

Fontenay-aux-Roses, le 6 août 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2021-00151

**Objet :** Réacteurs électronucléaires EDF - Exploitation des réacteurs du palier N4 concernés par le phénomène de corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5.

**Réf. :** [1] Saisine ASN - CODEP-DCN-2021-035430 du 23 juillet 2021.  
[2] Avis IRSN N°2014-00270 du 18 juillet 2014.

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'exploitation des réacteurs du palier N4 concernés par le phénomène de corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5, en particulier du redémarrage du réacteur n° 2 du centre nucléaire de production d'électricité (CNPE) de Chooz B pour la campagne 19.

### 1. CONTEXTE

Lors du déchargement du combustible, à l'issue de la campagne 18 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B en février 2021, EDF a observé un grand nombre de corps migrants de couleur blanche de quelques millimètres dans la cuve<sup>1</sup>. Les premières analyses ont permis de définir la nature de ces particules comme étant des écailles de zirconium<sup>2</sup>. Les inspections télévisuelles (ITV) des assemblages ont permis d'observer une corrosion supérieure à l'attendu (corrosion accélérée) du gainage en partie haute<sup>3</sup> de certains crayons de combustible. Elles ont également confirmé que ces corps migrants sont issus de la desquamation<sup>4</sup> de la couche d'oxyde formée en surface externe des gaines de combustible.

EDF fait état d'une quinzaine d'assemblages pouvant contenir des crayons desquamés et d'un grand nombre d'assemblages de combustible qui présentent des colorations indiquant une couche d'oxyde importante. Les

<sup>1</sup> Ces corps migrants sont localisés principalement au-dessus de la plaque inférieure de cœur et sur plusieurs assemblages de combustible.

<sup>2</sup> Le zirconium, qui constitue le matériau des gaines de combustible, réagit avec l'eau pour donner un oxyde de zirconium, la zircone, qui fragilise la gaine. Les niveaux d'oxydation et de fragilisation des gaines dépendent des températures atteintes et des durées de maintien à ces températures.

<sup>3</sup> La corrosion des gaines de combustible est un phénomène classique observé en fonctionnement normal, mais elle doit toutefois rester maîtrisée. Habituellement, la corrosion du gainage maximale est observée en partie courante du cœur où la puissance est généralement la plus importante.

<sup>4</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.

phénomènes de corrosion accélérée et de desquamation n'ont pas conduit à une perte d'intégrité du combustible lors de la campagne 18 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B.

En outre, les investigations<sup>5</sup> menées à ce jour par EDF sur les autres réacteurs du palier N4 et de 1300 MWe ont révélé<sup>6</sup> :

- une desquamation sur un seul crayon de combustible pour le réacteur n° 2 du CNPE de Civaux ;
- une corrosion accélérée sans desquamation sur plusieurs assemblages de combustible exploités dans le réacteur n° 3 du CNPE de Cattenom.

Dans ce contexte, EDF a déclaré en juillet 2021 un événement significatif pour la sûreté à caractère générique pour 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.

Ce phénomène de corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5 est inédit en France. Néanmoins, 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).

Pour la campagne 19 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B, EDF prévoit, en plus des assemblages neufs, de recharger des assemblages de combustible irradiés lors de la campagne 18, à savoir ceux contenant les crayons les moins affectés par le phénomène de corrosion accélérée. EDF base sa stratégie, d'une part, sur un choix d'assemblages pour lesquels le risque de desquamation de la couche de zircone en surface des gaines est jugé négligeable durant la campagne 19, et d'autre part sur des restrictions d'exploitation visant à limiter la corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5. Cette stratégie sera également mise en œuvre sur les autres réacteurs du palier N4.

L'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN sur l'acceptabilité, au plan de la sûreté, de l'exploitation des réacteurs du palier N4 concernés par le phénomène de corrosion accélérée du gainage en alliage M5, et en particulier du redémarrage du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B pour la campagne 19.

