



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

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

Fontenay-aux-Roses, le 13 octobre 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2023-00151

**Objet :** Réacteurs électronucléaires EDF – EPR – Corrosion du gainage en alliage M5 des assemblages de combustible

**Réf. :** [1] Lettre ASN CODEP-DCN-2023-040575 du 13 juillet 2023.  
[2] Avis IRSN 2021-00151 du 6 août 2021.  
[3] Avis IRSN 2023-00010 du 19 janvier 2023.

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 prise en compte par EDF du retour d'expérience (REX) relatif au phénomène de corrosion accélérée des gaines des crayons de combustible en alliage M5 en vue de la mise en service du réacteur EPR de Flamanville (EPR FA3).

### 1. CONTEXTE

La mise en service puis l'exploitation des premiers réacteurs EPR a été marquée par des anomalies relatives au comportement du combustible. En particulier, les inspections télévisuelles des assemblages de combustible, réalisées lors des opérations de déchargement du cœur, ont révélé, sur le premier EPR mis en service, un phénomène de corrosion accélérée et de desquamation de la couche de zircone formée à la surface externe de la gaine des crayons en alliage M5 au niveau de la partie supérieure des assemblages. Ce phénomène a également été observé depuis 2021 sur certains réacteurs des différents paliers du parc électronucléaire français et a fait l'objet de la déclaration d'un évènement significatif pour la sûreté à caractère générique.

Sur le premier EPR mis en service, les mesures d'épaisseurs de zircone réalisées par l'exploitant ont confirmé que les épaisseurs étaient supérieures à l'attendu, comme cela a été observé à l'issue du cycle 18 du réacteur N° 2 du centre nucléaire de production d'électricité (CNPE) de Chooz B [2].

Afin de pallier les défaillances du combustible constatées lors de l'exploitation des premiers EPR, EDF a prévu des évolutions de conception ou de fabrication des assemblages pour le premier cycle et les cycles ultérieurs de l'EPR FA3 ainsi que des optimisations des plans de chargement du cœur. Ces modifications ont fait l'objet d'une expertise de l'IRSN [3].

Par ailleurs, sur la base du REX récent relatif au phénomène de corrosion accélérée du gainage M5, EDF prévoit une nouvelle optimisation du plan de chargement des assemblages de combustible pour le premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3 afin de limiter l'ampleur du phénomène. EDF a également défini un programme de surveillance à l'issue du premier cycle d'irradiation, afin notamment de sélectionner les assemblages à recharger pour les cycles ultérieurs.

MEMBRE DE  
**ETSON**

Par la saisine en référence [1], dans le cadre de la mise en service de l'EPR FA3, l'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN sur les points suivants :

- la prise en compte du retour d'expérience (REX) par EDF ;
- le choix des assemblages et le plan de chargement pour le premier cycle d'irradiation ;
- les éléments de surveillance qui permettront de sélectionner les assemblages pour les cycles d'irradiation ultérieurs.

Les conclusions l'expertise menée par l'IRSN sur ces points sont présentées dans les paragraphes suivants.

## 2. PRISE EN COMPTE DU RETOUR D'EXPERIENCE PAR EDF

Le REX relatif au phénomène de corrosion accélérée du gainage M5 et au risque de desquamation repose sur des inspections télévisuelles et des mesures d'épaisseurs de zircone en face externe de la gaine. Ces examens ont été réalisés sur des assemblages de combustible irradiés dans des réacteurs français, des réacteurs de conception allemande ainsi qu'à l'issue de l'exploitation des premiers EPR. **EDF a considéré l'ensemble du REX disponible à date, ce que l'IRSN estime satisfaisant.**

L'analyse par EDF du REX, relatif à l'exploitation des premiers EPR, a permis d'identifier une nouvelle coulée<sup>1</sup> de matière M5 dite hypersensible<sup>2</sup>, qui est constitutive des gaines de certains assemblages livrés pour l'EPR FA3.

De plus, un lien entre le phénomène de corrosion accélérée du gainage M5 et la fluence neutronique<sup>3</sup> a été mis en évidence récemment. La fluence conduirait en début de vie à une modification de la microstructure du gainage M5, ce qui favoriserait sa résistance à la corrosion. Ainsi, à date, EDF attribue le phénomène de corrosion accélérée à :

- certaines coulées de matière M5 présentant des faibles teneurs en fer. À cet égard, l'augmentation de la teneur en fer dans la coulée permet de limiter la sensibilité de la gaine à la corrosion accélérée, ce qui constitue l'action préventive mise en œuvre par EDF pour le combustible chargé sur ses réacteurs ;
- l'occurrence d'un régime d'ébullition sous-nucléée<sup>4</sup> en réacteur favorisant l'apparition, dans le fluide primaire, d'un milieu oxydant en partie haute des assemblages ;
- une fluence neutronique associée à l'irradiation en réacteurs faible en début de vie.

EDF a comparé les sollicitations thermohydrauliques et thermiques sur les crayons de combustible, associées au fonctionnement des réacteurs, qu'ils soient exploités ou non par EDF. Ces comparaisons montrent que les conditions de fonctionnement de l'EPR FA3 au cours du premier cycle d'irradiation seront plus favorables que celles des premiers EPR mis en service.

De plus, l'analyse du REX relatif à l'exploitation des premiers EPR montre que les épaisseurs de zircone sont maximales pour des assemblages présentant un enrichissement élevé en uranium 235. À cet égard, le plan de chargement du premier cœur de l'EPR FA3 est constitué d'assemblages dont le combustible est moins enrichi que ceux des premiers EPR mis en service, ce qui serait favorable au regard du phénomène de corrosion.

**L'IRSN estime ces premiers éléments de comparaison rassurants dans la mesure où les sollicitations devraient être moindres pour le premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3.**

<sup>1</sup> Le mélange, par fusion, des matières premières constituant l'alliage M5 constitue une coulée. Chaque coulée présente une composition particulière conforme aux spécifications techniques de fabrication, au sein de laquelle des différences (teneur en fer par exemple) peuvent toutefois exister.

<sup>2</sup> Une coulée ayant présenté de la corrosion accélérée associée à de la desquamation de la gaine est dite hypersensible.

<sup>3</sup> La fluence représente l'intégrale du flux neutronique que subit la gaine sur la durée de l'irradiation.

<sup>4</sup> Formation localisée de petites bulles de vapeur à la paroi de la gaine alors que le fluide primaire reste en moyenne à une température inférieure à la température d'ébullition.

L'IRSN souligne toutefois que la compréhension fine du phénomène de corrosion accélérée du gainage M5 n'est pas acquise à ce stade. EDF poursuit à cet égard les investigations. Les éléments de compréhension feront l'objet d'une expertise de l'IRSN dans un cadre dédié.

Par ailleurs, le phénomène de corrosion accélérée du gainage M5 peut avoir plusieurs effets sur le plan de la sûreté :

- fragiliser la gaine et augmenter le risque de perte d'intégrité des crayons de combustible concernés lors de transitoires incidentels ou accidentels de la démonstration de sûreté ;
- conduire éventuellement à la desquamation de la couche de zircone, ce qui peut avoir un effet sur la résistance de la gaine, notamment en cas de transitoire accidentel d'éjection d'une grappe de commande (EDG).

EDF prévoit de réaliser, à échéance de novembre 2023, une évaluation des conséquences du phénomène de corrosion accélérée du gainage M5 dans les études de la démonstration de sûreté de l'EPR FA3, ce que l'IRSN estime nécessaire.

### 3. CHOIX DES ASSEMBLAGES ET DU PLAN DE CHARGEMENT POUR LE PREMIER CYCLE D'IRRADIATION DE L'EPR FA3

Le REX d'exploitation des premiers EPR a conduit EDF à approvisionner de nouveaux assemblages de combustible à conception renforcée pour les positions périphériques du cœur de l'EPR FA3. Ces assemblages ont été fabriqués en tenant compte du phénomène de corrosion accélérée du gainage M5. **Ils disposent ainsi de gaines en alliage M5 à forte teneur en fer, ce que l'IRSN estime satisfaisant.**

Toutefois, les assemblages chargés en positions non périphériques, fabriqués antérieurement à l'identification du phénomène de corrosion accélérée sur le parc électronucléaire français, contiennent des gaines en alliage M5 issues de coulées de matière à faible teneur en fer. Leur sensibilité au phénomène de corrosion accélérée doit donc être considérée pour définir le plan de chargement des assemblages pour le premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3, d'autant plus que la majorité de ces coulées ne dispose, à date, d'aucun REX.

Au cours de l'expertise, EDF a optimisé le plan de chargement des assemblages (type et position dans le cœur) afin, d'une part, de limiter le phénomène de corrosion accélérée du gainage M5 lors du premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3, et d'autre part d'anticiper le plan de chargement des cycles suivants<sup>5</sup>. Les optimisations, réalisées au regard de la teneur en fer des coulées, conservent la répartition et la position des assemblages dans le cœur par type d'enrichissement en uranium 235 et consistent à :

- exclure les assemblages présentant un nombre élevé de crayons issus de la coulée hypersensible identifiée, en particulier ceux avec le plus fort enrichissement en uranium 235. Ces assemblages seront remplacés par des assemblages d'enrichissement identique présentant des crayons issus de coulées de matière M5 de plus forte teneur en fer. Toutefois, quelques assemblages contenant un très faible nombre de crayons issus de la coulée hypersensible sont conservés dans la mesure où le REX montre des épaisseurs de zircone modérées pour ce type d'assemblage ;
- sélectionner, pour les autres assemblages, ceux comportant les coulées de plus forte teneur en fer disponibles, en particulier pour ceux présentant le plus fort enrichissement en uranium 235.

L'IRSN estime que le REX tendant à montrer que les épaisseurs de zircone sont modérées pour les assemblages présentant un faible nombre de crayons issus de coulées hypersensibles nécessite d'être confirmé. **À cet égard,**

---

<sup>5</sup> La majorité des assemblages irradiés au cours d'un cycle est utilisée pour le cycle suivant.

**l'IRSN note que des mesures d'épaisseurs de zircane seront réalisées par EDF pour ce type d'assemblage dans cadre du programme de surveillance (cf. §4).**

**Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, l'IRSN estime pertinentes les optimisations du plan de chargement du cœur prévues par EDF pour le premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3. Ces optimisations devraient permettre de limiter le phénomène de corrosion accélérée sans pour autant l'exclure.**

## **4. SURVEILLANCE DES ASSEMBLAGES**

À l'issue du premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3, EDF réalisera des inspections télévisuelles sur l'ensemble des assemblages de combustible déchargés pour les classer au regard de l'ampleur de l'éventuelle corrosion accélérée du gainage M5. Puis, des mesures d'épaisseurs de zircane seront effectuées dans l'objectif d'évaluer la possibilité de recharger ces assemblages pour les cycles d'irradiation ultérieurs. Ainsi, les assemblages qu'il serait envisagé d'irradier pendant un deuxième cycle et présentant de la corrosion accélérée feraient l'objet de mesures d'épaisseurs de zircane dès lors qu'ils présenteraient un nombre important de crayons issus de la coulée hypersensible identifiée ou d'une coulée non caractérisée.

De plus, au cours de l'expertise, EDF a précisé qu'au titre de la compréhension fine du phénomène, des mesures d'épaisseurs de zircane seront réalisées sur un assemblage, non rechargé pour le deuxième cycle d'irradiation, présentant un faible nombre de crayons issus de la coulée hypersensible identifiée. Ces mesures ont pour objectif de confirmer le constat d'épaisseurs de zircane modérées pour ce type d'assemblage (cf. §3).

L'IRSN estime acceptable sur le principe le programme de surveillance envisagé par EDF à l'issue du premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3.

Toutefois, l'IRSN estime qu'EDF pourrait compléter son programme de surveillance en prévoyant des mesures d'épaisseurs de zircane sur des crayons issus de la coulée caractérisée sur le parc électronucléaire français. En effet, ceci permettrait de vérifier la cohérence entre le REX issu du parc et celui de l'EPR FA3. De plus, ce programme pourrait être amendé en fonction de l'état des assemblages de combustible à l'issue de leur déchargement.

Par ailleurs, EDF s'est engagé, au cours de l'expertise, à mettre en œuvre son programme de surveillance en cas d'arrêt fortuit nécessitant le repli du réacteur et le déchargement du cœur, ce que l'IRSN estime satisfaisant.

## **5. CONCLUSION**

L'analyse menée par EDF du REX d'exploitation des premiers EPR mis en service, ainsi que l'identification d'une nouvelle coulée de matière M5 hypersensible au regard du phénomène de corrosion accélérée du gainage M5, a conduit EDF à se réinterroger sur le risque d'occurrence et, le cas échéant, l'ampleur de ce phénomène pour le premier cœur de l'EPR FA3 comportant des crayons issus de cette coulée.

EDF a pris en compte de manière satisfaisante le REX disponible, ce qui a permis la sélection des assemblages de combustible et des optimisations du plan de chargement du premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3. Ces optimisations associées aux conditions de fonctionnement de l'EPR FA3 *a priori* plus favorables devraient permettre de limiter l'ampleur du phénomène de corrosion accélérée du gainage M5 pendant le premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3.

De plus, le programme de surveillance prévu à l'issue du premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3 est acceptable sur le principe. Il devrait permettre de statuer sur la possibilité de recharger des assemblages pour les cycles d'irradiation ultérieurs et d'acquérir des données complémentaires dans la mesure où le REX ne permet pas, à date, une compréhension suffisante du phénomène. Ce programme pourrait être amendé à la lumière de l'état du combustible à l'issue du déchargement des assemblages.

Enfin, le phénomène de corrosion accélérée du gainage M5 ne pouvant être exclu à date, EDF prévoit de le prendre en compte dans les études de la démonstration de sûreté de l'EPR FA3 avant son démarrage, ce que l'IRSN estime nécessaire.

**IRSN**

Le Directeur général  
Par délégation  
Olivier DUBOIS  
Directeur adjoint de l'expertise de sûreté



Olivier DUBOIS  
2023.10.13 15:00:29  
+02'00'