

Fontenay-aux-Roses, le 28 septembre 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2023-00143

Objet : Tenue en service des fonds primaires des générateurs de vapeur de fabrication JCFC et FLC affectés par une concentration de carbone en excès.

Réf. :

- [1] Avis IRSN 2016-00369 du 30 novembre 2016
- [2] Saisine CODEP-DEP-2020-037067 du 16 juillet 2020
- [3] Saisine CODEP-DEP-2020-051119 du 7 janvier 2021
- [4] Saisine CODEP-DEP-2020-052365 du 28 décembre 2020
- [5] Avis IRSN 2021-00039 du 5 mars 2021
- [6] Lettre CODEP-DEP-2022-011528 du 10 mars 2022
- [7] Lettre CODEP-DEP-2016-047228 du 5 décembre 2016
- [8] Lettre CODEP-DEP-2017-002131 du 22 février 2017

1. INTRODUCTION

En 2015, à la suite de la détection d'une teneur en carbone plus élevée que prévue en partie centrale des calottes de cuve du réacteur EPR de Flamanville, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé à Électricité de France (EDF) d'identifier les composants installés sur les réacteurs nucléaires en exploitation potentiellement affectés par ce même type d'anomalie et de se prononcer sur les conséquences d'une telle anomalie sur l'aptitude au service de ces composants. Les fonds primaires de générateurs de vapeur (GV), fabriqués par Japan Casting and Forging Company (JCFC) et Framatome Le Creusot (FLC) à la fin des années 80 et au début des années 90, ont alors été identifiés comme potentiellement concernés par cette problématique. EDF a recensé 43 fonds de GV concernés, à savoir 23 fabriqués par JCFC et 20 par FLC, répartis sur 17 réacteurs (15 sur le palier 900 MWe et 2 sur le palier 1450 MWe).

Les concentrations en carbone excessives relevées sur certains composants résultent de phénomènes de ségrégation ayant eu lieu lors de la solidification des lingots dont sont issus ces composants. Le carbone se concentre dans des zones du lingot, appelées zones ségréguées. L'augmentation de la teneur en carbone de l'acier se traduit par une augmentation des principales caractéristiques de traction : limite élastique et contrainte à rupture ; elle peut toutefois également conduire à une diminution de la ténacité¹, en fonction du niveau de ségrégation en carbone. Ceci se traduit par une augmentation plus ou moins importante de la température de

¹ La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure.

transition fragile-ductile du matériau, dite RT_{NDT}^2 . En pratique, l'évaluation de la RT_{NDT} en zone de ségrégation permet de déterminer la ténacité minimale à prendre en compte dans les études mécaniques.

Le risque de rupture brutale des fonds de GV ne peut pas être considéré comme écarté si la ténacité minimale de la zone de ségrégation est insuffisante pour empêcher l'amorçage de la propagation de défauts potentiellement situés en paroi des fonds de GV. Le chargement mécanique de ces défauts est dû aux différents transitoires thermomécaniques à prendre en compte. Ce chargement est étudié dans des configurations de chocs chauds dans le cas d'une augmentation rapide de la température des parois, et de chocs froids dans le cas d'une diminution rapide de la température de paroi.

En 2016, l'étendue des zones concernées et la teneur maximale en carbone sur les fonds de GV en anomalie n'étaient pas connues. EDF a alors mené les premières actions de caractérisation ayant permis de bâtir des dossiers de justification de maintien en l'état des pièces concernées. Des hypothèses conservatives étaient alors retenues concernant les éléments pris en données d'entrée des analyses à la rupture brutale, notamment à l'égard de la ténacité minimale considérée dans les zones ségréguées. Ces justifications, analysées par l'IRSN [1], ont permis à l'ASN d'autoriser le redémarrage des réacteurs après les arrêts ayant permis de réaliser les contrôles, moyennant la mise en œuvre de mesures compensatoires à l'égard des chocs chauds pour les fonds de GV JCFC et FLC, et à l'égard des chocs froids pour les fonds de GV JCFC.

Depuis, EDF a complété son dossier en vue de justifier le conservatisme des hypothèses initialement retenues. Dans ce cadre, EDF a transmis :

- les éléments permettant de définir et de caractériser les transitoires susceptibles de générer des contraintes mécaniques dans les zones ségréguées des fonds de GV ;
- les résultats de caractérisation de pièces forgées à l'échelle 1 représentatives des fonds installés, dites fonds de justification. Ces caractérisations ont permis de préciser l'étendue spatiale des zones ségréguées et les éventuelles pénalisations à retenir pour leurs propriétés mécaniques ;
- l'ensemble des résultats des contrôles et examens non destructifs réalisés sur les fonds de GV concernés ;
- les analyses mécaniques mises à jour à l'aide des éléments précédents.