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

- *« la stratégie d'EDF de sélection des assemblages rechargés et l'acceptabilité des critères associés [...] ;*
- *le bien-fondé des mesures compensatoires prévues par EDF, leur efficacité à garantir l'absence de desquamation en service et l'intégrité du combustible pour leur cycle à venir ;*
- *au titre de la défense en profondeur, une appréciation de la sensibilité de la nocivité du phénomène de corrosion pour le cas où les mesures compensatoires seraient insuffisantes ;*
- *le programme de surveillance prévu au déchargement [...] ».*

Pour ce qui concerne les réacteurs du palier 1300 MWe concernés par cet événement et faisant également l'objet de la saisine en référence [1], l'IRSN émettra prochainement un avis dédié.

Enfin, la compréhension fine de la corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5 nécessite des compléments qui ne seront pas disponibles à court terme. Ce point fera l'objet d'une expertise ultérieure.

Dans la suite de l'avis, l'IRSN présente les conclusions de son expertise sur les points suivants :

- la caractérisation du phénomène de corrosion accélérée de la gaine de combustible ;
- la stratégie de sélection des assemblages pouvant être rechargés lors de la campagne 19 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B ;
- l'impact de la corrosion accélérée sur la démonstration de sûreté ;
- les mesures compensatoires prévues par EDF sur le palier N4 ;

<sup>5</sup> Pour ce qui concerne les réacteurs en cours d'exploitation, EDF a analysé les ITV archivées des assemblages à l'issue des campagnes précédentes. Les réacteurs à l'arrêt ont fait l'objet d'investigations plus approfondies.

<sup>6</sup> Ces investigations sont en cours sur le palier 900 MWe.

- le programme de surveillance et la mesure corrective mis en œuvre à l'issue de la campagne 19 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B.

## 2. CARACTÉRISATION DU PHÉNOMÈNE DE CORROSION ACCÉLÉRÉE DE LA GAINÉ DE COMBUSTIBLE

Une caractérisation plus fine du phénomène a été engagée par EDF, sur la base de l'analyse approfondie<sup>7</sup> des ITV, aboutissant à un classement visuel de l'ensemble des assemblages irradiés au cours de la campagne 18 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B. Cette classification (du moins au plus oxydé) est fonction du niveau de coloration constaté en partie haute des assemblages<sup>8</sup>, de l'étendue de la zone affectée et de la présence ou non de la desquamation des gaines. Ces éléments ont permis à EDF de sélectionner un grand nombre d'assemblages devant faire l'objet de mesures d'épaisseurs d'oxyde en fonction de paramètres d'intérêt tels que le positionnement dans le cœur, le temps passé en réacteur, les lots matières (coulée<sup>9</sup>) de fabrication des gaines de combustible et les conditions thermohydrauliques. Les mesures d'épaisseurs d'oxyde réalisées à l'extrémité supérieure de la colonne fissile ont été complétées par des mesures à l'altitude courante correspondant à la localisation « habituelle » de l'épaisseur maximale de l'oxyde. Ces dernières révèlent une cinétique de corrosion conforme à l'attendu, confirmant le caractère local du phénomène de corrosion accélérée observée en partie haute des crayons de combustible.

De plus, ces analyses ont montré que seuls<sup>10</sup> les assemblages introduits lors des campagnes 17 (c'est-à-dire ceux qui ont terminé leur deuxième campagne d'irradiation en 2021) et 18 (c'est-à-dire ceux qui ont terminé leur première campagne d'irradiation en 2021) sont concernés par la corrosion accélérée. Elles ont également permis de définir un seuil en épaisseur d'oxyde à partir duquel le risque de desquamation<sup>11</sup> n'est pas exclu (appelé par la suite « seuil de desquamation »).

La corrosion accélérée n'étant pas détectée sur l'ensemble des crayons d'un assemblage, EDF a mené une enquête sur la fabrication de l'ensemble des lots de gaines de combustible présents dans le réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B pendant la campagne 18. À ce stade, cette analyse n'a pas mis en évidence de non-conformité ou d'événement anormal susceptible d'être l'unique cause à l'origine du phénomène de corrosion accélérée. Toutefois, en cohérence avec le retour d'expérience à l'international, EDF identifie un lien potentiel entre l'accélération de la corrosion et la teneur en fer des gaines en alliage M5. En effet, les gaines de combustible les plus affectées par la corrosion accélérée sont issues de coulées présentant une teneur en fer faible<sup>12</sup>, c'est-à-dire proche de la borne inférieure de la spécification de fabrication définie à ce jour.

