveau mode de cumul de cette pénalité aux autres postes d'incertitudes et pénalités relatives à la puissance linéique proposé par EDF.

Dans la suite de l'avis, l'IRSN présente ainsi les conclusions de son expertise sur les points suivants :

- le conservatisme de la loi empirique FRAGEMMA ;
- la réévaluation de la pénalité de fléchissement ;
- le cumul de la pénalité de fléchissement aux autres postes d'incertitudes et pénalités relatives à la puissance linéique ainsi que ses modalités d'utilisation.

2. CONSERVATISME DE LA LOI EMPIRIQUE FRAGEMMA

L'estimation de la pénalité de fléchissement repose sur la loi empirique FRAGEMMA décrivant le déplacement des crayons en fonction du taux de combustion. Cette loi, établie à partir de mesures d'espacement inter-crayons réalisées sur des assemblages de combustible de conceptions anciennes (années 80), a été confortée par de nouvelles mesures réalisées sur des assemblages de conceptions récentes.

L'IRSN note, en particulier, qu'EDF a réalisé de nouvelles mesures en 2021 qui permettent d'enrichir la base de

¹ Il s'agit du cumul de la racine carrée de la somme des valeurs d'incertitudes et pénalités élevées au carré.

² La pénalité est additionnée à la puissance linéique.

³ La loi FRAGEMMA a été établie à partir de mesures réalisées sur des assemblages de conceptions anciennes. Cette loi montre que le fléchissement des crayons augmente avec leur irradiation.

données expérimentales, pour des faibles taux de combustion et pour le combustible MOX⁴.

Bien qu'aucun modèle théorique du phénomène de fléchissement ne sous-tende cette loi empirique, l'IRSN a la raisonnable assurance du caractère enveloppe de cette loi, pour les combustibles UO₂⁵ et MOX actuellement chargés en réacteur, au-delà du premier cycle d'irradiation⁶. Pour le premier cycle, bien que les crayons soient moins sensibles au phénomène de fléchissement, l'IRSN ne peut pas se prononcer sur le conservatisme des hypothèses retenues en l'absence de mesures.

D'une manière générale, l'IRSN estime qu'EDF doit poursuivre les efforts engagés pour vérifier le conservatisme de la loi FRAGEMA pour les assemblages de nouvelles conceptions, tels que les futurs assemblages MOX qui pourraient être chargés dans certains réacteurs de 1300 MWe ou pour les assemblages chargés dans le réacteur EPR.

3. REEVALUATION DE LA PENALITE DE FLECHISSEMENT

La méthode d'estimation de la pénalité de fléchissement retenue par EDF s'appuie sur un nombre important de calculs neutroniques du type Monte-Carlo⁷. Des centaines d'assemblages avec des crayons fléchis, dont l'amplitude de fléchissement est déterminée par la loi FRAGEMA, sont simulés afin de déterminer l'impact du déplacement des crayons sur leurs puissances linéiques⁸.

L'IRSN estime que la modélisation des assemblages retenue par EDF ainsi que l'outil de calcul de neutronique utilisé permettent de représenter correctement l'effet des jeux inter-crayons de combustible sur la puissance linéique induit par le fléchissement.

L'IRSN souligne l'intérêt des nombreuses études de sensibilité réalisées par EDF qui ont permis de justifier la suffisance des provisions retenues pour l'estimation de la pénalité de fléchissement au regard de la diversité des situations des chargements des assemblages de combustible utilisés sur le parc en exploitation.

En conséquence, l'IRSN estime acceptables les nouvelles valeurs de pénalité de fléchissement déterminées pour les assemblages de combustible chargés sur les réacteurs du parc en exploitation au-delà du premier cycle d'irradiation.

4. CUMUL DE LA PENALITE DE FLECHISSEMENT ET MODALITES D'UTILISATION

L'IRSN rappelle que, en l'état actuel des connaissances, le phénomène de fléchissement des crayons n'est que partiellement maîtrisé. En effet, seule une loi empirique permet de prédire l'amplitude du déplacement des crayons en fonction du taux de combustion et aucun modèle théorique ne sous-tend cette loi, vérifiée exclusivement avec des mesures sur des assemblages irradiés, dans des conditions éloignées de l'exploitation⁹. **Par conséquent, l'IRSN estime que la prise en compte de la pénalité de fléchissement dans la démonstration de sûreté doit faire l'objet d'une grande prudence afin de garantir le conservatisme de l'évaluation de la**

⁴ Oxyde mixte de plutonium et d'uranium.