Par les lettres en références [2], [3] et [4], l'ASN a demandé l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) relativement aux éléments cités ci-dessus. Ainsi, l'IRSN a analysé, pour les fonds de GV JCFC et FLC concernés, la représentativité des composants employés pour appuyer la démarche d'évaluation, la pertinence et le caractère suffisant des pièces employées et des programmes expérimentaux réalisés, la stratégie de transposition des caractéristiques mécaniques des pièces de justification aux fonds de GV en service, les propriétés mécaniques finalement retenues pour les zones ségréguées, les hypothèses quant aux défauts postulés et la cohérence de leurs dimensions avec les performances des examens non destructifs, et enfin les analyses mécaniques mises à jour, établies notamment sur la base de la sélection et de la caractérisation des transitoires les plus sévères.

L'IRSN a rédigé en 2021 un avis [5] relatif à la tenue des fonds de GV fabriqués par JCFC. Le paragraphe 2 ci-dessous en présente une synthèse ainsi que l'analyse par l'IRSN des compléments apportés par EDF à l'issue de cet avis. Le présent avis détaille ensuite les conclusions de l'analyse de l'IRSN relatives aux aspects thermohydrauliques (paragraphe 3). Les conclusions relatives à la tenue en service des fonds FLC sont enfin présentées au paragraphe 4, pour ce qui concerne les propriétés mécaniques de l'acier, les contrôles non-destructifs réalisés et l'analyse mécanique permettant de justifier l'absence de risque de rupture brutale de ces fonds.

² Reference Temperature for Nil Ductility Transition (Température de référence de ductilité nulle). Cette grandeur est un indicateur de la transition fragile ductile.

L'ensemble de ces éléments permet de conclure sur la suffisance des investigations menées par EDF et les résultats expérimentaux disponibles, au regard :

- de l'aptitude des GV ayant des fonds avec ségrégation positive en carbone à être maintenus en service ;
- de la nécessité de mettre en place des mesures compensatoires d'exploitation supplémentaires, et de mesures de suivi en service complémentaires dont les examens non destructifs.

2. TENUE EN SERVICE DES FONDS DE GV FABRIQUÉS PAR JCFC

Les éléments concernant les fonds fabriqués par JCFC ont fait l'objet d'une analyse de l'IRSN en 2021 [5].

L'analyse des résultats des essais mécaniques et des caractérisations métallurgiques du fond de justification a amené l'IRSN à formuler la conclusion suivante : « *En conclusion, vis-à-vis des propriétés matériaux, les éléments fournis par EDF et leur analyse par l'IRSN montrent que la présence de ségrégation de carbone ne remet pas en cause les hypothèses prises à la conception pour l'analyse du risque de rupture brutale des fonds de GV fabriqués par JCFC, pour une durée de VDA plus 20 ans, y compris en prenant en compte des hypothèses enveloppes vis-à-vis du vieillissement thermique. Dans ces conditions, le recours à des mesures compensatoires n'apparaît plus nécessaire pour ces fonds de GV* ».

Cette conclusion concernant les bonnes propriétés mécaniques et métallurgiques des zones ségréguées rend caduque la mise à jour de l'analyse de risque de rupture brutale des fonds JCFC.

L'IRSN avait toutefois souligné que, pour une partie des fonds fabriqués par JCFC, les conditions de fabrication, non optimales, sont susceptibles de dégrader la qualité des contrôles surfaciques réalisés en paroi externe. Ces contrôles n'apportaient donc pas une garantie suffisante de l'absence de défaut débouchant en paroi externe. Pour répondre à la recommandation formulée par l'IRSN sur le sujet et la demande de l'ASN afférente [6], EDF a finalement réalisé une étude mécanique concluant à l'absence de risque de rupture brutale pour un défaut conventionnel, de plus grandes dimensions que celui initialement postulé, et détectable par les contrôles volumiques déjà réalisés. L'IRSN considère que cette étude et ses conclusions sont recevables.

3. SÉLECTION ET CARACTÉRISATION DES TRANSITOIRES THERMOHYDRAULIQUES

Compte tenu de la conclusion de l'analyse de l'IRSN portée sur les fonds JCFC, l'analyse du volet thermohydraulique n'est présentée que pour les fonds fabriqués par FLC. Ces derniers équipent uniquement des réacteurs de 900 MWe.

Pour faire suite à l'expertise de l'IRSN menée en 2016 [1], l'ASN a demandé à EDF ([7], [8]) une reprise des caractérisations³ pour plusieurs situations⁴ de 3^e et 4^e catégories susceptibles de provoquer des chocs froids sur les fonds de GV. L'IRSN a donc analysé la sélection et la caractérisation des situations retenues par EDF dans le dossier fonds de GV ségrégués, en portant une attention particulière aux transitoires de 3^e et 4^e catégories sur lesquels portaient les réserves identifiées lors des précédentes expertises.

S'agissant de la sélection des situations, compte tenu des compléments apportés par EDF au cours de l'expertise, l'IRSN considère que les transitoires les plus sévères par catégorie ont bien été identifiés.

³ Évolution temporelle des pressions, températures et débits.

⁴ Les situations de fonctionnement sont classées en 3 catégories (de 2 à 4), selon leur fréquence d'occurrence estimée.

À l'issue de son expertise, l'IRSN n'a pas de remarque quant aux caractérisations retenues par EDF pour les situations de 2^e catégorie. S'agissant des situations de 3^e et 4^e catégories, pour certaines d'entre elles, la température de paroi utilisée dans les analyses mécaniques est calculée directement par l'outil de calcul scientifique (OCS) utilisé⁵. Cette température de paroi est déterminée à l'aide d'un coefficient d'échange thermique entre le fluide et la paroi du GV à partir des corrélations réalistes implémentées dans l'OCS au lieu des corrélations conservatives habituellement retenues. De plus, l'IRSN a émis des réserves quant à la caractérisation retenue pour le transitoire enveloppe⁶ du dossier. **En réponse à ces réserves, EDF a réalisé un calcul complémentaire du transitoire enveloppe, en appliquant un facteur multiplicatif de 2 sur le coefficient d'échange⁷, ce que l'IRSN juge satisfaisant.**

D'une manière générale, l'IRSN considère qu'une pénalisation d'un facteur 2 du coefficient d'échange fluide/paroi en cas de valorisation des températures de paroi évaluées par l'OCS pour les analyses mécaniques devrait être prise en compte, les réserves émises par l'IRSN n'étant pas spécifiques à ce dossier.

Par ailleurs, l'IRSN estime que le caractère enveloppe des transitoires de surpression n'est pas démontré, mais que l'enjeu associé, d'un point de vue mécanique, se révèle *in fine* limité. En effet, pour ces transitoires, la marge vis-à-vis du risque de rupture brutale est notable. Enfin, s'agissant des caractérisations des transitoires enveloppes de type gavé-ouvert⁸ et ceux du domaine complémentaire⁹, l'IRSN estime que les compléments apportés par EDF lors de l'expertise sont satisfaisants.

4. TENUE EN SERVICE DES FONDS DE GV FABRIQUÉS PAR FLC

4.1. PROPRIÉTÉS DE L'ACIER

Les propriétés des zones ségréguées des fonds de GV fabriqués par FLC ont été évaluées à l'aide des résultats de caractérisation de fonds de justification représentatifs des fonds de GV installés sur les réacteurs d'EDF. EDF a regroupé les pièces fabriquées en deux familles suivant leurs conditions de fabrication. Pour chaque famille, au moins un fond de justification, pièce forgée à l'échelle 1, a été caractérisé. Les caractérisations menées ont confirmé que la macroségrégation du carbone reste localisée entre la surface externe et la mi-épaisseur pour l'une des deux familles, mais peut dépasser cette zone pour atteindre les trois quarts de l'épaisseur pour l'autre famille. Les éléments analysés par l'IRSN relatifs aux conditions de fabrication permettent de conclure à la représentativité des fonds de justification au sein de leur famille respective.

Les propriétés de traction, de résilience, de ténacité et la RT_{NDT} dans les zones ségréguées des fonds de justification ont été évaluées par EDF. Pour l'IRSN, les programmes expérimentaux menés par EDF sur ces pièces sont pertinents et suffisants pour établir les données d'entrée nécessaires à l'établissement des justifications mécaniques d'absence de risque de rupture brutale.

Les propriétés des zones ségréguées finalement retenues par EDF n'intégrant pas de provisions complémentaires aux résultats des caractérisations, EDF a complété son dossier pour justifier le caractère enveloppe des valeurs

⁵ Classiquement, la température de paroi est calculée en amont des analyses mécaniques avec des corrélations conservatives à partir des évolutions temporelles de température fluide à la paroi et de débit définies par l'OCS thermohydraulique.

⁶ Transitoire de catégorie 3 de petite brèche primaire de 3 pouces (APRP) sans reprise de la circulation naturelle.

⁷ Pénalisation retenue dans le dossier « Tenue en service des cuves ».

⁸ La conduite en gavé-ouvert consiste à ouvrir les soupapes de décharge du pressuriseur afin de dépressuriser le circuit primaire, et permettre la mise en œuvre de l'injection de sécurité basse pression afin d'évacuer la puissance résiduelle.

