



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

**IRSN**  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 21 juillet 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2022-00154

---

**Objet :** Flamanville 3 – Démonstration de sûreté et suffisance du programme d'essais physiques  
Retour d'expérience des premiers EPR mis en service

---

**Réf. :** [1] Saisine ASN – CODEP-DCN-2022-010164 du 18 mars 2022.  
[2] Décision ASN N° 2013-DC-0347 du 7 mai 2013.  
[3] Avis IRSN N° 2020-00167 du 28 octobre 2020.  
[4] Lettre ASN – CODEP-DCN-2021-028877 du 26 juillet 2021.

---

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 les éléments transmis par EDF dans le cadre de la demande de mise en service (DMES) du réacteur EPR de la centrale nucléaire de Flamanville (EPR FA3) portant sur le retour d'expérience (REX) de démarrage des premiers EPR mis en service.

### 1. CONTEXTE

La validation de la conception d'un réacteur EPR repose notamment sur la réalisation d'essais de démarrage. La prise en compte du REX international EPR pour le démarrage de l'EPR FA3 est encadrée par la prescription de l'ASN en référence [2]. Cette prescription demande à EDF de transmettre annuellement une synthèse du REX des essais de démarrage incluant les principaux écarts et les mesures déployées pour éviter qu'ils surviennent également lors du démarrage de l'EPR FA3. L'interprétation par EDF des essais physiques<sup>1</sup> lors des démarrages des premiers EPR est un élément important de réponse aux attendus définis par la prescription de l'ASN.

Le REX de démarrage des premiers EPR mis en service a mis en évidence des questions relatives au comportement physique du cœur. Leur traitement a conduit EDF à transmettre à l'ASN des dossiers spécifiques visant à compléter la réponse à la prescription susmentionnée.

Par la saisine en référence [1], l'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN concernant l'impact de ce REX sur :

- « la validité de la démonstration de sûreté générique, incluant les études de conception neutronique et thermohydraulique, les études d'accidents, les études de signature et le dimensionnement des pénalités et des seuils de surveillance et de protection ;

---

<sup>1</sup> Les essais physiques permettent de vérifier le bon comportement physique du cœur.

MEMBRE DE  
**ETSON**

- *l'exhaustivité des paramètres-clefs tels que définis dans le dossier général d'évaluation de la recharge (DGES) ainsi que leurs valeurs limites ;*
- *le caractère suffisant de la démonstration de sûreté durant la phase d'essais physiques de démarrage ;*
- *l'exhaustivité des essais réalisés en application du programme de principe d'essais COR (PPE COR) et du chapitre X<sup>2</sup> des règles générales d'exploitation (RGE<sup>3</sup>) afin de vérifier la conformité du cœur et conforter la validation des outils de calcul scientifique ».*

L'avis de l'IRSN en réponse à ces questions est présenté ci-dessous.

## 2. REX DES ESSAIS PHYSIQUES REALISES LORS DU DEMARRAGE DU PREMIER EPR

Le programme d'essais physiques de démarrage du premier EPR est similaire à celui de l'EPR FA3. Ces essais ont été interprétés avec les chaînes de calcul neutronique des cœurs d'EDF et de Framatome utilisées dans la démonstration de sûreté de l'EPR FA3. Lors de la première montée en puissance du premier cycle du premier EPR, des écarts entre les mesures et les calculs ont été observés sur la distribution radiale de puissance du cœur. Afin d'améliorer la précision des calculs supports de la démonstration de sûreté pour le premier cycle de l'EPR FA3, EDF a effectué certains ajustements des modèles physiques du cœur de ce réacteur. L'impact de ces ajustements sur les dossiers de validation des chaînes de calcul neutronique utilisées dans la démonstration de sûreté a fait l'objet de l'avis de l'IRSN en référence [3] et de la lettre de l'ASN en référence [4].

Afin d'évaluer l'impact de ces ajustements sur la démonstration de sûreté, EDF a retenu une démarche de type paramètres clés<sup>4</sup>, similaire à celle utilisée dans l'analyse d'exhaustivité du dossier générique d'évaluation de la sûreté (DGES). Cette démarche, appliquée uniquement au premier plan de chargement prévisionnel du cœur de l'EPR de FA3, consiste à identifier, pour l'ensemble des conditions de fonctionnement du rapport de sûreté (RDS), les paramètres relatifs à la neutronique du cœur ayant une influence sur les marges aux critères de sûreté et susceptibles d'être sensibles à la distribution de puissance radiale dans le cœur. Ces analyses ont permis d'une part de conforter ou de mettre à jour les conclusions de la démonstration de sûreté et d'autre part de modifier certaines valeurs de seuils des chaînes de surveillance et de protection du cœur. Ces analyses et ces modifications n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.

Ce REX a également conduit EDF à ajouter des essais physiques à réaliser au titre du PPE COR afin d'identifier au plus tôt d'éventuelles lacunes de la modélisation du cœur. Les essais complémentaires prévus par EDF consistent à mesurer l'efficacité neutronique individuelle de chacune des grappes dans le cœur. L'IRSN estime acceptables les modifications du PPE COR.

Toutefois, l'IRSN estime que, en l'état des connaissances, des difficultés de modélisation de la distribution radiale de puissance de l'EPR FA3 pour les cycles ultérieurs au premier cycle ne peuvent pas être exclues. Le REX des

<sup>2</sup> Le chapitre X des règles générales d'exploitation (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.

<sup>3</sup> 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).

<sup>4</sup> La démarche « paramètres clés » repose sur la vérification du respect, pour certains paramètres neutroniques dits paramètres clés, de valeurs limites issues des études génériques. Cette vérification permet de s'assurer que les conclusions des études génériques sont bien applicables.

essais physiques de redémarrage du premier EPR montre que les mesures réalisées à puissance nulle avec le système AMS<sup>5</sup> peuvent être interprétées et valorisées afin d'établir une cartographie de la distribution de puissance. À l'issue de l'expertise, EDF s'est engagé (voir annexe 3, engagement n°1) à intégrer la réalisation d'un essai de carte de flux au titre de la REPR à puissance nulle. L'IRSN estime acceptable cet engagement.

À l'issue de l'expertise qu'il a réalisée, l'IRSN conclut qu'EDF a tenu compte de l'impact du REX des essais physiques des premiers EPR sur la démonstration de sûreté et les programmes d'essais physiques de l'EPR FA3.

### 3. REX DES FLUCTUATIONS DE FLUX NEUTRONIQUE (FFN)

Le REX des premiers EPR mis en service a mis en évidence des fluctuations importantes des signaux mesurés par les chaînes neutroniques de niveau puissance<sup>6</sup> et les collectrons<sup>7</sup>, représentatives de fluctuations de flux neutronique (FFN), observées tout au long des cycles. Les caractéristiques de ces fluctuations s'écartent de celles observées sur les réacteurs du parc en exploitation, tant du point de vue de leur amplitude que de leur évolution en cours de cycle. Ce phénomène est connu à l'international sur les réacteurs de type KONVOI<sup>8</sup> dont la conception du fond de cuve est similaire à celle des réacteurs de type EPR (absence de plaques entretoises et de colonnes de maintien pour l'instrumentation du cœur).

Les premières analyses d'EDF ont montré que les FFN ont pour origine les fluctuations de débit en entrée du cœur. En effet, ces fluctuations conduisent à :

- des oscillations latérales des assemblages de combustible et à des variations des jeux entre ces assemblages (lames d'eau) ;
- des fluctuations de température de l'eau.

Dans un réacteur à eau, l'eau joue également le rôle de « modérateur », c'est-à-dire qu'elle ralentit les neutrons produits par les fissions d'atomes d'uranium, jusqu'à un niveau d'énergie où ils sont les plus susceptibles de provoquer de nouvelles fissions d'uranium. Par cet effet neutronique, les fluctuations de débit en entrée du cœur induisent *in fine* des FFN.

Ces fluctuations de débit avaient été observées lors des essais de qualification du fond de cuve réalisés sur une installation expérimentale. Toutefois, les conséquences de ces fluctuations sur les assemblages de combustible et le flux neutronique n'avaient pas été anticipées.

Afin de consolider ces premières analyses, EDF a récemment développé une « chaîne de calcul FFN » permettant de simuler, pour le réacteur EPR FA3, les différents phénomènes thermohydrauliques, mécaniques et neutroniques à l'origine des FFN. Les analyses menées par EDF montrent que les fluctuations de débit en entrée du cœur sont liées aux caractéristiques des écoulements hydrauliques dans le plenum inférieur de la cuve, en particulier dans la zone de recirculation (voir figure ci-après) qui se crée entre la paroi du fond de cuve et le dispositif de répartition du débit en entrée du cœur (Flow Distribution Device ou FDD).

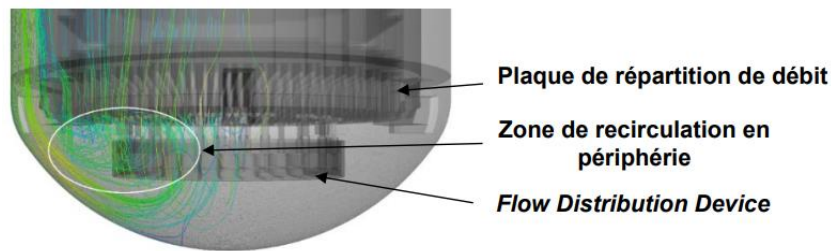
---

<sup>5</sup> Le système de mesure AMS (aeroball measurement system) constitue une instrumentation interne mobile. Il est composé de trains de billes d'acier permettant de reconstruire la distribution de puissance dans le cœur en irradiant temporairement les billes dans le cœur et en mesurant les radiations qu'elles émettent ensuite.

<sup>6</sup> Les chaînes neutroniques de niveau puissance constituent une instrumentation positionnée en périphérie de la cuve. Ils permettent de suivre le flux neutronique intervenant dans la surveillance et la protection du réacteur.

<sup>7</sup> Les collectrons constituent une instrumentation interne fixe répartie dans le cœur de manière homogène. Ils permettent également de suivre le flux neutronique intervenant dans la surveillance et la protection du réacteur.

<sup>8</sup> Pour rappel, la conception des réacteurs de type EPR s'inspire à la fois de la conception des réacteurs allemands de type KONVOI et de la conception des réacteurs français du palier N4 (de puissance 1450 MWe).



À l'issue de l'expertise qu'il a menée, l'IRSN estime pertinente l'analyse des causes des FFN apportée par EDF et considère que « la chaîne de calcul FFN » permet de reproduire qualitativement les phénomènes physiques mis en jeu.

Ces analyses montrent que la liste des exigences fonctionnelles relatives à la conception thermohydraulique du cœur de l'EPR FA3 n'est pas exhaustive dans la mesure où celles-ci ne tiennent pas compte des fluctuations de débit. À cet égard, **l'IRSN estime que la conception thermohydraulique du cœur d'un réacteur devrait également spécifier des requis sur les fluctuations de débit en entrée du cœur. En tout état de cause, l'IRSN estime que la présence indésirable et non anticipée de FFN est la conséquence d'une anomalie de conception du plenum inférieur des cuves des réacteurs de type EPR.**

Les FFN peuvent entraîner une sollicitation accrue des grappes de contrôle, via la chaîne de régulation de la température moyenne du circuit primaire, et un risque de déclenchements intempestifs d'alarmes ou d'arrêts automatiques du réacteur. À défaut de pouvoir supprimer la cause des FFN à court terme, EDF a prévu des modifications du contrôle-commande pour l'EPR FA 3 afin de limiter les aléas d'exploitation susmentionnés. Ces modifications concernent la chaîne de surveillance du déséquilibre azimutal de puissance (écarts de puissance entre quadrants du cœur), la chaîne de régulation de la température moyenne du circuit primaire, les chaînes de protection « puissance nucléaire élevée » et « variation rapide du flux nucléaire ». L'IRSN estime ces modifications cohérentes avec l'objectif visé et n'a pas identifié d'éléments s'opposant à leur mise en œuvre.

Afin d'évaluer les conséquences sur la démonstration sûreté et 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 les signaux de l'instrumentation nucléaire. Il s'agit d'un modèle mathématique dont les paramètres sont recalés sur le REX des premiers EPR et sur les résultats de la « chaîne de calcul FFN ». Les analyses d'EDF le conduisent à pénaliser les seuils de surveillance et de protection du cœur pour prendre en compte l'impact des FFN, ce qui conduit à réduire les limites du domaine d'exploitation du réacteur. Cependant, la « chaîne de calcul FFN » 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). Ainsi, l'IRSN estime que l'utilisation, dans la démonstration de sûreté, de données dont EDF ne peut, à ce stade, justifier ni le conservatisme ni l'impact sur l'analyse de sûreté n'est pas satisfaisant.

Par ailleurs, l'IRSN note que les résultats de la « chaîne de calcul FFN » couvrent uniquement les conditions de fonctionnement normales et estime que les éléments apportés par EDF afin de justifier le conservatisme de ces résultats au regard des conditions de fonctionnement accidentelles faisant l'objet de la démonstration de sûreté apportée dans le RDS sont insuffisantes.

Enfin, l'IRSN souligne la complexité de la démarche d'analyse de l'impact des FFN sur la démonstration de sûreté.

Compte tenu de ce qui précède, l'IRSN conclut que les résultats de la démarche susmentionnée ne peuvent constituer une démonstration de sûreté pérenne acceptable. En revanche, compte tenu des pénalisations supplémentaires affectant les seuils de surveillance et de protection, l'IRSN estime que ces résultats constituent une analyse de sûreté intermédiaire apportant une justification de sûreté acceptable au vu du domaine de fonctionnement réduit et sous réserve que les caractéristiques des FFN considérées dans l'analyse d'EDF soient vérifiées expérimentalement. Ceci amène l'IRSN à formuler la recommandation en annexe 1.

L'IRSN rappelle également que, selon le REX du premier EPR mis en service, les oscillations latérales des assemblages sont aussi à l'origine de dégradations des grilles de maintien de certains assemblages de combustible situés en périphérie du cœur (au contact du réflecteur lourd). EDF n'est donc pas aujourd'hui en mesure de garantir la possibilité d'irradier pendant plus d'un cycle ces assemblages, ce qui conduirait *in fine* à augmenter la quantité de déchets résultant de l'exploitation du réacteur. L'existence d'un lien de cause à effet entre les FFN et le taux élevé de défaillances de collecteurs observé sur les premiers EPR mis en service n'est pas exclu non plus (ce taux élevé n'étant actuellement pas expliqué).

**Ainsi au-delà des compléments de démonstration apportés et des mesures compensatoires prévues, l'IRSN estime qu'EDF doit définir et mettre en œuvre, aussi rapidement que le permet son processus de qualification, une modification matérielle pérenne permettant d'optimiser l'hydraulique dans le plenum inférieur de la cuve, de limiter l'ampleur des fluctuations de débit en entrée du cœur et ainsi de résorber l'anomalie de conception du plenum inférieur et ses conséquences.**

## 4. REX DE L'INSTRUMENTATION NUCLEAIRE (HORS FFN)

Lors de première divergence du premier EPR mis en service, des pics inattendus des signaux des chaînes neutroniques de niveau source (CNS) ont été observés. EDF prévoit pour l'EPR FA3 de modifier l'algorithme de traitement de ces signaux. Les calculs réalisés par l'IRSN confirment que ces pics ne sont pas représentatifs d'évolutions du flux neutronique mais sont dus à l'algorithme de filtrage des mesures. L'IRSN estime donc satisfaisante la modification proposée par EDF qui devrait prévenir l'apparition de pics non physiques sans dégrader la surveillance du cœur de l'EPR FA3.

De plus, le REX du premier EPR mis en service a mis en évidence une dérive lente de la concentration en bore (CB) du circuit primaire reconstruite par l'algorithme du boremètre RCV<sup>9</sup> des chaînes de protection anti-dilution (PAD). EDF prévoit pour l'EPR FA3 de modifier cet algorithme afin d'améliorer sa précision. Par ailleurs, EDF a mis en place une méthode de validation de la précision numérique des algorithmes de calcul du système de protection, y compris pour celui permettant de calculer la CB du circuit primaire. La modification de l'algorithme est de nature à améliorer la précision du calcul de la CB. En revanche, les éléments de validation présentés par EDF ne couvrent pas l'intégralité de la plage de débit de charge du système RCV prévue à la conception. Sur ce point, EDF s'est engagé à ajouter, avant la mise en service de l'EPR FA3, une alarme permettant de surveiller le débit de la ligne de charge du système RCV (voir engagement n°2 en annexe 3). L'IRSN prend note de cet engagement, mais considère qu'ajouter une alarme pour pallier une lacune de précision numérique résultant de la conception de l'algorithme n'est pas satisfaisant, dans le principe. En cas d'évolution du système de protection de l'EPR, l'IRSN considère qu'EDF devrait résorber cette lacune et supprimer cette alarme.

Enfin, lors des essais de démarrage du premier EPR mis en service, il a été constaté un dépassement du critère sur la durée de transport des billes du système AMS entre le cœur et la table de mesure prescrit par le programme d'essais de démarrage du système d'instrumentation du cœur (RIC). EDF prévoit d'augmenter la quantité de lubrifiant (Molykote) et de remplacer de manière préventive les billes tous les deux ans. L'IRSN considère acceptables les éléments transmis par EDF et n'identifie pas d'élément susceptible de mettre en cause l'utilisation de la Molykote en tant que lubrifiant du système AMS. En revanche, EDF justifie la nouvelle stratégie de maintenance uniquement à partir du REX de quelques cycles d'un réacteur KONVOI. Ceci amène l'IRSN à formuler l'observation en annexe 2.

---

<sup>9</sup> La CB du circuit primaire est reconstruite par un algorithme à partir des mesures de la CB et du débit de la ligne de charge du système de contrôle volumétrique et chimique du circuit primaire (RCV). L'algorithme de reconstruction de la CB s'appuie sur l'équation de conservation de la masse (système différentiel du 1<sup>er</sup> ordre).

## 5. CONCLUSIONS

Concernant les écarts entre les mesures et les calculs observés sur la distribution radiale de puissance lors du premier cycle du premier EPR, l'IRSN estime satisfaisante la mise à jour des conclusions de la démonstration de sûreté, des valeurs des seuils des chaînes de surveillance et de protection du cœur ainsi que les modifications du PPE COR. De plus, l'IRSN estime acceptable l'engagement d'EDF consistant à ajouter un essai de carte de flux au titre de la REPR à puissance nulle.

Concernant les fluctuations importantes des signaux mesurés par les chaînes neutroniques de niveau puissance et les collectrons, l'IRSN estime qu'elles résultent d'une anomalie de conception du plenum inférieur des cuves des réacteurs de type EPR qui, *in fine*, réduit les performances du système de surveillance et de protection du cœur, peut conduire à des usures des grilles de maintien du combustible en périphérie du cœur, pourrait avoir un impact négatif sur la fiabilité des collectrons... Pour la résorber, EDF doit définir et mettre en œuvre, aussi rapidement que le permet son processus de qualification, une modification matérielle pérenne permettant d'optimiser l'hydraulique dans le plenum inférieur et de limiter l'ampleur des fluctuations de débit en entrée du cœur. Dans l'attente, l'IRSN estime acceptables les modifications du contrôle-commande pour limiter le risque de signaux intempestifs. De plus, la démarche pour évaluer l'impact de ces fluctuations sur la démonstration de sûreté, qui a conduit à des modifications significatives des seuils de surveillance et de protection limitant le domaine d'exploitation du réacteur, n'est acceptable selon l'IRSN que dans le cadre d'une analyse de sûreté intermédiaire et sous réserve de la vérification expérimentale des caractéristiques des fluctuations.

Concernant l'instrumentation nucléaire (hors FFN), l'IRSN estime satisfaisante la modification de l'algorithme de calcul des signaux CNS ainsi que la nouvelle stratégie de maintenance du système AMS proposée par EDF. La pertinence de cette stratégie pourrait être consolidée par le REX de l'EPR FA3. Pour ce qui concerne le boremètre RCV, l'IRSN prend note de l'engagement d'EDF d'ajouter une alarme pour prévenir le risque de perte de précision de l'algorithme de calcul de la CB du circuit primaire mais rappelle qu'une modification de l'algorithme, lorsqu'elle est possible, est préférable à l'ajout d'une alarme qui complexifie l'exploitation du réacteur.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Olivier DUBOIS

Directeur adjoint de l'expertise de sûreté

## ANNEXE 1 À L'AVIS IRSN N° 2022-00154 DU 21 JUILLET 2022

### Recommandation de l'IRSN

#### **Recommandation**

En préalable au démarrage de l'EPR FA3, l'IRSN recommande qu'EDF intègre dans les programmes d'essais physiques des critères permettant de vérifier :

- les écarts-types et les caractéristiques spatio-temporelles des fluctuations de flux neutronique qui constituent des hypothèses de l'analyse de leur impact sur la démonstration de sûreté. EDF devra définir une conduite à tenir en cas de non-respect de ces critères. Ces critères devront être vérifiés à partir des signaux de l'instrumentation nucléaire relevés lors des essais de cartes de flux, pour tous les cycles, ainsi que lors d'essais de perte d'un groupe motopompe primaire en début, en milieu et en fin du premier cycle ;
- le comportement linéaire des écarts-types des fluctuations de flux neutronique en fonction du coefficient de température du modérateur.

L'IRSN recommande également qu'EDF élabore et justifie la démarche d'exploitation des signaux de l'instrumentation nucléaire permettant de mener ces vérifications.

## **ANNEXE 2 À L'AVIS IRSN N° 2022-00154 DU 21 JUILLET 2022**

### **Observation de l'IRSN**

#### **Observation**

L'IRSN estime qu'EDF devrait réaliser une analyse détaillée des mesures des temps de transport des trains de billes AMS après chaque cycle de l'EPR FA3.



## **ANNEXE 3 À L'AVIS IRSN N° 2022-00154 DU 21 JUILLET 2022**

### **Engagements principaux d'EDF**

#### **Engagement n° 1**

EDF s'engage à intégrer dans la REPR à puissance nulle, à l'échéance DMES Autorisation Complétée, un essai de carte de flux qui fera l'objet d'une analyse qualitative sans critère associé.

#### **Engagement n° 2**

EDF s'engage à ajouter, avant la mise en service de l'EPR FA3, une alarme en cas de mesure de débit de la ligne de charge du système de contrôle volumétrique et chimique du circuit primaire inférieure à 10 kg/s.