



Fontenay-aux-Roses, le 17 juillet 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2023-00112

Objet : Réacteur EPR de Flamanville 3 – REX des fluctuations de flux neutronique

Réf. : [1] Saisine ASN – CODEP-DCN-2023-030760 du 27 juin 2023.
[2] Avis IRSN N° 2022-00154 du 21 juillet 2022.
[3] Lettre ASN – CODEP-DCN-2023-011122 du 7 mars 2023.
[4] Décision ASN N°2008-DC-0114 du 26 septembre 2008.

Conformément à la saisine de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) citée en référence [1], l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné, dans le cadre de la demande de mise en service (DMES) du réacteur EPR de la centrale nucléaire de Flamanville (EPR FA3), les éléments transmis par EDF relatifs aux fluctuations de flux neutronique (FFN) du cœur. Ces éléments visent à prendre en compte le retour d'expérience (REX) du fonctionnement des premiers EPR mis en service.

1. CONTEXTE

Le REX des premiers EPR mis en service a mis en évidence des fluctuations significatives des signaux mesurés par les chaînes neutroniques de niveau puissance¹ (CNP) et les collectrons², représentatives de fluctuations de flux neutronique (FFN). Les caractéristiques de ces fluctuations s'écartent de celles observées sur les réacteurs français du parc en exploitation, tant par leur amplitude que par leur évolution temporelle en cours de cycle. Les FFN détectées par l'instrumentation nucléaire ont pour origine des fluctuations de débit en entrée du cœur, localisées principalement en périphérie, liées aux caractéristiques des écoulements hydrauliques dans le plenum inférieur de la cuve (*cf. avis de l'IRSN en référence [2]*).

Afin d'évaluer les conséquences des FFN sur les études d'accidents ainsi que sur le dimensionnement des seuils de surveillance et de protection du cœur, EDF a développé une démarche d'analyse s'appuyant sur un modèle de simulation de l'impact des FFN sur les puissances des assemblages et sur les signaux de l'instrumentation nucléaire. Bien que ce modèle permette de reproduire qualitativement les principales observations sur les

¹ Les chaînes neutroniques de niveau puissance constituent une instrumentation neutronique positionnée en périphérie de la cuve. Elles permettent de suivre le flux neutronique intervenant dans la surveillance et la protection du réacteur.

² Les collectrons constituent une instrumentation neutronique interne fixe dans le cœur. Ces collectrons sont insérés dans des cannes réparties dans le cœur de manière homogène. Ils permettent également de suivre le flux neutronique intervenant dans la surveillance et la protection du réacteur.

signaux de l'instrumentation, celui-ci n'a pas fait l'objet d'une validation au sens de l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base (en particulier son article 3.8). Dans son avis en référence [2], l'IRSN a estimé que l'utilisation, dans la démonstration de sûreté, de données dont EDF ne peut justifier ni le conservatisme ni l'impact sur les différentes analyses de sûreté n'est pas satisfaisante. Dans ce contexte, l'ASN a demandé [3] (demande D2) à EDF d'étudier la faisabilité de :

- vérifier expérimentalement, à partir de critères d'essais à intégrer au chapitre X³ des règles générales d'exploitation (RGE⁴), les caractéristiques des FFN (amplitudes et caractéristiques spatio-temporelles) prises en compte dans les analyses de sûreté susmentionnées ;
- définir une conduite à tenir en cas de non-respect de ces critères ;
- définir et justifier l'introduction d'un conservatisme supplémentaire dans le système de protection du cœur pour le cas où cette vérification ne pourrait être menée pour une ou plusieurs caractéristiques des FFN.

Par la saisine en référence [1], l'ASN souhaite en particulier recueillir l'avis de l'IRSN concernant la réponse apportée par EDF à cette demande. L'avis de l'IRSN est présenté ci-après.

2. VERIFICATIONS DES AMPLITUDES DES FFN

Les amplitudes des FFN prises en compte dans les analyses de sûreté réalisées par EDF sont caractérisées par des écarts-types, liés aux amplitudes maximales de ces fluctuations.

Les analyses menées par EDF montrent que les études de sûreté valorisant les chaînes de protection du cœur utilisant les signaux CNP ne sont pas sensibles ou pas affectées défavorablement par les FFN. Ainsi, EDF ne prévoit pas de vérification supplémentaire associée aux CNP. L'IRSN estime acceptable la position d'EDF.

En revanche, EDF prévoit d'ajouter dans le chapitre X des RGE des critères S⁵ afin de vérifier le conservatisme des écarts-types des signaux des collectrons pris en compte dans les analyses de sûreté. Ces vérifications seront menées :

- au palier « nominal » à l'issue de la première montée en puissance après le (re)chargement des assemblages de combustible, puis en cours de cycle tous les 30 JEPP⁶ ;
- à partir de signaux collectrons non-filtrés afin d'avoir une mesure au plus proche de la réalité physique.

L'IRSN estime que les critères ajoutés dans le chapitre X des RGE à puissance nominale sont cohérents avec l'objectif susmentionné.

EDF n'a pas prévu de vérification à puissance intermédiaire. En effet, les fluctuations de débit en entrée du cœur, à l'origine des FFN, ne dépendent pas du niveau de puissance et la dépendance des FFN au niveau de puissance

³ Le chapitre X des RGE prescrit les essais physiques de redémarrage à puissance nulle et en puissance après rechargement (REPR) qui seront mis en œuvre à chaque rechargement du combustible à partir du deuxième cycle. Pendant la phase comprise entre le premier chargement du combustible et la mise en service industrielle de l'installation, c'est le programme de principe d'essais du cœur (PPE COR) qui prescrit les essais physiques à réaliser. Le chapitre X prescrit également les essais physiques à réaliser en cours de cycle (REPC) dès le premier cycle, après la mise en service industrielle.

⁴ Les règles générales d'exploitation (RGE) d'une installation nucléaire de base (INB), prévues à l'alinéa II de l'article 20 du décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007, définissent l'ensemble des dispositions techniques et organisationnelles d'exploitation permettant d'assurer la protection des intérêts visés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement. Elles permettent de maintenir l'installation dans un domaine de fonctionnement couvert par la démonstration de sûreté présentée dans le rapport de sûreté (RDS).

⁵ D'après la doctrine de conception du chapitre X des RGE de l'EPR FA3, les critères S sont associés à des limites ou à des hypothèses d'études du rapport de sûreté concernant les paramètres physiques du cœur représentatifs des fonctions fondamentales de sûreté « maîtrise de la réactivité » et « confinement des substances radioactives ».

⁶ Jour équivalent pleine puissance : 1 JEPP représente l'énergie produite par un réacteur fonctionnant à pleine puissance pendant 24 heures.

est d'ores et déjà prise en compte dans les critères du chapitre X élaborés en tenant compte d'un paramètre qui dépend du niveau de puissance. L'IRSN estime acceptable la position d'EDF de vérifier l'amplitude des FFN uniquement à puissance nominale.

L'IRSN a, par ailleurs, constaté qu'EDF n'a pas prévu de vérification des caractéristiques des FFN en configuration d'alimentation dissymétrique du cœur (en débit ou en température)⁷. À cet égard, EDF explique qu'aucun essai prévu lors du démarrage n'est réalisé en situations dissymétriques suffisamment stables pour permettre cette vérification. Ainsi, à l'issue de l'expertise, EDF a prévu de mettre en œuvre des modifications du système de protection afin d'anticiper l'intervention de l'arrêt automatique du réacteur (AAR) en cas de très bas débit dans une boucle du circuit primaire : ces modifications permettront de réduire très rapidement la puissance neutronique du réacteur en situation éventuelle d'alimentation dissymétrique en débit de la cuve. Cet AAR anticipé limiterait notablement les conséquences de ce transitoire sur la puissance locale et le rapport de flux thermique critique⁸, même en présence de FFN. Compte tenu de ces modifications, l'IRSN estime acceptable l'absence de vérification des caractéristiques des FFN en configuration de dissymétrie en débit. Concernant l'effet sur les caractéristiques des FFN d'une dissymétrie en température, et compte tenu de la complexité des phénomènes physiques à l'origine des FFN, l'IRSN estime nécessaire qu'une étude de sensibilité des caractéristiques des FFN à une dissymétrie de température en entrée du cœur représentative des accidents de refroidissement soit menée afin de justifier l'absence de vérifications expérimentales dans ces situations. À l'issue de l'expertise, EDF s'est engagée à réaliser cette étude (cf. Annexe), ce qui est satisfaisant.

La conception des critères S est encadrée par la prescription de l'ASN INB167-14 en référence [4] qui stipule que « pour tout contrôle, essai ou épreuve destiné à vérifier le respect d'une hypothèse utilisée dans la démonstration de sûreté, un critère sanctionnant le contrôle, l'essai ou l'épreuve est préalablement spécifié par écrit [...] L'incertitude de mesure est ajoutée à la mesure avant de vérifier le respect du critère ». EDF prévoit de déroger⁹ à cette prescription étant donné la spécificité de l'écart-type des signaux des collectrons qui intègre des fluctuations d'origines diverses, y compris celles liées aux FFN. EDF considère que l'écart-type qui sera mesuré pour chaque collectron, représentatif de l'ensemble des sources de fluctuations du signal, sera un majorant de l'écart-type relatif uniquement aux FFN et qu'il n'est donc pas nécessaire de considérer une incertitude de mesure pour élaborer les critères S du chapitre X des RGE relatifs aux FFN. Compte tenu de la justification apportée par EDF, l'IRSN estime acceptable cette dérogation à la prescription de l'ASN.

L'IRSN conclut que les modifications du chapitre X des RGE prévues par EDF afin de vérifier le conservatisme des amplitudes des FFN considérées dans les analyses de sûreté sont acceptables et suffisantes.

Au cours de l'expertise, EDF a présenté les principes de la conduite à tenir en cas de non-respect des critères sur les écarts-types des signaux mesurés par les collectrons. Cette conduite consiste à interdire le suivi de charge et le réglage de fréquence, ces modes de fonctionnement ayant tendance à pénaliser la puissance locale et le rapport de flux thermique critique au sein du cœur. En fonction de l'amplitude du dépassement des critères, EDF prévoit également, si nécessaire, de pénaliser les seuils de surveillance et de protection du cœur. **L'IRSN estime ces conduites à tenir satisfaisantes sur le principe.**

En complément, EDF a indiqué que les évolutions des écarts-types des signaux mesurés par les collectrons seront analysées afin d'anticiper au cours de la première montée en puissance après (re)chargement et en cours de

⁷ Les accidents de perte de débit ou de refroidissement postulés dans la démonstration de sûreté conduisent à des modifications des caractéristiques thermohydrauliques au fond de la cuve qu'il est *a priori* nécessaire de considérer.

⁸ Le rapport de flux thermique critique correspond au rapport entre le flux thermique critique, c'est-à-dire le flux thermique qui conduirait à l'apparition de la crise d'ébullition, et le flux thermique local. La crise d'ébullition se caractérise par la formation d'un film de vapeur sur les parois des crayons de combustible qui dégrade l'échange de chaleur entre la gaine des crayons et le caloporteur, conduisant à un échauffement excessif du combustible et à une dégradation de la gaine (première barrière de confinement).

⁹ D'autres critères du chapitre X des RGE dérogent également à cette prescription. Le cas échéant, ces dérogations ont fait l'objet de justifications transmises par EDF.

cycle les risques de dépassements des critères. EDF prévoit de transmettre ces informations à l'ASN et l'IRSN à la fin de la première montée en puissance après la réalisation de la carte de flux prescrite à 80 %Pn et à l'issue des essais physiques réalisés tous les 30 JEPP en cours de cycle.

L'IRSN estime satisfaisante la démarche d'EDF consistant à mener des analyses de tendances afin d'anticiper les éventuels dépassements des critères du chapitre X des RGE.

3. VERIFICATIONS DES CARACTERISTIQUES SPATIO-TEMPORELLES DES FFN

Les FFN prises en compte dans les analyses de sûreté sont modélisées notamment grâce à des matrices et des fonctions mathématiques, respectivement en lien avec les caractéristiques spatiales et temporelles de ces fluctuations :

- les fonctions temporelles fournissent les coefficients de corrélation d'un signal à un instant donné avec lui-même décalé d'un certain intervalle de temps. En d'autres termes, ces fonctions caractérisent la ressemblance d'une séquence du signal avec celles qui ont eu lieu précédemment ;
- les matrices de corrélations spatiales définissent les corrélations entre les différents signaux et permettent de représenter leurs dépendances spatiales¹⁰.

L'IRSN considère qu'il est nécessaire de justifier le conservatisme des caractéristiques spatiales et temporelles de la modélisation des FFN en amont du démarrage de l'EPR FA3.

Afin d'atteindre cet objectif, EDF a récemment mené des études de sensibilité des résultats des analyses de sûreté au choix de ces fonctions et de ces matrices. Selon EDF, les résultats obtenus permettent de démontrer la possibilité de définir une seule fonction et une seule matrice enveloppes, systématiquement pénalisantes notamment vis-à-vis des seuils de protection du cœur. **L'IRSN partage la position d'EDF mais souligne que l'étude de sensibilité en configuration dissymétrique de température en entrée du cœur, faisant l'objet de l'engagement en annexe, devra permettre de consolider ces résultats.**

En l'état, l'IRSN constate que certaines analyses de sûreté ne tiennent pas encore compte de la fonction temporelle et de la matrice spatiale enveloppes évoquées précédemment. EDF indique que l'ensemble des analyses de sûreté seront mises à jour en tenant compte de ces nouvelles hypothèses. **L'IRSN estime cet engagement satisfaisant tout en rappelant que ces analyses devront être finalisées en amont du démarrage de l'EPR FA3.**

En complément, EDF prévoit de vérifier qualitativement le caractère enveloppe de la fonction temporelle mathématique à partir du REX des signaux collectrons obtenu au cours de la première montée en puissance après (re)chargement et tous les 30 JEPP en cours de cycle. Les résultats de ces vérifications seront transmis à l'ASN et à l'IRSN. **L'IRSN estime satisfaisante la diversité des analyses prévues pour atteindre cet objectif.**

En ce qui concerne la matrice spatiale, EDF considère que celle-ci permet d'introduire une pénalisation importante dans les analyses de sûreté ce qui réduit le besoin de vérifier son conservatisme. EDF prévoit tout de même de vérifier que cette matrice est cohérente avec le REX des signaux. La conception de cette matrice s'appuie sur un formalisme mathématique simplifié consistant à évaluer les coefficients de corrélation entre les signaux des collectrons en fonction de la distance les séparant. Dans ces conditions, l'IRSN considère que la vérification qualitative prévue par EDF présente un intérêt pour la sûreté.

¹⁰ À titre d'exemple, une de ces matrices permet de représenter la corrélation axiale observée expérimentalement entre les signaux des collectrons appartenant à une même canne.

L'IRSN estime suffisantes les analyses qualitatives, prévues par EDF, des caractéristiques spatio-temporelles des FFN. Compte tenu de l'enjeu de sûreté associé à ces analyses, l'intérêt et la faisabilité de définir un ou plusieurs critères à vérifier au titre du chapitre X des RGE devront être réévalués à la fin du premier cycle de fonctionnement de l'EPR FA3.

Au cours de l'expertise, EDF a présenté les principes de la conduite à tenir en cas de comportement inattendu des caractéristiques spatio-temporelles des FFN. Ces principes sont similaires à ceux retenus en cas de non-respect des critères du chapitre X des RGE sur les amplitudes des FFN. **L'IRSN n'a pas de remarque à formuler sur ce point.**

4. CONCLUSIONS

L'expertise de l'IRSN a porté sur la réponse d'EDF à la demande formulée par l'ASN en référence [3] et relative à la vérification expérimentale des caractéristiques des FFN (amplitudes et caractéristiques spatio-temporelles).

L'IRSN estime acceptables les nouveaux critères du chapitre X des RGE relatifs à la vérification des amplitudes des FFN considérées dans les analyses de sûreté ainsi que la démarche d'EDF consistant à mener des analyses de tendances afin d'anticiper les éventuels dépassements de ces critères.

Par ailleurs, l'IRSN considère que les éléments techniques transmis par EDF permettent de justifier le conservatisme des caractéristiques spatio-temporelles des FFN retenues dans les analyses de sûreté. À ce titre, l'IRSN estime acceptable l'absence de vérification des caractéristiques des FFN en configuration de dissymétrie en débit du fait des modifications du système de protection apportées par EDF.

De même, l'IRSN estime acceptable sur le principe l'engagement d'EDF d'évaluer l'impact sur les caractéristiques des FFN d'une dissymétrie de température en entrée du cœur représentative des accidents de refroidissement du cœur postulés dans la démonstration de sûreté. Ces éléments devraient permettre de justifier également l'absence de vérifications des caractéristiques des FFN pour ces situations.

En revanche, l'IRSN estime que l'intérêt et la faisabilité de définir des critères pour vérifier le conservatisme des caractéristiques spatio-temporelles des FFN devront être réévalués à la lumière du REX acquis jusqu'à la fin du premier cycle de fonctionnement de l'EPR FA3.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Olivier DUBOIS

Directeur adjoint de l'expertise de sûreté

ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2023-00112 DU 17 JUILLET 2023

Engagement d'EDF

EDF s'engage à mener des simulations multiphysiques permettant de comparer les caractéristiques des FFN en situations symétrique et dissymétrique. La situation dissymétrique retenue est caractérisée par une température en branche froide diminuée de 5 °C sur une boucle. Cet écart de température est représentatif de l'écart maximal observé sur les accidents de refroidissement initiés en puissance.