⁵ Oxyde d'uranium.

⁶ Il n'y a pas de mesures effectuées pour des taux d'irradiation représentatifs du premier cycle.

⁷ La méthode de Monte-Carlo consiste à simuler le transport des neutrons ainsi que les phénomènes d'interaction entre les neutrons et la matière via des lois de probabilité.

⁸ Il apparaît que l'impact sur la puissance linéique augmente avec le déplacement des crayons et donc avec l'irradiation.

⁹ Les mesures sont réalisées en dehors du cœur, à puissance nulle et à débit nul.

puissance linéique. Ainsi, une démarche déterministe consistant à un cumul arithmétique de la pénalité de fléchissement aux autres postes d'incertitudes et pénalités permettrait d'assurer ce conservatisme.

Pour ce qui concerne le cumul de la pénalité de fléchissement aux autres postes d'incertitudes et pénalités affectant la puissance linéique, EDF propose un cumul arithmétique d'une partie dite « systématique » de la pénalité de fléchissement et un cumul quadratique d'un partie dite « aléatoire » de la pénalité de fléchissement. **Cette proposition est conforme, dans le principe, à la position retenue par l'ASN dans le cadre du RP4 900 et rappelée supra. Toutefois, l'IRSN estime que l'état actuel des connaissances ne permet pas de justifier le bien-fondé de la valeur de la partie systématique de la pénalité de fléchissement.**

À cet égard, l'IRSN note qu'EDF prévoit d'appliquer une démarche purement déterministe (cumul arithmétique) pour les études de sûreté en support au RP4 900 pour la gestion de combustible GARANCE ainsi que pour le quatrième réexamen périodique du palier 1300 MWe, ce qui permet de lever la difficulté liée à la détermination de la partie « systématique ». En revanche, pour les autres gestions de combustible du palier 900 MWe (PARITÉ MOX et CYCLADES) à l'état RP4, EDF retient, pour les parties « systématique » et « aléatoire » de la pénalité de fléchissement, la même répartition que celle proposée dans le présent dossier.

Enfin, EDF prévoit plusieurs modalités de prise en compte de la pénalité de fléchissement dans la démonstration de sûreté. Une des modalités consiste à appliquer, à l'ensemble des crayons de combustible, la pénalité de fléchissement maximale, quels que soient leur taux d'irradiation et leur nature. Les autres modalités consistent à adapter cette pénalité en fonction de la nature du crayon et de son taux d'irradiation.

L'IRSN estime acceptables les modalités d'utilisation de la pénalité de fléchissement hormis pour ce qui concerne la prise en compte d'une dépendance au taux de combustion de la pénalité de fléchissement dans le domaine des faibles taux de combustion pour lequel peu de mesures sont disponibles. L'enrichissement de la base de données expérimentales permettrait de lever cette limitation.

5. CONCLUSION

À l'issue de son expertise des éléments présentés par EDF et notamment de l'examen de la base de données expérimentales sur laquelle repose la loi modélisant le déplacement des crayons en fonction du taux de combustion, l'IRSN estime acceptables les nouvelles valeurs de pénalité de fléchissement déterminées par EDF pour les assemblages de combustible chargés sur les réacteurs du parc en exploitation au-delà du premier cycle d'irradiation.

En effet, pour le premier cycle, bien que les crayons soient moins sensibles au phénomène de fléchissement, l'IRSN ne peut pas se prononcer sur le conservatisme des hypothèses retenues en l'absence de mesures. À cet égard, à date, l'IRSN n'est pas favorable à la prise en compte d'une dépendance au taux de combustion de la pénalité de fléchissement dans le domaine des faibles taux de combustion.

Enfin, le mode de cumul de la pénalité de fléchissement aux autres postes d'incertitudes et pénalités affectant la puissance linéique, proposé par l'exploitant, est conforme, dans le principe, à la position retenue par l'ASN dans le cadre du RP4 900.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté