

Fontenay-aux-Roses, le 19 janvier 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2023-00010

Objet : Expertise du dossier de prise en compte du retour d'expérience des premiers EPR relatif au combustible pour la mise en service du réacteur EPR de Flamanville 3

Réf. : Courrier ASN - CODEP-DCN-2022-059586 du 14 décembre 2022.

Conformément à la saisine de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en référence, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné les éléments transmis par EDF, dans le cadre de la mise en service du réacteur EPR de Flamanville (EPR FA3), portant sur la prise en compte du retour d'expérience (REX) de l'exploitation du combustible dans les premiers réacteurs EPR mis en service.

1. CONTEXTE

La mise en service puis l'exploitation des premiers réacteurs de type EPR a été marquée par des anomalies relatives au combustible. Au cours du deuxième cycle d'irradiation du premier réacteur EPR mis en service, l'augmentation anormale de l'activité en gaz rares du circuit primaire a contraint l'exploitant à procéder à l'arrêt du réacteur fin juillet 2021. Les inspections des assemblages de combustible lors des opérations de déchargement ont mis en évidence un nombre important d'assemblages concernés par des pertes d'étanchéité de crayons ainsi que la présence de plusieurs morceaux de ressorts de grilles d'assemblages de combustible dans la cuve. De plus, ces inspections ont révélé une usure prononcée des plaquettes de certaines grilles sur un nombre limité d'assemblages de combustible en périphérie du cœur, une usure des bouchons inférieurs des crayons de combustible et un phénomène de corrosion accélérée et de desquamation¹ de l'oxyde en surface externe des gaines en alliage M5 (de conception Framatome) des crayons au niveau de la partie supérieure des assemblages. S'appuyant sur les résultats des examens réalisés sur le combustible par l'exploitant, EDF a transmis à l'ASN un dossier portant sur l'analyse de ce REX et sur les enseignements tirés pour la mise en service de l'EPR FA3 et les cycles d'irradiation ultérieurs.

La stratégie d'EDF de prise en compte de ce REX repose sur l'analyse des causes de chaque anomalie et sur des évolutions de conception des assemblages de combustible du fournisseur Framatome, aussi bien pour le premier

¹ La desquamation correspond à la perte localisée d'une partie de la couche d'oxyde se formant à la surface de la gaine des crayons de combustible au cours de l'irradiation. Ce phénomène est de nature à fragiliser la gaine et à augmenter le risque de perte d'intégrité des crayons concernés lors de certains transitoires accidentels.

cycle d'irradiation (avec le déploiement d'une conception améliorée dénommée AFA3GLE-I²) que pour les cycles ultérieurs (avec le déploiement d'une conception dotée d'améliorations supplémentaires dite AFA3GLE-H³).

Par la saisine en référence, l'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN sur les points suivants :

- « l'analyse des causes présentée par EDF, pour chaque anomalie observée ;
- la pertinence des modifications proposées sur la nouvelle conception d'assemblages de combustible retenue pour le premier cycle (AFA3GLE-I) et des options retenues pour définir une conception améliorée d'assemblages (AFA3GLE-H) qui sera déployée à partir du second cycle ;
- la pertinence de la stratégie globale proposée par EDF de chargement d'assemblages améliorés en périphérie de cœur au premier cycle ainsi que la stratégie retenue par EDF au deuxième cycle, conduisant notamment à ne pas recharger les 64 assemblages AFA3GLE-I pour le deuxième cycle d'irradiation et le cas échéant les propositions de l'exploitant pour les cycles suivants ;
- les objectifs du programme d'exams prévu par EDF sur le combustible à l'issue du premier cycle d'irradiation de Flamanville 3 ;
- la nécessité ou non de disposer de mesures de surveillance particulières ou de mesures compensatoires en exploitation ».

