

Fontenay-aux-Roses, le 13 mai 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2022-00105

**Objet :** Réacteurs électronucléaires EDF – Tous réacteurs – Corrosion du gainage en alliage M5 des assemblages de combustible – Modifications des mesures compensatoires

**Réf. :** [1] Lettre ASN CODEP-DCN-2022-008717 du 15 février 2022.  
[2] Avis IRSN 2021-00151 du 6 août 2021.  
[3] Avis IRSN 2021-00154 du 20 août 2021.  
[4] Lettre ASN CODEP-DCN- 2021-042479 du 7 septembre 2021.  
[5] Avis IRSN 2020-00081 du 27 mai 2020.

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 l'actualisation par EDF, au regard du retour d'expérience acquis, des mesures compensatoires appliquées aux réacteurs de 900 MWe et de 1300 MWe concernés par le phénomène de corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5.

### 1. CONTEXTE

En février 2021, lors du déchargement du combustible à l'issue du cycle 18 du réacteur n° 2 du Centre Nucléaire de Production d'Électricité (CNPE) de Chooz B (palier N4), EDF a observé une corrosion excessive sur un nombre important de crayons de combustible à gainage en alliage M5. Cette corrosion anormalement élevée, localisée en partie haute des assemblages de combustible, a conduit à une desquamation<sup>1</sup> de la couche de zircone formée en surface des gaines de combustible.

En avril 2021, un phénomène similaire de corrosion accélérée et de desquamation a été observé sur certains assemblages lors du déchargement du combustible à l'issue du cycle 17 du réacteur n° 2 du CNPE de Civaux (palier N4).

En mai 2021, ce même phénomène de corrosion, mais sans desquamation de la couche zircone, a été observé sur certains assemblages lors du déchargement du combustible à l'issue du cycle 22 du réacteur n° 3 du CNPE de Cattenom (palier 1300 MWe).

---

<sup>1</sup> La desquamation correspond à la perte localisée d'une partie de la couche d'oxyde se formant à la surface de la gaine de combustible au cours de l'irradiation.

Dans ce contexte, EDF a déclaré, en juillet 2021, un évènement significatif pour la sûreté (ESS) à caractère générique portant sur le réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B, le réacteur n° 2 du CNPE de Civaux et le réacteur n° 3 du CNPE de Cattenom.

Les analyses réalisées par EDF, tout d'abord sur le réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B, puis sur le réacteur n° 3 du CNPE de Cattenom, attribuent ce phénomène à une origine intrinsèque à la fabrication des gaines de combustible en alliage M5 incriminées (leur faible teneur en fer) et à l'occurrence d'un régime d'ébullition nucléée favorisant l'apparition d'un milieu oxydant en partie haute des assemblages. Les conditions de fonctionnement des réacteurs du palier N4 sont à cet égard plus propices à la formation d'ébullition nucléée que celles du palier 1300 MWe.

EDF a ainsi défini des mesures compensatoires relatives au rechargement du combustible<sup>2</sup> et à l'exploitation des réacteurs<sup>3</sup>. Ces dispositions, distinctes pour les paliers N4 et 1300 MWe, ont été prises par EDF dès lors que le phénomène de corrosion accélérée est observé au déchargement du cœur. Les mesures appliquées au palier 1300 MWe ont également été mises en œuvre pour les réacteurs du palier 900 MWe, dans l'attente de l'acquisition de données sur ces réacteurs<sup>4</sup> et de la caractérisation complète du phénomène nécessitant l'acquisition d'un nombre conséquent de mesures d'épaisseurs d'oxyde sur les gaines de crayon de combustible affectées.

En août 2021, l'IRSN s'est positionné favorablement sur l'exploitation des réacteurs du palier N4 et de 1300 MWe concernés par le phénomène de corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5. Il a notamment estimé acceptable, au plan de la sûreté, le redémarrage du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B pour le cycle 19 [2] ainsi que du réacteur n° 3 du CNPE de Cattenom pour le cycle 23 [3] compte tenu de la stratégie retenue par EDF pour la sélection des assemblages pouvant être rechargés et des mesures compensatoires d'exploitation prévues.