<sup>7</sup> Des examens télévisuels des assemblages sont systématiquement réalisés au déchargement du cœur afin de contrôler l'intégrité du squelette des assemblages (grilles et embouts) ou la présence de corps migrants. En cas de besoin, des ITV approfondies sont réalisées pour scruter plus finement l'ensemble de l'assemblage ou des zones particulières.

<sup>8</sup> La coloration de la gaine est une indication sur l'épaisseur de la couche de zircone formée : une gaine saine n'a aucune indication tandis qu'une gaine oxydée peut avoir des indications allant d'une coloration grise (zone faiblement oxydée) à une coloration blanche (zone fortement oxydée).

<sup>9</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. Le lingot issu d'une coulée subit un ensemble de procédés (gamme de fabrication) jusqu'à l'obtention des différents lots de gaines.

<sup>10</sup> En général, les assemblages de combustible sont exploités pendant trois campagnes dans les réacteurs du palier N4.

<sup>11</sup> La desquamation intervient à partir d'une épaisseur critique de la couche d'oxyde en surface des gaines. À partir des mesures d'épaisseur d'oxyde réalisées sur plusieurs crayons affectés par la desquamation lors de la campagne 18 du réacteur n°2 du CNPE de Chooz B, EDF a estimé que, au-delà d'une épaisseur d'oxyde de 71 µm, la desquamation n'est pas exclue.

<sup>12</sup> Il est communément admis que la présence du fer dans les alliages en zirconium augmente leur résistance à la corrosion.

En conséquence, EDF distingue les coulées utilisées pour la fabrication des crayons de combustibles en alliage M5 selon trois familles :

- les coulées n'ayant pas conduit à une corrosion accélérée ;
- les coulées à faible teneur en fer dites « sensibles » pour lesquelles la cinétique de corrosion est supérieure à l'attendu ;
- les coulées à faible teneur en fer dites « hypersensibles » ayant conduit à la desquamation de la couche de zircone en surface des crayons de combustible, telle qu'observée dans les réacteurs n° 2 des CNPE de Chooz B et de Civaux.

À cet égard, les investigations menées sur des lots de fabrication d'assemblages ont relevé la présence d'assemblages de combustible avec des crayons issus de coulées sensibles dans les réacteurs n° 1 et n° 2 du CNPE de Civaux.

Par ailleurs, l'examen des conditions de fonctionnement du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B au cours des deux derniers cycles n'a pas mis en évidence de particularités par rapport au retour d'expérience global du palier N4. Le conditionnement chimique du circuit primaire était conforme à l'attendu et la radiochimie maîtrisée. Toutefois, EDF estime que les conditions de fonctionnement de la gestion de combustible ALCADÉ mise en œuvre sur les réacteurs du palier N4 sont propices à la formation d'un régime d'ébullition nucléée (formation de bulles de vapeur à l'interface entre fluide primaire et les gaines) en extrémité supérieure de la colonne fissile. Ce phénomène peut conduire, dans une certaine mesure, à l'apparition d'un environnement chimique très oxydant (due à la diminution de l'hydrogène dans la phase liquide du fluide primaire). Ainsi, EDF estime que la présence d'une ébullition nucléée élevée en haut du cœur et la présence d'une teneur en fer faible du gainage constituent les causes principales de la corrosion accélérée des gaines de combustible. Néanmoins, à la fin de l'expertise, EDF s'est engagé à poursuivre ses investigations afin de mieux appréhender les mécanismes physiques à l'origine de ce phénomène, ce qui fait l'objet de l'engagement mentionné en annexe. **L'IRSN estime cet engagement satisfaisant.**

Si l'analyse des causes nécessite d'être confortée afin d'acquérir une compréhension fine du phénomène de corrosion accélérée, l'IRSN estime toutefois que les évaluations menées à ce stade par EDF permettent d'établir une stratégie de sélection des assemblages rechargeables pertinente et de définir des mesures compensatoires adaptées.