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

2. ANALYSE DES CAUSES DES ANOMALIES RENCONTREES

L'identification des causes des défaillances du combustible susmentionnées repose sur les résultats des examens réalisés, par l'exploitant des premiers réacteurs EPR, sur les assemblages de combustible et sur l'analyse des conditions de fonctionnement de ces réacteurs. Ces examens consistent en des inspections télévisuelles des assemblages et des crayons, des mesures de déformation latérale des assemblages, des mesures d'épaisseur d'oxyde à la surface des gaines et des examens endoscopiques. Afin de consolider son analyse, EDF a réalisé des simulations numériques (neutroniques, thermohydrauliques, et mécaniques) permettant, d'une part, d'expliquer les spécificités des premiers cycles d'irradiation des premiers réacteurs EPR en service et, d'autre part, d'identifier les paramètres influents au regard des anomalies rencontrées. **L'IRSN estime satisfaisante la démarche adoptée par EDF pour l'analyse des causes des anomalies observées à l'issue des premiers cycles d'irradiation des réacteurs EPR en service.**

Concernant l'usure anormale des plaquettes de grilles de certains assemblages de combustible, EDF a fourni des éléments qui montrent qu'elle résulte de frottements induits par les oscillations d'assemblages contre le réflecteur lourd entourant le cœur. Ces oscillations résultent de fluctuations de débit en entrée du cœur, qui sont la conséquence d'une anomalie de conception du plenum inférieur des cuves des réacteurs EPR. Les analyses menées par EDF laissent également penser que la diminution de la raideur latérale des assemblages et la déformation latérale des assemblages au cours de l'irradiation ont un impact significatif sur l'ampleur des usures des plaquettes de grilles. **L'IRSN estime que les éléments d'analyse fournis par EDF permettent d'expliquer l'origine de l'usure des plaquettes des grilles d'assemblages localisés en périphérie du cœur des premiers réacteurs EPR en service.**

Les examens réalisés sur le combustible par l'exploitant des premiers réacteurs EPR en service ont montré que tous les assemblages concernés par des pertes d'étanchéité des crayons étaient situés au niveau de la couronne périphérique du cœur, en contact avec le réflecteur lourd. Sur la base de ces examens et des données issues du

² Pour le premier cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3, 64 assemblages AFA3GLE-I seront positionnés en périphérie de cœur en remplacement des assemblages de conception AFA3GLE initialement prévus.

³ L'introduction des assemblages AFA3GLE-H se fera de manière progressive à partir du deuxième cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3.

REX d'exploitation des réacteurs du parc nucléaire français, EDF a conclu que les pertes d'étanchéité sont dues à une usure par vibration des crayons de combustible au niveau des ressorts de grille rompus par un phénomène de corrosion sous contrainte (CSC). De plus, EDF a pu corrélérer ce phénomène au faible niveau de fluence neutronique⁴ au niveau des grilles inférieures des assemblages positionnés en périphérie du cœur, qui ne suffit pas à relaxer efficacement les contraintes dans les ressorts de grilles. Par ailleurs, l'IRSN convient avec EDF que les sollicitations hydrauliques en partie basse des assemblages favorisent la perte d'étanchéité des crayons. **Finalement, l'IRSN estime satisfaisantes les investigations menées par EDF, sur la base des observations transmises par l'exploitant, afin d'identifier les causes des pertes d'étanchéité des crayons de combustible des premiers réacteurs EPR en service.**

En outre, les inspections télévisuelles sur les assemblages de combustible ont mis en évidence une usure des bouchons inférieurs des crayons. Elle se produit lorsque le contact entre les bouchons inférieurs des crayons et l'embout inférieur de l'assemblage⁵ est établi. Sur la base des investigations menées, EDF a conclu que l'ampleur de l'usure des bouchons des crayons dépend fortement de la dégradation du maintien des crayons dans la double grille d'extrémité inférieure de l'assemblage, résultant de la rupture des ressorts de grilles par la CSC, et de la nature du contact entre les bouchons et l'embout inférieur des assemblages. Au vu de l'ampleur limitée de l'usure des bouchons des crayons et des éléments de justification présentés, EDF considère négligeable le risque de perte d'étanchéité des crayons induite par cette usure. **L'IRSN estime satisfaisantes les analyses menées par EDF afin d'identifier les causes des usures observées.**

Enfin, le phénomène de corrosion accélérée et de desquamation des gaines des crayons en alliage M5, observé récemment sur certains réacteurs des différents paliers du parc nucléaire français, a également été constaté en partie haute des assemblages à l'issue du deuxième cycle des premiers réacteurs EPR en service. EDF attribue ce phénomène à la fabrication des gaines incriminées (leur faible teneur en fer) et à l'occurrence d'un régime d'ébullition nucléée⁶ favorisant l'apparition d'un milieu oxydant en partie haute des assemblages. L'IRSN souligne qu'EDF poursuit actuellement les investigations afin de mieux appréhender les causes de ce phénomène. Ces éléments de compréhension, dont certains ne sont pas disponibles à ce jour, feront l'objet d'une expertise de l'IRSN dans un cadre dédié.

3. PRISE EN COMPTE DU REX POUR L'EPR DE FLAMANVILLE 3

Afin de pallier les défaillances du combustible constatées lors de l'exploitation des premiers réacteurs EPR, EDF prévoit pour le réacteur EPR FA3 des évolutions de conception ou de fabrication des assemblages de combustible pour le premier cycle d'irradiation et pour les cycles ultérieurs. EDF prévoit également des optimisations des plans de chargement du cœur prenant en compte ces évolutions de conception ainsi qu'un programme d'inspection afin de vérifier l'état du combustible à l'issue du premier cycle d'irradiation.

Stratégie d'EDF pour le premier cycle d'irradiation

La solution retenue par EDF vis-à-vis des risques de pertes d'étanchéité consiste à limiter le risque de rupture des ressorts de grilles des assemblages fournis par Framatome grâce à une désensibilisation du matériau à la CSC lors de leur fabrication. Ainsi, les 64 assemblages en périphérie du cœur du réacteur EPR FA3 seront dotés de ressorts de grilles bénéficiant du traitement thermique de recuit final à basse température (RFBT). Ce traitement est déjà mis en œuvre pour la fabrication des assemblages du parc nucléaire français depuis 2019 et a contribué à réduire significativement le nombre de ruptures de ressorts de grilles ainsi que le nombre d'assemblages non

⁴ La fluence neutronique représente l'intégrale du flux sur la durée de l'irradiation.

⁵ Le contact entre les bouchons inférieurs des crayons et l'embout inférieur de l'assemblage de combustible est un phénomène connu qui se produit au cours de l'irradiation à cause du grandissement différentiel entre les crayons et la structure de l'assemblage.

⁶ Formation localisée de petites bulles de vapeur à la paroi du combustible alors que le fluide reste en moyenne à une température inférieure à la température d'ébullition.

étanches associés. **En conséquence, l'IRSN estime pertinente la mise en œuvre du traitement RFBT pour limiter le risque de rupture des ressorts de grilles par la CSC.**

Concernant les assemblages qui seront positionnés hors de la périphérie du cœur de l'EPR FA3 dont les ressorts de grilles n'ont bénéficié que d'un traitement thermique standard, EDF a justifié que le risque de rupture des ressorts est faible compte tenu notamment du REX d'exploitation des premiers EPR mis en service, **ce que l'IRSN estime acceptable. L'IRSN estime toutefois que ce risque ne peut pas être totalement exclu à ce stade.**

En tout état de cause, les spécifications radiochimiques prévues en exploitation définissent les dispositions de surveillance de la radioactivité du circuit primaire et la conduite à tenir en cas d'anomalie. **L'IRSN n'identifie pas de mesure supplémentaire nécessaire par rapport à celles prévues par EDF mais rappelle l'importance de la surveillance et du respect des limites prévues par les spécifications techniques d'exploitation.**

Concernant l'anomalie relative à l'usure des plaquettes de grilles, la stratégie d'EDF consiste à remplacer l'alliage M5 par l'alliage quaternaire Q12 pour la fabrication des tubes-guides et des grilles de la nouvelle conception d'assemblage AFA3GLE-I. L'alliage Q12 confère une meilleure résistance mécanique de la structure de l'assemblage, et *in fine* limite leur déformation latérale. Le REX d'exploitation du parc nucléaire français a montré que les assemblages à structure renforcée, dotés de tubes-guides en alliage Q12 et déployés depuis 2013, sont plus performants vis-à-vis de la déformation latérale que les assemblages à structure en alliage M5. **L'IRSN estime que l'utilisation d'assemblages renforcés en périphérie du cœur est de nature à limiter le risque d'usure excessive des plaquettes de grilles d'assemblage lors du premier cycle d'irradiation de l'EPR FA3.**

Concernant l'anomalie relative à l'usure des bouchons inférieurs des crayons, aucune évolution de conception n'est prévue par EDF pour le premier cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3. **Néanmoins, l'IRSN estime que le risque de perte d'intégrité des crayons de combustible lors du premier cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3 est très limité compte tenu du REX des premiers EPR en service.**

Concernant la corrosion accélérée des gaines en alliage M5 en partie haute de certains assemblages, l'IRSN note positivement que les assemblages AFA3GLE-I bénéficieront d'une augmentation de la teneur minimale en fer afin de réduire leur sensibilité à ce phénomène. De plus, les conditions de fonctionnement retenues pour le réacteur EPR FA3 sont plus favorables que celles des premiers réacteurs EPR en service et des mesures compensatoires en exploitation, déjà en vigueur sur parc nucléaire français, sont prévues par EDF. Par conséquent, l'IRSN estime que le phénomène de corrosion accélérée des gaines en alliage M5 devrait être limité et que le risque de desquamation en surface externe des gaines est négligeable à l'issue du premier cycle d'irradiation. **À cet égard, l'IRSN n'identifie pas de mesures compensatoires supplémentaires à mettre en œuvre au cours du premier cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3.**

De plus, les examens prévus lors du déchargement du combustible à l'issue du premier cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3 devraient permettre de caractériser le cas échéant l'occurrence et l'ampleur du phénomène de corrosion accélérée des gaines en alliage M5.

En conclusion, compte tenu de l'ensemble de ces éléments, l'IRSN estime pertinente la conception des nouveaux assemblages AFA3GLE-I qui seront positionnés en périphérie du premier cœur de l'EPR FA3.

Programme d'examens sur le combustible à l'issue du premier cycle d'irradiation

EDF prévoit un programme d'examens des assemblages de combustible, à l'issue du premier cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3. Ce programme est constitué notamment d'inspections télévisuelles, de mesures de déformation latérale des assemblages, d'examens des cellules de grilles et éventuellement de mesures d'épaisseur d'oxyde en surface des gaines de combustible. Ce programme est cohérent avec le REX des anomalies relatives au combustible des premiers EPR en service. **L'IRSN estime donc acceptable sur le principe le programme d'examens sur le combustible envisagé par EDF à l'issue du premier cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3.**

Toutefois, l'IRSN n'est pas en mesure de se positionner sur la suffisance de ce programme d'examens dans la mesure où il n'est pas totalement entériné à ce jour et dépendra des observations faites au déchargement du combustible à l'issue du premier cycle d'irradiation. **En particulier, dans la mesure où le risque de rupture de ressorts de grilles de certains assemblages situés hors de la couronne périphérie du cœur pour le premier cycle de l'EPR FA3 n'est pas exclu, l'IRSN souligne l'importance de réaliser des examens visuels visant à statuer sur l'état des ressorts de grilles de ces assemblages (ne bénéficiant pas du traitement RFBT) et, le cas échéant, à analyser la possibilité de les recharger pour les cycles ultérieurs au regard du risque de perte d'étanchéité des crayons de combustible.**

Options retenues pour les cycles ultérieurs d'irradiation

Les options retenues par EDF pour définir une conception améliorée d'assemblages de combustible plus robuste (AFA3GLE-H) et qui sera déployée à partir du deuxième cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3 consistent à conserver les améliorations intégrées à la conception AFA3GLE-I et à apporter les modifications supplémentaires suivantes :

- augmenter le nombre de points de soudure pour la liaison entre les tubes-guides et les grilles afin de rigidifier la structure de l'assemblage ;
- utiliser de nouvelles grilles d'extrémités avec une conception de ressort renforcée afin de supprimer le risque de perte d'étanchéité des crayons de combustible ;
- utiliser une nouvelle conception d'embout inférieur afin de limiter la sollicitation hydraulique en partie basse de l'assemblage aussi bien au regard du risque de perte d'étanchéité que d'usure des bouchons inférieurs des crayons.

L'IRSN estime positives sur le principe les options de conception de l'assemblage de combustible AFA3GLE-H qui sera déployé à partir du deuxième cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3. La justification de cette nouvelle conception sera expertisée le cas échéant dans un autre cadre.

Par ailleurs, à partir du deuxième cycle, EDF prévoit de prendre en compte l'orientation et l'amplitude des déformations latérales des assemblages irradiés au cycle précédent afin de définir le plan de chargement du cœur et d'utiliser des assemblages neufs sur les positions les plus exposées au risque d'usure des plaquettes de grilles, **ce que l'IRSN estime satisfaisant sur le principe.**

En conclusion, l'IRSN estime pertinente la stratégie prévue par EDF afin de prendre en compte, à partir du deuxième cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3, le REX d'exploitation des premiers réacteurs EPR en service.

4. CONCLUSION

L'analyse menée par EDF, reposant sur les résultats d'une large campagne d'examens réalisés sur les assemblages de combustible déchargés à l'issue de l'exploitation des premiers réacteurs EPR en service complétée par des simulations numériques complexes, a permis de comprendre les causes à l'origine des différentes défaillances du combustible. L'IRSN estime cette analyse satisfaisante.

L'analyse du REX de l'exploitation de ces réacteurs a conduit EDF à proposer des évolutions de conception ou de fabrication d'assemblage pour l'EPR FA3 dans le but de pallier les défaillances du combustible observées. L'IRSN estime pertinente sur le principe la mise en œuvre des assemblages de nouvelle conception (AFA3GLE-I) qui seront positionnés en périphérie du cœur du premier cycle du réacteur EPR FA3. De plus, l'IRSN estime acceptable sur le principe le programme d'examens sur le combustible envisagé par EDF à l'issue du premier cycle d'irradiation du réacteur EPR FA3. L'IRSN souligne que ce programme pourrait être amendé en fonction de l'état des assemblages de combustible à l'issue de leur déchargement.

De plus, l'IRSN estime positives les options retenues pour définir une nouvelle conception d'assemblage de combustible plus robuste (AFA3GLE-H) à mettre en œuvre à partir du deuxième cycle d'irradiation ainsi que la stratégie d'optimisation des plans de chargement du cœur prévue par EDF.

Par ailleurs, l'IRSN n'a pas identifié de mesures de surveillance particulières ou de mesures compensatoires à mettre en œuvre en exploitation en supplément de celles déjà prévues par les spécifications techniques d'exploitation et de celles proposées en complément par EDF pour limiter le risque de corrosion excessive des gaines en alliage M5.

En tout état de cause, certaines des défaillances du combustible observées en périphérie du cœur des premiers réacteurs EPR en service sont induites ou aggravées par les fluctuations de débits en entrée du cœur qui résultent d'une anomalie de conception du plenum inférieur de la cuve. EDF étudie actuellement la faisabilité d'une modification matérielle 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 cette anomalie de conception et ses conséquences. À cet égard, l'IRSN estime qu'EDF doit définir la modification matérielle et la mettre en œuvre sur le réacteur EPR FA3, aussi rapidement que le permet son processus d'étude et de qualification de la modification.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Olivier DUBOIS

Directeur adjoint de l'expertise de sûreté