En septembre 2021, l'ASN a demandé à EDF, par le courrier en référence [4], de fournir des compléments relatifs à la compréhension des phénomènes physiques et physico-chimiques en jeu, aux mesures de surveillance envisagées sur le parc en exploitation et à l'analyse du retour d'expérience<sup>5</sup>. Ces compléments, dont certains prévus courant 2022, feront l'objet d'une expertise ultérieure.

Toutefois, EDF souhaite d'ores et déjà relaxer certaines mesures compensatoires appliquées aux réacteurs des paliers 900 MWe et 1300 MWe, compte tenu du retour d'expérience acquis sur le parc en exploitation en 2021 et des analyses rétrospectives des inspections télévisuelles (ITV) menées sur les dix dernières années.

L'ASN souhaite ainsi recueillir l'avis de l'IRSN sur l'acceptabilité, au plan de la sûreté, de l'actualisation par EDF des mesures compensatoires pour l'exploitation des réacteurs des paliers 900 MWe et 1300 MWe concernés par le phénomène de corrosion accélérée du gainage en alliage M5.

En particulier, l'ASN souhaite connaître l'avis de l'IRSN sur les points suivants [1] :

- l'ensemble du retour d'expérience (REX) national acquis en 2021 ou issu des analyses rétrospectives des ITV ;
- les éléments spécifiques concernant le combustible MOX chargé dans les réacteurs de 900 MWe ;

<sup>2</sup> La stratégie de sélection des assemblages vise, sur la base des inspections télévisuelles réalisées lors du déchargement et de mesures d'épaisseur d'oxyde réalisées pour les plus affectés, à exclure les assemblages de combustible présentant un risque de desquamation au cours du cycle suivant.

<sup>3</sup> Consistant par exemple à réduire la manœuvrabilité de certains réacteurs, en fonctionnant avec les grappes aussi extraites que possible pour limiter les conséquences du transitoire accidentel d'éjection de grappe, et à augmenter la teneur en hydrogène du fluide primaire.

<sup>4</sup> Les investigations n'ont pu démarrer sur le palier 900 MWe qu'à partir du mois de septembre 2021, du fait d'un nombre limité de dispositifs de mesures d'épaisseur d'oxyde pour l'ensemble du parc.

<sup>5</sup> Si ce phénomène de corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5 est inédit en France, il a déjà été observé à l'international sur des réacteurs exploités en Allemagne (en 2005, 2012, 2017 et 2019) et au Brésil (en 2020).

- les nouveaux éléments concernant l'effet de la corrosion accélérée sur la démonstration de sûreté ;
- les nouvelles mesures compensatoires proposées par EDF pour les réacteurs de 900 MWe et 1300 MWe.

## 2. RETOUR D'EXPÉRIENCE ACQUIS EN 2021 OU ISSU DES ANALYSES RÉTROSPECTIVES DES ITV

Depuis l'évènement survenu en 2021 sur le CNPE de Chooz B, EDF a réalisé, pour plusieurs milliers d'assemblages de combustible présents sur les réacteurs des paliers 900 MWe et 1300 MWe, une analyse rétrospective des ITV, et ce en remontant sur une dizaine d'années, afin d'évaluer l'état des gaines des assemblages. Cette analyse répond notamment à une demande de l'ASN formulée dans le courrier en référence [4]. L'IRSN note que le phénomène de corrosion accélérée est présent, depuis de nombreuses années, sur ces deux paliers, ce qui met en exergue l'insuffisance des analyses réalisées dans le passé. Toutefois, l'IRSN estime rassurant le fait qu'aucune desquamation n'ait été observée sur ces deux paliers.

En outre, depuis cet évènement, EDF procède systématiquement à des analyses approfondies par ITV des parties hautes des assemblages de combustible afin de détecter la présence de corrosion accélérée, ce qui est positif.

Les mesures d'épaisseurs d'oxyde<sup>6</sup> et les ITV associées réalisées en 2021 indiquent que la corrosion des crayons périphériques, observable par les ITV, est représentative de celle des crayons internes, non visible par les ITV. En effet :

- la grande majorité des assemblages affectés par le phénomène de corrosion accélérée présentent une corrosion plus importante sur les crayons périphériques que sur les crayons en positions internes ;
- pour les cas où la corrosion est inférieure en périphérie, l'écart entre les épaisseurs d'oxyde des crayons internes et périphériques est très faible.