### **3. STRATÉGIE DE SÉLECTION DES ASSEMBLAGES POUVANT ÊTRE RECHARGÉS LORS DE LA CAMPAGNE 19 DU RÉACTEUR N° 2 DU CNPE DE CHOOZ B**

La stratégie de sélection des assemblages de combustible pouvant être rechargés en réacteur, retenue par EDF, vise à limiter le risque de desquamation des gaines de combustible au cours des campagnes ultérieures. Elle repose sur le classement visuel à l'issue des ITV et sur les mesures d'épaisseurs d'oxyde réalisées sur des crayons de combustible de différentes coulées. À la suite des échanges techniques, EDF a fait évoluer sa stratégie. Il prévoit désormais :

- d'exclure les assemblages de combustible pour lesquels les ITV mettent en évidence une desquamation de la couche d'oxyde en surface des gaines de combustible ;
- d'inclure dans le plan de chargement les assemblages de combustible contenant des crayons fabriqués à partir de coulées sensibles et hypersensibles, dès lors que les mesures d'épaisseurs d'oxydes garantissent l'absence de desquamation au cours de la prochaine campagne d'irradiation.

**L'IRSN estime satisfaisante la stratégie retenue par EDF.**

Pour ce qui concerne l'épaisseur de corrosion à partir de laquelle le risque de desquamation est susceptible d'apparaître, EDF a analysé les profils d'épaisseurs d'oxyde de plusieurs crayons présentant de la desquamation, et a retenu la valeur minimale au-delà de laquelle le risque de desquamation est avéré.

Par ailleurs, EDF a évalué la croissance attendue de la couche d'oxyde sur les gaines de combustible au cours de la campagne 19 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B afin de se positionner sur la rechargeabilité des assemblages. Les calculs réalisés permettent de définir les épaisseurs d'oxyde limites admissibles en début de campagne, pour les assemblages ayant vécu un ou deux cycles en réacteur, afin que le seuil de desquamation défini ne soit pas atteint à l'issue de la prochaine campagne. Pour ce faire, EDF applique la démarche usuelle qui s'appuie sur l'utilisation d'historiques de puissance<sup>13</sup> enveloppes de la gestion de combustible ALCADE, associés au modèle enveloppe de corrosion du logiciel de thermomécanique utilisé pour les études de sûreté.

L'IRSN estime conservatrices les estimations de la croissance de la couche d'oxyde en surface des gaines au cours de la campagne 19 compte tenu des mesures compensatoires prévues en exploitation, notamment la baisse de puissance envisagée par EDF, visant à limiter les épaisseurs d'oxyde au cours de la campagne (cf. paragraphe 5).

À l'issue de l'expertise, l'IRSN note que l'ensemble des assemblages concernés par les coulées sensibles et hypersensibles qui seront rechargés à la campagne 19 ont fait l'objet de mesures d'épaisseurs d'oxyde. De plus, EDF ne retient que les assemblages dont les épaisseurs d'oxyde mesurées respectent les valeurs limites retenues avec une marge confortable afin de tenir compte de l'état actuel de la compréhension du phénomène et des données expérimentales disponibles. **L'IRSN estime cette démarche satisfaisante.**

**Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, l'IRSN estime acceptables la stratégie d'EDF de sélection des assemblages pouvant être rechargés pour la campagne 19 du réacteur n°2 du CNPE de Chooz B et les critères de rechargeabilité associés.**

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

La corrosion excessive des gaines de combustible peut avoir plusieurs effets sur le plan de la sûreté. La desquamation de la couche de zircone peut conduire à une production importante de corps migrants qui peuvent circuler dans le circuit primaire. EDF estime que ces corps migrants ne présentent aucune nocivité compte tenu de leur taille et de leur faible résistance mécanique : les écailles de zircone sont très friables. **Cette analyse de nocivité n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Par ailleurs, une corrosion accélérée est de nature à fragiliser la gaine et à augmenter le risque de perte d'intégrité des crayons concernés lors des transitoires accidentels. En particulier, les épaisseurs d'oxyde importantes en surface des gaines de combustible peuvent altérer les échanges thermiques entre la gaine et le fluide primaire, et conduire à une augmentation de la température du combustible et de la gaine. EDF a estimé l'impact sur les études du rapport de sûreté d'une épaisseur d'oxyde maximale de découplage (valeur supérieure au seuil de desquamation) localisée à la côte où la puissance est maximale. EDF montre que les critères de sûreté pour l'ensemble des conditions de fonctionnement restent respectés, même pour l'accident pénalisé d'éjection de grappe<sup>14</sup> (EDG). Compte tenu de cette analyse et de la localisation du phénomène de corrosion excessive, qui ne correspond pas toujours à la zone de puissance maximale du cœur, **l'IRSN estime acceptables les éléments de justification apportés par EDF.**

<sup>13</sup> Il s'agit de l'évolution de la puissance linéique d'un crayon de combustible au cours d'une campagne, utilisée pour les études de conception.

<sup>14</sup> Pour cet accident de référence de quatrième catégorie, la puissance maximale est localisée très haut dans le cœur au niveau de la zone affectée par la corrosion accélérée.

Au titre de la défense en profondeur, EDF a également étudié l'impact d'une éventuelle desquamation de la couche d'oxyde en surface des gaines de combustible. La desquamation de la gaine est susceptible d'avoir un impact sur la démonstration de sûreté, notamment dans le cas d'une EDG. 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<sup>15</sup> dans celle-ci, ce qui la fragilise. L'analyse d'EDF repose sur le fait que l'alliage M5 absorbe très peu d'hydrogène quel que soit le régime de corrosion considéré (contrairement aux anciens gainages en Zy-4). En effet, sur la base du retour d'expérience international, EDF a fourni des premiers éléments montrant qu'une accélération de la corrosion des gaines en alliage M5 ne s'accompagne pas de formation d'hydrures. L'IRSN estime toutefois important de confirmer ce résultat par des examens complémentaires en laboratoire menés sur des crayons desquamés lors de la campagne 18 du réacteur n° 2 de Chooz B. À cet égard, EDF s'est engagé à mener ces travaux, ce qui fait l'objet de l'engagement mentionné en annexe. **L'IRSN estime cette action satisfaisante.**

Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, l'IRSN estime qu'EDF a évalué de manière satisfaisante l'impact de la corrosion accélérée et d'une éventuelle desquamation sur les études de la démonstration de sûreté et a montré que leurs conclusions ne sont pas mises en cause.

## 5. MESURES COMPENSATOIRES PRÉVUES SUR LE PALIER N4

Nonobstant les conclusions de l'analyse d'impact sur la sûreté d'une corrosion accélérée et d'une éventuelle desquamation, EDF prévoit la mise en œuvre de mesures compensatoires, en particulier pour la prochaine campagne du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B (campagne n°19), et plus généralement pour les réacteurs du palier N4 concernés par une corrosion accélérée de l'alliage M5 (à savoir ceux pour lesquels au moins un assemblage de combustible contient des gaines issues de coulées sensibles ou hypersensibles). La stratégie d'EDF de mise en œuvre de ces mesures, décrites ci-dessous, tient compte de l'état des réacteurs au moment du traitement de cet événement.

### 5.1. RÉACTEUR N° 2 DE CHOOZ B

Dans la mesure où les critères de sélection des assemblages rechargeables ne sont pas suffisants pour garantir l'absence de corrosion accélérée des gaines de combustible, EDF prévoit de mettre en œuvre, lors de la campagne 19, les mesures compensatoires suivantes :

- l'abaissement de la puissance maximale autorisée en fonctionnement normal à 92,6 %PN<sup>16</sup> afin de réduire le phénomène d'ébullition nucléée en partie haute des gaines de combustible, qui constitue une des causes principales de la corrosion accélérée ;
- l'augmentation, dans les limites autorisées par les spécifications chimiques, de la teneur en hydrogène dissous dans le fluide primaire afin de limiter la formation d'un environnement très oxydant ;
- la conservation en prolongation de cycle de la position recommandée du groupe de régulation de la température moyenne du circuit primaire définie en fin de campagne naturelle, afin de limiter la puissance en partie haute du cœur et par conséquent le phénomène d'ébullition nucléée.

**L'IRSN estime pertinentes les mesures compensatoires retenues pour le réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B dans la mesure où elles permettent de limiter la corrosion accélérée en fonctionnement normal. De plus, ces mesures sont cohérentes avec le retour d'expérience à l'international. Le programme de surveillance prévu par EDF à l'issue de la campagne 19, décrit au paragraphe 6, permettra de vérifier l'efficacité de ces mesures.**

<sup>15</sup> Dans les alliages de zirconium, lorsque la limite de solubilité de l'hydrogène est atteinte, on assiste à la formation de plaquettes d'hydrures dans le métal.

<sup>16</sup> sauf pour la réalisation des essais nécessitant une puissance supérieure à 92,6 %PN.

## 5.2. AUTRES RÉACTEURS DU PALIER N4

De manière générale, EDF prévoit également d'appliquer des mesures compensatoires visant à limiter le risque de desquamation des gaines de combustible ainsi que ses conséquences potentielles sur les réacteurs du palier N4 concernés par le phénomène de corrosion accélérée de l'alliage M5, à savoir :

- pour les réacteurs en cours de production, ce qui concerne à date les réacteurs n° 1 et n° 2 du CNPE de Civaux et le réacteur n° 1 du CNPE de Chooz B<sup>17</sup>, c'est-à-dire l'ensemble des réacteurs du palier N4 hormis le réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B :
  - la réduction de la manœuvrabilité des réacteurs en cas de présence d'indications de corrosion accélérée observées sur les ITV en partie haute des assemblages et en l'absence de mesures d'épaisseurs d'oxyde des assemblages rechargés à l'issue des campagnes précédentes,
  - l'augmentation, dans les limites autorisées par les spécifications chimiques, de la teneur en hydrogène dissous dans le fluide primaire,
  - la conservation en prolongation de cycle de la position recommandée du groupe de régulation de la température moyenne du circuit primaire définie en fin de campagne naturelle afin de limiter la puissance en partie haute du cœur et par conséquent le phénomène d'ébullition nucléée ;
- après un arrêt pour rechargement, en cas de présence d'indications de corrosion accélérée observées sur les ITV en partie haute des assemblages lors du déchargement :
  - l'augmentation, dans les limites autorisées par les spécifications chimiques, de la teneur en hydrogène dissous dans le fluide primaire,
  - en cas de desquamation de crayons de plusieurs assemblages de combustible observée à la fin de la campagne précédente<sup>18</sup> et si certains assemblages rechargés contiennent des crayons issus de coulées hypersensibles ou sensibles, la baisse de la puissance maximale autorisée en fonctionnement normal à 92,6 % PN (comme pour le réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B) lors de la campagne suivante,
  - la conservation en prolongation de cycle de la position recommandée du groupe de régulation de la température moyenne du circuit primaire définie en fin de campagne naturelle afin de limiter la puissance en partie haute du cœur et par conséquent le phénomène d'ébullition nucléée.

De manière générale, l'IRSN estime pertinentes les mesures compensatoires proposées par EDF car elles visent, d'une part, à limiter l'épaisseur maximale d'oxyde à une valeur permettant de négliger les phénomènes de desquamation des gaines de combustible et, d'autre part, à limiter les conséquences potentielles d'une EDG en privilégiant le fonctionnement des réacteurs avec les grappes les plus extraites possibles à partir du moment où le risque de desquamation ne peut pas être exclu.

L'IRSN estime toutefois que, compte tenu du retour d'expérience de l'exploitation concernant la qualité des ITV, l'application de la réduction de manœuvrabilité pour les réacteurs actuellement en production ne devrait pas être conditionnée par les résultats des ITV. Néanmoins, EDF l'applique d'ores et déjà, par mesure de prudence, sur tous les réacteurs concernés du palier N4, ce qui est satisfaisant.

De plus, l'IRSN souligne que les mesures de réduction de manœuvrabilité des réacteurs retenues par EDF sont cohérentes avec celles déjà prises en exploitation pour limiter les possibilités d'apparition ou les conséquences d'une EDG lorsque des crayons de combustible gainés en Zircalloy-4 sont présents dans le cœur d'un réacteur, et ce, à partir de l'instant de la campagne où le risque de desquamation<sup>19</sup> de ce gainage n'est pas négligeable [2].

<sup>17</sup> Dans une démarche prudente, EDF applique ces mesures compensatoires au réacteur n° 1 du CNPE de Chooz B malgré le fait qu'il ne contient pas de crayons de combustible issus des coulées sensibles et hypersensibles identifiées dans le réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B. En effet, dès la déclaration de l'événement, EDF a appliqué les restrictions de manœuvrabilité à l'ensemble des réacteurs du palier N4 dans l'attente d'une caractérisation complète du phénomène de corrosion accélérée.

<sup>18</sup> Les assemblages présentant des crayons desquamés ne sont pas rechargés pour la prochaine campagne.

<sup>19</sup> Le risque de desquamation des gaines en alliage Zy-4 devient non négligeable à partir d'une épaisseur d'oxyde de 80 µm.

## 6. PROGRAMME DE SURVEILLANCE ET MESURE CORRECTIVE MIS EN OEUVRE À L'ISSUE DE LA CAMPAGNE 19 DU RÉACTEUR N° 2 DU CNPE DE CHOOZ B

Afin de s'assurer de l'efficacité des mesures compensatoires et vérifier l'absence de nouvelle corrosion accélérée, EDF prévoit la réalisation d'exams télévisuels ciblés ainsi que la caractérisation des épaisseurs d'oxydes résultantes à l'issue de la campagne 19 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B. **À ce stade, le programme de surveillance d'EDF est jugé acceptable dans le principe.**

En termes de mesure corrective, la teneur en fer des coulées de l'alliage M5 étant l'élément déclencheur du phénomène de corrosion accélérée, EDF prévoit de revoir la spécification chimique de l'alliage utilisée pour la fabrication des gaines de combustible en relevant la teneur minimale en fer. La première mise en œuvre de cette évolution est prévue pour la campagne 20 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B en 2022. **L'IRSN estime satisfaisante cette mesure corrective qui devrait permettre de résorber ce phénomène.**

## 7. CONCLUSION

Un phénomène de corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5 conduisant à la desquamation de la couche d'oxyde a été observé à l'issue de la campagne 18 du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B.

À ce stade, l'ébullition nucléée et la faible teneur en fer des lots matières de fabrication sont identifiées comme les causes principales de la corrosion accélérée des gaines de combustible en alliage M5. EDF s'est toutefois engagé à poursuivre les investigations afin d'améliorer la compréhension fine des mécanismes à l'origine de ce phénomène.

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. Nonobstant cette analyse, EDF prévoit des mesures compensatoires sur l'ensemble des réacteurs du palier N4, notamment pour la prochaine campagne du réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B, afin de réduire le risque et les conséquences potentielles de l'apparition du phénomène de corrosion accélérée, ce que l'IRSN estime satisfaisant. Le programme de surveillance prévu par EDF à l'issue de cette campagne permettra de vérifier leur efficacité.

Pour ce qui concerne le réacteur n° 2 du CNPE de Chooz B, l'IRSN estime acceptable, au plan de la sûreté, son redémarrage pour la campagne 19 compte tenu de la stratégie retenue par EDF pour la sélection des assemblages pouvant être rechargés et des mesures compensatoires prévues.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté



FREDERIQUE

PICHEREAU

2021.08.06

18:08:03 +02'00'



## **ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2021-00151 DU 06 AOUT 2021**

### **Engagement de l'exploitant**

EDF s'est engagé à poursuivre les investigations en lien avec le phénomène de corrosion accélérée des gaines en alliage M5 en partie haute des assemblages de combustible afin d'améliorer la compréhension fine relative à la sensibilité du matériau aux conditions oxydantes. De plus, ces investigations intégreront des examens approfondis relatifs à la prise d'hydrogène des crayons desquamés sur le palier N4 dans le but de conforter les résultats observés à l'international, en particulier lors de l'évènement de corrosion anormale observé dans le réacteur KKP2 de Philippsburg en Allemagne.