

Fontenay aux Roses, le 5 mars 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2021-00039

---

<b>Objet</b>	<b>EDF - REP - Fonds primaires des générateurs de vapeur fabriqués par Japan Casting &amp; Forging Corporation à partir de lingots de 90 t et 120 t - Ségrégation majeure positive de carbone</b>
<b>Réf.</b>	[1] Rapport ASN CODEP-DEP-2015-037971 et IRSN - 2015-00010 du 16 septembre 2015. [2] Avis ASN - 2017-AV-0298 du 10 octobre 2017. [3] Avis IRSN - 2016-00275 du 5 août 2016. [4] Avis IRSN - 2016-00369 du 30 novembre 2016. [5] Avis IRSN - 2019-00211 du 20 septembre 2019. [6] Saisine ASN - CODEP-DEP-2020-037067 du 16 juillet 2020.

---

En 2015, à la suite de la détection d'une teneur de carbone plus élevée que prévue en partie centrale des calottes de cuve du réacteur EPR de Flamanville, la tenue à la rupture de ces composants a fait l'objet d'une expertise de l'IRSN et d'un avis de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN)[1], [2]). Par la suite, l'ASN a demandé à Électricité de France (EDF) d'identifier les composants du parc de réacteurs nucléaires en exploitation potentiellement affectés par ce même type d'anomalie et de se prononcer quant aux conséquences d'une telle anomalie sur l'aptitude au service de ces composants.

Dans ce cadre, EDF a identifié quarante-trois fonds de générateurs de vapeur (GV) concernés par cette anomalie. Vingt-trois d'entre eux ont été fabriqués par Japan Casting and Forging Corporation (JCFC) et équipent onze réacteurs en fonctionnement. Ces fonds de GV, issus de lingots de 90 ou 120 t, font l'objet du présent avis. Les autres ont été fabriqués par Framatome le Creusot (FLC) et ne sont pas couverts par le présent avis.

L'augmentation de la teneur de carbone de l'acier faiblement allié, de type 18MND5, des fonds forgés se traduit par une augmentation des principales caractéristiques de traction et peut conduire à une diminution de la ténacité<sup>1</sup>. Cette augmentation de la teneur de carbone de l'acier est liée à la présence d'une zone de ségrégation<sup>2</sup>. La ténacité gouverne les études mécaniques du risque de rupture brutale de ces fonds, qui sont impactées par cette anomalie. Plus précisément, en fonction du niveau de ségrégation, la ténacité du matériau peut être plus ou moins diminuée, ce qui se traduit par une augmentation plus ou moins importante de la

---

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

<sup>2</sup> Ségrégation : phénomène d'enrichissement (ségrégation positive) ou d'appauvrissement (ségrégation négative) local en certaines espèces chimiques dites ségrégeantes. Elle peut intervenir à l'échelle microscopique (microségrégation) ou macroscopique (macro-ségrégation ou ségrégation majeure) de l'acier.

température de transition fragile-ductile du matériau, dite  $RT_{NDT}$ <sup>3</sup>. 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. Un risque de rupture brutale des fonds de GV est considéré comme possible 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.

En 2016, un programme expérimental d'ampleur, visant à évaluer, pour les fonds de GV, l'impact de la ségrégation sur la ténacité, a été initié par EDF. Dans l'attente des résultats de ce programme expérimental, EDF avait alors pris comme hypothèses des valeurs forfaitaires de décalage de la  $RT_{NDT}$  dû à la ségrégation de +35 et +70 °C, cette dernière valeur étant enveloppe [3]. Cependant, en l'absence de données permettant de préciser ces valeurs et de l'absence de marge avec un décalage de la  $RT_{NDT}$  dû à la ségrégation de +70 °C, pour certains défauts postulés, des mesures compensatoires relatives aux chocs froids et chauds avaient alors été mises en œuvre. Ces mesures compensatoires, toujours d'application, visent à limiter les chargements mécaniques induits par un choc froid (passage rapide et brutale de la température d'exploitation à une plus faible température par l'injection d'eau froide à 7°C) ou par un choc chaud (arrivée d'eau chaude provenant d'autres parties du circuit primaire que de la boîte à eau des GV) [4]. Ces mesures sont actuellement toujours en vigueur.

Dans le cadre du programme expérimental, pour la famille des fonds issus de lingots de 120 t, deux pièces ont été spécifiquement fabriquées pour les besoins de la démonstration en adaptant les paramètres de fabrication en vue d'exacerber les phénomènes de ségrégation. Pour la famille des fonds issus de lingots de 90 t, deux pièces contemporaines des fonds de GV en service et fabriquées suivant les dispositions usuelles ont été choisies. Ces quatre fonds ont fait l'objet de caractérisations destructives et sont appelés par la suite fonds sacrificiels. EDF exploite ensuite les résultats de ces caractérisations pour les transposer aux fonds en service.