**EDF en conclut que l'analyse approfondie des ITV constitue un moyen efficace de détection des assemblages affectés par le phénomène de corrosion accélérée, ce que l'IRSN estime acceptable.**

## 3. CAS DU COMBUSTIBLE MOX

L'analyse rétrospective des ITV montre que le palier 900 MWe, pour lequel les conditions thermohydrauliques sont moins sollicitantes que celles des paliers 1300 MWe et N4, est également affecté par le phénomène de corrosion accélérée, mais dans une moindre mesure. Or, plusieurs anomalies affectent le combustible MOX<sup>7</sup> utilisé dans les réacteurs de 900 MWe exploités en gestion de combustible Parité MOX, dont le phénomène de remontée de flux neutronique se produisant pendant le fonctionnement normal du réacteur à l'extrémité haute des crayons de combustible MOX<sup>8</sup>.

Ce phénomène de remontée de flux neutronique conduit à un surcroît de puissance au niveau de la dernière pastille en extrémité de colonne fissile. Compte tenu du fait que ceci pourrait favoriser l'apparition de l'ébullition nucléée, identifiée comme étant l'une des causes principales de la corrosion accélérée du gainage M5, l'ASN a demandé à EDF par son courrier en référence [4] de s'assurer de l'absence d'un comportement particulier des gaines en alliages M5 du combustible MOX.

<sup>6</sup> Les mesures d'épaisseurs d'oxyde couvrent tous les crayons d'un assemblage à une cote donnée.

<sup>7</sup> Oxyde mixte de plutonium et d'uranium.

<sup>8</sup> L'effet de ce phénomène sur les études de la sûreté a conduit EDF à déclarer en mars 2017 un ESS à caractère générique, objet de l'avis de l'IRSN en référence [5]. Afin de résorber cette anomalie, EDF a mis en œuvre des mesures compensatoires pour tous les réacteurs du palier 900 MWe exploités en gestion de combustible Parité MOX.

EDF a alors réalisé des mesures d'épaisseurs d'oxyde qui indiquent une sensibilité significativement moindre du combustible MOX à la corrosion accélérée comparativement au combustible UO<sub>2</sub>. De plus, les ordres de grandeurs des épaisseurs d'oxyde sont conformes aux épaisseurs habituellement rencontrées pour le gainage M5 en l'absence de corrosion accélérée, y compris en présence de coulées hypersensibles<sup>9</sup>. **L'IRSN estime que ces premiers éléments sont rassurants. De plus, EDF prévoit de nouvelles mesures d'épaisseurs d'oxyde sur du combustible MOX. Celles-ci visent à répondre à la demande de l'ASN [4] de fournir des éléments relatifs à la compréhension fine du phénomène de corrosion accélérée en partie haute des assemblages et permettant d'expliquer le comportement différent des combustibles MOX et UO<sub>2</sub> vis-à-vis de ce phénomène.**

## 4. EFFET DE LA CORROSION ACCÉLÉRÉE SUR LA DÉMONSTRATION DE SÛRETÉ

Le phénomène de corrosion accélérée en partie haute des gaines des crayons de combustible en alliage 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 ;
- mener à la desquamation de la couche de zircon en surface des gaines de crayons de combustible, ce qui peut, d'une part conduire à une production importante de corps migrants pouvant circuler dans le circuit primaire, et d'autre part avoir un effet sur la démonstration de sûreté, notamment en cas de transitoire d'éjection d'une grappe (EDG<sup>10</sup>). En effet, la desquamation crée un point froid à la surface de la gaine (par opposition aux zones où l'effet d'isolation thermique de la couche d'oxyde rend la température de gaine plus élevée) et entraîne, en fonctionnement normal, la précipitation d'hydrures dans celle-ci, ce qui la fragilise.

Dans l'avis en référence [2] relatif aux réacteurs du palier 1300 MWe, l'IRSN a estimé satisfaisante l'analyse de l'effet de la corrosion accélérée et d'une éventuelle desquamation sur les études de la démonstration de sûreté.