⁹ Le domaine complémentaire est constitué de conditions de fonctionnement pour lesquelles EDF a défini des dispositions dites complémentaires qui permettent de ramener à un niveau acceptable les conséquences d'autres initiateurs que ceux pris en compte dans le dimensionnement conventionnel de base, généralement plus complexes.

de ténacité retenues. Compte tenu des éléments apportés par EDF au cours de l'expertise, l'IRSN estime que les propriétés des zones ségréguées des fonds fabriqués par FLC retenues par EDF sont acceptables.

4.2. CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS

Pour démontrer l'absence de défauts plus nocifs que ceux postulés dans les analyses mécaniques, EDF s'appuie sur les résultats des contrôles non destructifs surfaciques et volumiques, réalisés au stade de la fabrication, et ceux réalisés à titre d'expertise sur site en 2016 dans le cadre du traitement de l'anomalie de ségrégation. EDF conclut à l'absence de défaut redouté en fabrication et de défauts postulés dans les études de rupture brutale, pour l'ensemble des fonds de GV concernés.

Pour une partie des fonds fabriqués par FLC, la macroségrégation peut être présente dans l'épaisseur de la zone de transition de tubulure¹⁰ comme cela a été constaté sur le fond caractérisé de justification. L'IRSN considère qu'il est primordial, dans toute zone concernée par la présence excessive de carbone, d'assurer la détection des défauts nocifs, plus particulièrement **lorsqu'ils présentent une orientation parallèle à l'axe de la tubulure**. En l'absence actuelle de contrôle volumique, **l'IRSN estime qu'EDF doit mettre en œuvre des examens renforcés en vue de détecter de tels défauts**. EDF s'est engagé à réaliser une étude de faisabilité en préalable au développement d'un nouveau procédé, avec un point d'avancement prévu fin 2023, ce qui est satisfaisant.

Sous réserve de la mise en œuvre de cet engagement pour une partie des fonds fabriqués par FLC, l'IRSN considère que les moyens d'examen déployés pour vérifier l'absence de défauts en surface et dans le volume sont adaptés et garantissent la détection des défauts de taille minimale pris en compte dans les analyses mécaniques des fonds de GV.

4.3. ANALYSE MÉCANIQUE ET CONCLUSION CONCERNANT LES FONDS FABRIQUÉS PAR FLC

L'IRSN a analysé le risque de rupture brutale des deux familles de fonds de générateur de vapeur de fabrication FLC en considérant notamment les éléments suivants :

- les résultats des analyses réalisées en 2016 ;
- les résultats du programme de caractérisation des matériaux réalisé sur les fonds de justification ;
- les transitoires thermohydrauliques pénalisants ;
- les analyses récentes vis-à-vis du risque de rupture brutale, consécutive à un choc froid, réalisées pour les fonds dont la zone en excès de carbone dépasse la demi-épaisseur externe.

En ce qui concerne les décalages de température de transition fragile – ductile, de manière générale, les caractérisations réalisées sur les fonds de justification ont conduit à des valeurs de décalage moins élevées que celles postulées en 2016 dans la demi-épaisseur externe des fonds de fabrication FLC. Toutefois, la mise en évidence de la ségrégation dans la demi-épaisseur interne d'une des familles de fonds a conduit EDF à réaliser de nouveaux calculs pour justifier l'absence de risque de rupture brutale de ces fonds en cas de choc froid. Ces analyses conduisent à des facteurs de marge supérieurs à 1 pour cette famille de fonds FLC. **À cet égard, des mesures compensatoires supplémentaires dédiées à la limitation des chargements générés par un choc froid ne sont pas nécessaires.**

En considérant le caractère enveloppe des hypothèses retenues sur le décalage de la température de transition ainsi que sur les défauts postulés, l'IRSN estime que l'absence de risque de rupture brutale des fonds ségrégués de fabrication FLC est justifiée.

¹⁰ Les tubulures désignent les tuyaux reliant le fond primaire du GV au circuit primaire. Ces tubulures permettent les entrées et sorties du fluide du GV. La zone de transition de tubulure sépare la zone courante de la tubulure et la zone renforcée présente dans la continuité de la zone centrale.

5. CONCLUSION

La justification de la tenue en service des fonds primaires des générateurs de vapeur de fabrication JCFC et FLC affectés par l'excès de teneur en carbone a amené EDF à transmettre des éléments de justification conséquents depuis la découverte de l'anomalie en 2016.

Compte tenu de l'ensemble des éléments transmis par EDF, l'IRSN conclut à la suffisance des investigations menées par l'exploitant et des résultats expérimentaux disponibles.

L'IRSN considère que l'absence de risque de rupture brutale est justifiée pour les fonds de GV fabriqués par JCFC et FLC concernés. Des mesures compensatoires supplémentaires ou dispositions de suivi supplémentaires de type END n'apparaissent pas nécessaires au regard des conclusions de l'analyse menée par l'IRSN.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au directeur de l'expertise de sûreté