En 2019, l'IRSN a analysé le dossier d'EDF relatif aux propriétés mécaniques des fonds de GV fabriqués par JCFC et issus de lingots de 120 t [5]. Les hypothèses retenues par EDF pour la démarche de caractérisation et de transposition aux fonds de GV en service, en présence de ségrégation de carbone, ont été considérées acceptables. En particulier, à la suite de l'analyse des résultats expérimentaux communiqués par EDF, la majoration de  $RT_{NDT}$  de 35 °C alors retenue par EDF, pour prendre en compte l'évolution des propriétés en zone ségrégée des fonds issus de lingots de 120 t, a été jugé suffisante par l'IRSN.

Depuis, EDF a fourni un travail important, comportant des compléments d'analyse des fonds sacrificiels issus de lingots de 120 t et les résultats de caractérisation des fonds sacrificiels issus de lingots de 90 t, des interprétations métallurgiques et une mise à jour des conclusions relatives aux analyses mécaniques. Compte tenu de ces éléments, EDF conclut à l'impact négligeable de la ségrégation sur les propriétés mécaniques d'intérêt et souhaite ainsi lever les mesures compensatoires pour les réacteurs équipés exclusivement de fonds fabriqués par JCFC.

En réponse à la demande de l'ASN [6], l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a analysé l'ensemble de ces éléments.

Tout d'abord, les programmes expérimentaux relatifs aux fonds sacrificiels issus de lingots de 90 t sont analogues aux programmes réalisés antérieurement dans le cadre des dossiers de justification des pièces forgées en écart de ségrégation et expertisés précédemment par l'IRSN ([1], [5]). **C'est pourquoi la pertinence et la suffisance du programme d'essais pour les fonds de 90 t n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.**

En outre, compte tenu du respect global du même référentiel pour la fabrication de toutes ces pièces issues de lingots de 90 et 120 t et des propriétés mécaniques homogènes pour l'ensemble de ces fonds de GV (sacrificiels

---

<sup>3</sup> Reference Temperature for Nil Ductility Transition (Température de référence de ductilité nulle). Cette grandeur est un indicateur de la transition fragile ductile.

ou en service), l'IRSN considère, comme EDF, que les propriétés mécaniques du fond sacrificiel de 120 t le plus ségrégué sont représentatives de l'ensemble des fonds de GV fabriqués par JCFC.

Par ailleurs, l'ensemble des résultats de caractérisation est considéré suffisant par l'IRSN pour déterminer, avec une bonne confiance, les caractéristiques mécaniques à retenir en données d'entrée des analyses de rupture brutale. Pour l'ensemble des fonds, la ténacité en zone de ségrégation est meilleure qu'en zone de recette<sup>4</sup>.

En ce qui concerne l'analyse des résultats expérimentaux, les propriétés mécaniques des zones de ségrégation des fonds sacrificiels fabriqués par JCFC sont globalement conformes aux requis du RCC-M<sup>5</sup>. Même si quelques valeurs d'allongement à la rupture sont inférieures à la valeur minimale codifiée de 20 %, celles-ci sont néanmoins considérées suffisantes par l'IRSN. Enfin, par rapport à l'analyse de 2019, **le complément de résultats expérimentaux tirés de la caractérisation des deux fonds sacrificiels et l'amélioration des connaissances liées à la métallurgie des pièces fabriquées par JCFC conduisent l'IRSN à ne pas émettre de commentaire sur le choix d'EDF d'un décalage de  $RT_{NDT}$  nul pour tenir compte de la présence de ségrégation de carbone.** En effet, la zone de ségrégation en peau externe se caractérise par une teneur de carbone plus élevée qu'en zone de recette, avec une vitesse de tremp<sup>6</sup> élevée, ce qui conduit à obtenir en surface sur quelques dizaines de millimètres une structure métallurgique enrichie en martensite. La martensite<sup>7</sup> revenue<sup>8</sup> a une meilleure ténacité que la bainite<sup>9</sup> revenue, habituellement obtenue pour ce type de pièces forgées en acier faiblement allié. Néanmoins, celle-ci pourrait vieillir plus rapidement que les structures bainitiques, ce qui pourrait avoir une conséquence défavorable sur le décalage de  $RT_{NDT}$  lié au vieillissement thermique. En l'état actuel des connaissances et dans l'attente de l'ensemble des résultats expérimentaux issus de l'évaluation en cours du vieillissement thermique des zones ségréguées, les décalages de  $RT_{NDT}$  retenus pour le vieillissement thermique n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN. **En outre, la position d'EDF, selon laquelle la prise en compte de la zone ségréguée majeure positive et de son vieillissement thermique ne remet pas en cause les hypothèses du dossier de conception pour l'ensemble des fonds fabriqués par JCFC, est acceptable dans l'attente des résultats du programme de vieillissement en cours.**

Par ailleurs, pour certains fonds, l'absence d'usinage en surface externe, après le traitement thermique final, conduit à laisser en l'état une zone appauvrie en carbone sur quelques millimètres en extrême surface, appelée zone décarburée. EDF a fourni des éléments visant à démontrer l'absence d'impact significatif de cette zone décarburée sur les propriétés des matériaux. **Malgré les faibles teneurs en carbone dans cette zone, l'observation de structures métallurgiques usuelles conduit EDF à conclure à l'innocuité de cette zone décarburée. Pour l'IRSN, ce point n'appelle pas de remarque.**

Pour démontrer l'absence de défauts, EDF s'appuie sur les résultats des contrôles non-destructifs réalisés au stade de la fabrication et sur les résultats des examens non-destructifs réalisés à titre d'expertise sur site en 2016, dans le cadre du traitement de l'anomalie de ségrégation. Sur la base de ces résultats, EDF conclut à l'absence de défauts redoutés en fabrication ou postulés dans les études de rupture brutale. Par conséquent, aucune action de surveillance en service n'est prévue pour les fonds de GV fabriqués par JCFC.

<sup>4</sup> Les essais de recette sont réalisés en fin de fabrication et comprennent tous les essais nécessaires pour démontrer la conformité de la pièce au référentiel en vigueur.

<sup>5</sup> RCC-M : règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires des réacteurs à eau sous pression.

<sup>6</sup> Le traitement thermique de tremp permet de figer la microstructure métallurgique de l'acier.

<sup>7</sup> Microstructure métallurgique formée à des vitesses de refroidissement élevées lors du traitement thermique des aciers trempés.

<sup>8</sup> Le traitement thermique de revenu a pour objectif d'adoucir le matériau et de relaxer les contraintes résiduelles.

<sup>9</sup> Microstructure métallurgique formée à des vitesses de refroidissement intermédiaires lors du traitement thermique des aciers trempés.

L'IRSN considère que la démonstration d'EDF pour s'assurer de l'absence de défauts en face externe de la zone centrale doit être complétée pour les fonds des GV fabriqués par JCFC équipant les réacteurs n° 3 de la centrale nucléaire de Dampierre, n° 1 de la centrale nucléaire de Saint Laurent B, n° 1 et n° 2 de la centrale nucléaire de Civaux et n° 4 de la centrale nucléaire du Tricastin. En effet, seul un usinage au stade final (non réalisé sur ces composants) et des contrôles surfaciques (non réalisés en fin de fabrication sur ces composants) auraient permis de minimiser le risque d'existence de défauts en face externe et en particulier ceux liés aux opérations de fin de fabrication, susceptibles d'ouvrir des décohésions de matière en face externe ou de créer des tapures<sup>10</sup>.

Afin de garantir l'absence de défauts débouchants en face externe, EDF a réalisé des examens complémentaires par ressuage et par un examen ultrasonore TOFD<sup>11</sup>. L'IRSN considère que les performances du ressuage sont limitées pour détecter des défauts débouchants et obstrués par exemple par des oxydes sur une surface non usinée [1]. Le pénétrant du ressuage est alors susceptible de ne pas « mouiller » les décohésions remplies d'oxydes et révélerait moins bien le défaut qui risquerait de ne pas être détecté. En outre, les performances de l'examen ultrasonore TOFD réalisé à partir de la surface externe sont limitées pour détecter des défauts localisés en face externe, car cette méthode présente une zone dite de « moindre détection » dans les premiers millimètres d'épaisseur à partir de la face de contrôle. **Ainsi, pour certains fonds des GV fabriqués par JCFC équipant les réacteurs précédemment cités, l'IRSN considère que les moyens d'examen déployés pour vérifier l'absence de défauts en face externe de la zone centrale des fonds apparaissent inadaptés pour ce composant en exclusion de rupture.**

Par conséquent, pour les fonds de GV n'ayant pas fait l'objet d'un usinage de la surface externe, des défauts potentiellement induits par la fabrication sont susceptibles de ne pas avoir été détectés, ni en fabrication ni lors des examens non destructifs réalisés à titre d'expertise sur site. Enfin, ces zones ne sont pas couvertes par un programme de suivi en service au titre d'un PBMP<sup>7</sup>. **Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, l'IRSN formule une recommandation en annexe visant à détecter et à caractériser d'éventuels défauts de fabrication.**

En conclusion, vis-à-vis des propriétés des 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 vie de VD4 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.** En tout état de cause, l'évaluation du risque de rupture brutale de certains fonds de GV en exploitation fabriqués par JCFC est conditionnée par la réalisation d'examens non destructifs complémentaires.

#### IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

<sup>10</sup> La tapure est une fissuration du métal due aux contraintes d'origine thermique. Elle peut apparaître au chauffage (fissuration à l'intérieur de la pièce) ou au refroidissement (fissuration en peau de pièce).

<sup>11</sup> TOFD : time of flight diffraction.

<sup>12</sup> PBMP : programme de base de maintenance préventive.

## **ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2021-00039 DU 05 MARS 2021**

### **Recommandation de l'IRSN**

L'IRSN recommande qu'EDF réalise des examens non destructifs, autres que par ressuage, en surface externe de la zone centrale de l'ensemble des fonds JCFC concernés par la ségrégation du carbone et non usinée au stade final de la fabrication, dans le but de détecter et de caractériser d'éventuels défauts dus à la fabrication.