Dans le cadre la présente demande de modification, EDF a apporté les compléments de justifications concernant les réacteurs de 900 MWe.

EDF a reconduit la démarche appliquée pour les réacteurs du palier 1300 MWe [2] en considérant des épaisseurs d'oxyde enveloppes à l'issue de chaque cycle d'irradiation et spécifiques au palier 900 MWe et, au titre de la défense en profondeur, l'impact d'une éventuelle desquamation de la couche d'oxyde en surface des gaines de crayons de combustible. Cette vérification est réalisée pour le combustible UO<sub>2</sub>, les mesures d'épaisseurs d'oxyde réalisées sur le combustible MOX indiquant que le MOX n'est pas affecté par le phénomène.

Par ailleurs, la démonstration de l'absence de nocivité des corps migrants, produite pour les réacteurs du palier N4 [2], est transposable aux réacteurs du palier 900 MWe dans la mesure où elle n'est pas spécifique au type de réacteurs et ne dépend pas des conditions de fonctionnement.

L'IRSN estime qu'EDF a évalué de manière satisfaisante l'effet de la corrosion accélérée et d'une éventuelle desquamation sur les études de la démonstration de sûreté des réacteurs de 900 MWe et a montré que leurs conclusions ne sont pas mises en cause.

<sup>9</sup> Les coulées à faible teneur en fer ayant conduit à la desquamation de la couche de zircon en surface des crayons de combustible, telle qu'observée dans les réacteurs n° 2 des CNPE de Chooz B et de Civaux, sont dites « hypersensibles ».

<sup>10</sup> Pour cet accident de référence de quatrième catégorie, la puissance maximale est localisée très haut dans le cœur non loin de la zone affectée par la corrosion accélérée.

## 5. MODIFICATION DES MESURES COMPENSATOIRES POUR LES PALIERS 900 MWE ET 1300 MWE

Compte tenu des mesures d'épaisseurs d'oxyde relevées sur les assemblages affectés par la corrosion accélérée irradiés dans des réacteurs de 900 MWe ou 1300 MWe<sup>11</sup> et des résultats des analyses rétrospectives des ITV montrant l'absence de desquamation de la couche de zircone, EDF propose de modifier les mesures compensatoires relatives au rechargement et à l'exploitation des réacteurs de ces paliers<sup>12</sup>.

Le rechargement des assemblages ne sera plus conditionné à la réalisation de mesures d'épaisseurs d'oxyde mais uniquement aux résultats des examens approfondis des d'ITV, ce que l'IRSN estime acceptable. En effet, l'analyse approfondie des ITV permet de caractériser l'ampleur de la corrosion et de sélectionner les assemblages pouvant être rechargés.

Ainsi, en l'absence de campagnes de mesures d'épaisseurs d'oxyde, les assemblages affectés par la corrosion accélérée issus notamment de coulées hypersensibles ou non caractérisées<sup>13</sup> seront dans la mesure du possible écartés des plans de chargement. Si ces assemblages devaient être rechargés, EDF prévoit :

- qu'ils soient, si possible, placés en positions non grappées ;
- de mettre œuvre la mesure de restriction de la manœuvrabilité, non pas à partir du début de cycle comme prévu actuellement, mais à partir d'un avancement dans le cycle correspondant à l'atteinte par l'un de ces assemblages, effectuant son deuxième cycle en cœur, d'un épuisement assemblage moyen limite. Celui-ci, défini à partir des mesures d'épaisseurs d'oxyde acquises sur les réacteurs de 900 MWe et 1300 MWe, correspond à l'épuisement du combustible à partir duquel le risque de desquamation<sup>14</sup> ne peut pas être écarté.

L'IRSN estime acceptable l'analyse réalisée par EDF pour définir le seuil d'épuisement à partir duquel s'appliquera dorénavant la mesure compensatoire de restriction de la manœuvrabilité de certains réacteurs, correspondant à un fonctionnement avec les grappes aussi extraites que possible, pour limiter les conséquences potentielles d'une EDG, dès lors que des assemblages de combustible fabriqués à partir de coulées hypersensibles ou non caractérisées sont en cours d'irradiation. En effet, les conséquences d'une éjection de grappe, en termes d'insertion de réactivité, sont moindres dès lors que les grappes sont les plus extraites possibles.

Par ailleurs, l'IRSN estime satisfaisant de positionner les assemblages présentant un taux d'épuisement supérieur à la limite fixée et affectés par le phénomène de corrosion accélérée en positions non grappées, excluant ainsi le risque d'éjection de grappe pour ces assemblages.

Enfin, EDF a indiqué, au cours de l'expertise, maintenir la mesure compensatoire relative à la teneur en hydrogène dissous dans le fluide primaire afin de limiter la formation d'un environnement très oxydant, ce qui est satisfaisant.

**Ainsi, L'IRSN estime *in fine* acceptable l'actualisation par EDF des mesures compensatoires pour les réacteurs de 900 MWe et 1300 MWe.**

<sup>11</sup> Les épaisseurs d'oxyde atteintes sur ces paliers sont bien plus faibles que celles relevées sur des crayons du palier N4.

<sup>12</sup> Le palier N4 n'est à date pas concerné par une révision des mesures compensatoires. Les conclusions de l'IRSN présentées dans l'avis en référence [2] sont toujours applicables.

<sup>13</sup> Les coulées qui constituent les crayons affectés par la corrosion accélérée du M5 et ayant fait l'objet de mesures d'épaisseur d'oxyde en 2021 (notamment sur les CNPE de Chooz, de Cattenom et de Civaux) sont réputées caractérisées.

<sup>14</sup> Le seuil de desquamation défini pour le dossier relatif aux réacteurs du palier N4 est applicable dans la mesure où ce seuil est indépendant des conditions d'exploitation : il s'agit d'une caractéristique intrinsèque à la couche de corrosion qui se forme sur une gaine en alliage M5.

## 6. CONCLUSION

Le phénomène de corrosion accélérée des gaines des crayons de combustible en alliage M5 a été détecté en 2021 à l'issue de la campagne 18 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B puis à l'issue de la campagne 17 du réacteur n° 2 du CNPE de Civaux et de la campagne 22 du réacteur n° 3 du CNPE de Cattenom.

EDF a alors défini des mesures compensatoires pour les réacteurs du palier N4 et les réacteurs de 1300 MWe, adaptées au caractère sollicitant du réacteur. Les mesures compensatoires appliquées aux réacteurs de 1300 MWe ont également été appliquées aux réacteurs de 900 MWe à titre conservatoire, afin de réduire les conséquences potentielles du phénomène de corrosion accélérée.

Les analyses rétrospectives des ITV des assemblages de combustible sur les réacteurs de 900 MWe et de 1300 MWe depuis le début de 2021 et en remontant sur une dizaine d'années confirment la présence du phénomène de corrosion accélérée sur ces deux paliers, mais sans qu'aucune desquamation de la couche de zircon n'ait été constatée. De plus, les mesures d'épaisseurs d'oxyde réalisées par EDF montrent une sensibilité significativement moindre du combustible MOX à la corrosion accélérée comparativement au combustible UO<sub>2</sub>.

Par ailleurs, EDF a apporté la démonstration de l'absence de mise en cause des conclusions des études de sûreté en cas de corrosion accélérée ou de desquamation de la gaine en alliage M5 pour les réacteurs de 900 MWe et de 1300 MWe. Nonobstant cette analyse, EDF maintient des mesures compensatoires relatives à la sélectivité des assemblages et à l'exploitation de ces réacteurs. Toutefois, compte tenu de l'ensemble du REX national acquis en 2021 et à l'issue des analyses rétrospectives des ITV, EDF propose de conditionner le rechargement des assemblages aux seules analyses approfondies des ITV et de n'appliquer la mise en œuvre de la restriction de manœuvrabilité qu'à partir d'une valeur de taux d'épuisement limite, ce que l'IRSN estime acceptable.

**Compte tenu des analyses présentées par EDF, l'IRSN estime acceptable l'actualisation des mesures compensatoires à appliquer pour le rechargement et l'exploitation des réacteurs des paliers 900 MWe et 1300 MWe concernés par le phénomène de corrosion accélérée du gainage en alliage M5.**

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté