

Fontenay aux Roses, le 14 avril 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2021-00056

Objet : EDF - REP - Réacteur n° 4 du Bugey - INB 89 - Tenue à la rupture brutale du fond de générateur de vapeur fabriqué par Framatome le Creusot

Réf. : [1] Décision ASN - CODEP-DEP-2016-048322 du 9 décembre 2016.
[2] Avis IRSN - 2021-00039 du 5 mars 2021.
[3] Saisine ASN - CODEP-DEP-2021-003882 du 2 février 2021.

En 2016, EDF a informé l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) d'une anomalie de teneurs en carbone pour certains fonds primaires de générateurs de vapeur (GV). Ces fonds de GV ont été fabriqués par Framatome Le Creusot (FLC) et Japan Casting and Forging Corporation (JCFC). Ces teneurs en carbone plus élevées que prévues proviennent d'une zone de ségrégation¹ majeure positive localisée notamment en partie externe de ces pièces. Cette anomalie pourrait remettre en cause l'étude du risque de rupture brutale de ces fonds primaires.

Le dossier d'EDF pour le maintien en service de ces fonds, établi en 2016, s'appuyait alors sur :

- une estimation de l'impact de la ségrégation sur les propriétés mécaniques des matériaux, notamment en termes de décalage de la température de transition à ductilité nulle (RT_{NDT}^2), prise en compte pour déterminer la ténacité³ du matériau des fonds de GV dans les analyses du risque de rupture brutale ;
- une vérification de l'adéquation entre les contrôles non destructifs (CND) ou examens non destructifs (END) et les défauts préjudiciables à l'intégrité⁴ des composants en service ;
- la mise en place de mesures compensatoires d'exploitation permettant de modifier certains transitoires thermohydrauliques à l'origine des chargements mécaniques élevés et ainsi de garantir la tenue en service des composants.

¹ 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.

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

³ La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure.

⁴ L'intégrité d'une barrière est définie par le guide n° 22 de l'ASN de la manière suivante : absence d'altération irréversible d'une barrière remettant en cause l'efficacité prévue dans la démonstration de sûreté nucléaire.

Une première analyse de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) avait précédé la tenue en 2016 d'une réunion des experts du Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires. Par la décision citée en référence [1], l'ASN avait alors autorisé EDF à modifier les règles générales d'exploitation des réacteurs concernés afin de mettre en place les mesures compensatoires permettant le maintien en service des GV concernés. Cette décision a permis la poursuite de l'exploitation des réacteurs affectés par cette anomalie.

Afin d'évaluer plus précisément les propriétés des zones ségréguées des fonds de GV en anomalie, EDF et Framatome ont réalisé un programme d'essais sur des composants sacrificiels. L'objectif de ce programme est de confirmer le caractère enveloppe des hypothèses de décalage de RT_{NDT} prises en compte en 2016, et d'actualiser la démonstration d'absence de risque de rupture brutale.

Le réacteur n° 4 du Bugey, objet du présent avis, est équipé de trois fonds de GV concernés par l'anomalie de ségrégation en carbone :

- deux fonds, équipant les GV n° 2 et n° 3, de fabrication JCFC ;
- un fond, équipant le GV n° 1, de fabrication FLC.

Concernant les fonds primaires des GV n° 2 et n° 3 fabriqués par JCFC, EDF a conclu, de son programme d'essais, que la présence de zones ségréguées ne remet pas en cause les hypothèses liées aux propriétés des matériaux prises en compte à la conception. Ces éléments d'EDF ont été analysés par l'IRSN [2]. En conclusion, vis-à-vis des propriétés des matériaux, l'IRSN a considéré 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 60 ans, y compris en prenant en compte des hypothèses enveloppes vis-à-vis du vieillissement thermique.

Concernant le fond fabriqué par FLC, EDF a transmis la synthèse des résultats de son programme d'essais. Par rapport aux hypothèses retenues en 2016, les essais ont mis en évidence la présence d'une ségrégation de carbone pouvant dépasser la mi-épaisseur des fonds de GV, depuis la peau externe, ainsi qu'au niveau des tubulures.

Par la saisine en référence [3], l'ASN demande l'avis de l'IRSN sur l'analyse du risque de rupture brutale pour le fond de GV du réacteur n° 4 du Bugey fabriqué par FLC, dans le cadre du redémarrage de ce réacteur après sa quatrième visite décennale, en considérant les derniers éléments disponibles relatifs notamment aux matériaux et aux CND/END. Par ailleurs, un avis générique de l'IRSN sera émis ultérieurement pour tous les fonds de GV fabriqués par FLC.

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 dans les fonds de GV. Le chargement mécanique de ces défauts est dû aux différents transitoires thermomécaniques à prendre en compte.

1. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX DU FOND DU GV N° 1 DU RÉACTEUR N° 4 DU BUGHEY FABRIQUÉ PAR FLC

Pour évaluer les propriétés des zones ségréguées dans le volume du fond forgé par FLC, EDF a caractérisé de la matière prélevée dans une pièce sacrificielle considérée comme étant représentative et enveloppe. Pour la zone centrale du fond de GV, la ségrégation en carbone s'étend, à partir de la peau externe, jusqu'au trois quarts de l'épaisseur du fond. Pour la zone des tubulures, la ségrégation est enfouie dans l'épaisseur du fond.

Vis-à-vis de cette démarche, l'IRSN a examiné les points suivants : le caractère représentatif du fond sacrificiel par rapport au fond équipant le GV n° 1 du réacteur n° 4 du Bugey, l'étendue de la zone de ségrégation et les valeurs de RT_{NDT} retenues dans les différentes zones impactées par la ségrégation.

Concernant le caractère représentatif du fond sacrificiel par rapport au fond du GV n° 1 du réacteur n° 4 du Bugey, compte tenu de la similitude des procédés de fabrication entre ces deux fonds, **l'IRSN estime que le caractère représentatif du fond sacrificiel est démontré.**

Concernant l'étendue de la zone ségrégée ainsi que les valeurs de RT_{NDT} retenues dans la zone centrale du fond du GV n° 1 du réacteur n° 4 du Bugey, EDF estime que la zone de ségrégation majeure positive n'atteint pas la peau interne et ne s'étend pas à moins de 30 mm de celle-ci. Toutefois, EDF retient, de manière conservatrice, des décalages de température de transition de 15 °C pour analyser le défaut postulé en peau interne, et de 40°C pour analyser le défaut postulé enfoui à 30 mm de la peau interne et celui postulé en peau externe. **L'IRSN estime que les hypothèses retenues quant à l'étendue de la zone de ségrégation et aux valeurs de RT_{NDT} retenues dans la zone centrale sont conservatives par rapport aux résultats expérimentaux acquis sur le fond sacrificiel.**

Dans la zone des tubulures, EDF estime que la ségrégation reste enfouie dans l'épaisseur, à une distance supérieure à 15 mm des peaux interne et externe. Une valeur de décalage de RT_{NDT} de 15 °C est retenue pour étudier les défauts postulés à 15 mm sous les peaux. Aucun défaut débouchant n'est attendu par EDF. L'IRSN estime que le décalage de 15 °C retenu dans la zone des tubulures est acceptable compte tenu des teneurs en carbone mesurées sur le fond sacrificiel et des vitesses de trempe évaluées par EDF dans cette zone. Par ailleurs, les éléments transmis par EDF permettent raisonnablement d'admettre l'absence de ségrégation dans la zone de 15 mm sous la peau interne. En outre, la présence de ségrégation en peau externe des tubulures peut être écartée grâce aux résultats des mesures de teneurs en carbone réalisées en peau externe des zones des tubulures du fond du GV n° 1 du réacteur n° 4 du Bugey. **Cependant, pour l'IRSN, aucun élément dans le dossier d'EDF ne permet de statuer sur le bien-fondé de retenir un défaut enfoui à 15 mm en peau externe. Ce point est analysé par l'IRSN dans le paragraphe relatif à l'analyse du risque de rupture brutale.**

2. CND/END RÉALISÉS SUR LE FOND DU GV N° 1 ET DÉFAUTS RETENUS POUR LES ÉTUDES MÉCANIQUES

Pour EDF, les CND réalisés lors de la fabrication et les END réalisés à titre d'expertise sur site, ainsi que les précautions prises lors de la fabrication, permettent d'exclure raisonnablement la présence d'un défaut de 10 mm × 60 mm (hauteur × longueur) dans toutes les zones considérées. EDF retient alors un défaut ayant ces dimensions dans les analyses mécaniques afin de démontrer leur robustesse.

L'analyse de l'IRSN porte sur le bien-fondé de retenir un défaut de dimensions 10 mm × 60 mm dans les différentes zones concernées par les analyses mécaniques.

2.1. EN ZONE CENTRALE DU FOND DE GV

Les défauts retenus dans les analyses du risque de rupture brutale sont des défauts débouchants en peaux externe et interne (sous revêtement), et un défaut enfoui à 30 mm par rapport à l'interface entre le revêtement et le fond primaire. Selon EDF, ce dernier défaut serait situé à la limite de la zone de ségrégation majeure positive dans la zone centrale du fond.

L'IRSN note que, en peaux externe et interne, des contrôles réalisés par ressuage sur les surfaces usinées et les précautions de fabrication permettent de conclure à l'absence de défauts de dimensions supérieures à 10 mm × 60 mm. **Pour les défauts enfouis à une profondeur de 30 mm en peau interne de la zone centrale, l'IRSN constate qu'aucun contrôle n'a été mis en œuvre au stade final de la fabrication ou, à titre d'expertise, en exploitation, afin de garantir l'absence de défauts de dimensions supérieures à 10 mm × 60 mm dans cette zone.**

2.2. EN ZONE DE TUBULURE

Les défauts retenus dans les zones des tubulures sont des défauts enfouis de 15 mm sous les peaux interne et externe. L'IRSN note que, en zone courante des tubulures, les contrôles ultrasonores permettent de détecter des défauts enfouis situés jusqu'à une distance de 15 mm des peaux externe et interne. Par ailleurs, la détection des défauts débouchants en peaux externe et interne est garantie par les contrôles réalisés par magnétoscopie au stade final de la fabrication. **Par contre, en zone de transition des tubulures, compte tenu de la géométrie du raccordement, EDF ne revendique pas de performances de détection des défauts enfouis d'orientation longitudinale dans le volume de la pièce. Pour cette raison, EDF a déployé des END complémentaires par ultrasons sur les zones de transition des tubulures de certains générateurs de vapeur. L'IRSN constate que de tels END n'ont pas été réalisés sur le fond du GV n° 1 du réacteur n° 4 du Bugey.**

3. ANALYSE DU RISQUE DE RUPTURE BRUTALE DU FOND DU GV N° 1 DU RÉACTEUR N° 4 DU BUGEY

L'objectif d'une analyse du risque de rupture brutale d'un composant est de démontrer d'une part, l'absence d'amorçage de rupture à partir d'un défaut plan connu ou postulé et d'autre part, l'absence d'instabilité de ce même défaut.

Les analyses du risque de rupture brutale sont réalisées pour l'ensemble des situations de fonctionnement du réacteur. Les situations les plus pénalisantes vis-à-vis du risque de rupture brutale dépendent de la position où le défaut est postulé. Il s'agit notamment des situations dites de « choc chaud » pour les défauts situés dans la demi-épaisseur externe, et des situations dites de « choc froid » pour les défauts postulés dans la demi-épaisseur interne. En 2016, les premières analyses avaient conduit EDF à considérer que, pour les fonds fabriqués par FLC, la ségrégation majeure positive aurait été confinée dans la demi-épaisseur externe. Ainsi, l'analyse du risque de rupture brutale des fonds FLC avait été réalisée uniquement pour les défauts postulés dans la demi-épaisseur externe et pour les situations de choc chaud. Les expertises réalisées sur le fond sacrificiel représentatif des fonds FLC ayant montré que la ségrégation positive pourrait dépasser la mi-épaisseur depuis la peau externe, EDF a complété son analyse en postulant des défauts dans la demi-épaisseur interne et a considéré, par conséquent, les situations de choc froid.

Il faut noter que, pour le réacteur n° 4 du Bugey, en raison de la présence de fonds de GV fabriqués par le forgeron JCFC, EDF avait mis en place, dès 2016, des mesures compensatoires à la fois vis-à-vis des risques de chocs chauds et vis-à-vis des risques de chocs froids. Ces mesures sont toujours en vigueur sur ce réacteur et sont prises en compte dans les analyses du risque de rupture fragile du fond de GV du réacteur n° 4 du Bugey fabriqué par FLC.

Dans le domaine de rupture ductile, les essais réalisés par EDF sur les fonds sacrificiels ont montré que les valeurs de résistance à la déchirure ductile obtenues dans la zone ségrégée restent supérieures aux valeurs retenues dans le dossier réglementaire de référence. L'absence de risque de rupture ductile n'est donc pas remise en cause par la présence de ségrégation majeure positive en carbone pour ce fond de GV fabriqué par FLC. **Ainsi, pour le fond du GV n° 1 du réacteur n° 4 du Bugey, seule une analyse du risque de rupture brutale dans le domaine fragile de l'acier a été réalisée par EDF.**

Dans le domaine de rupture fragile ou en zone de transition fragile-ductile, le risque de rupture brutale est évalué à travers le facteur de marge défini comme étant le rapport entre la ténacité du matériau et le facteur d'intensité

de contrainte⁵, après la prise en compte des coefficients de sécurité réglementaires⁶. L'absence de risque de rupture brutale est démontrée si le facteur de marge vis-à-vis de ce mode de ruine est supérieur à 1.

Pour les chargements mécaniques, l'analyse de l'IRSN considère comme données d'entrée les transitoires thermohydrauliques tels que retenus par EDF. En ce qui concerne le caractère enveloppe de ces transitoires pour couvrir l'ensemble des situations de fonctionnement normal et accidentel du réacteur, une expertise est en cours de réalisation par l'IRSN, dans le cadre d'un avis générique. Cet avis analyse notamment la mise à jour de la caractérisation des transitoires de 3^e et 4^e catégories pour laquelle l'IRSN avait émis des réserves ainsi que la mise à jour du dossier au référentiel de la quatrième visite décennale du palier 900 MWe.

En ce qui concerne les défauts analysés par EDF, l'IRSN note qu'aucun défaut plan n'a, à ce jour, été détecté sur le fond du GV n° 1 du réacteur n° 4 du Bugey. L'analyse du risque de rupture brutale a donc été réalisée pour des défauts hypothétiques de 10 mm x 60 mm postulés dans les différentes zones impactées par la ségrégation. L'ensemble des cas analysés par EDF est résumé ci-après :

- en zone centrale, un décalage de RT_{NDT} de 40 °C est retenu pour étudier le défaut débouchant en peau externe ainsi que pour le défaut enfoui à 30 mm de la peau interne (interface métal de base/revêtement). Un décalage de RT_{NDT} de 15 °C est retenu pour étudier le défaut situé en peau interne ;
- en zone de tubulures, un décalage de RT_{NDT} de 15 °C est retenu pour étudier les défauts enfouis de 15 mm sous la peau externe ou sous l'interface du revêtement interne.

Pour l'ensemble de ces cas, les facteurs de marge minimaux obtenus sont supérieurs à 1, ce qui montre, pour EDF, l'absence de risque de rupture brutale de ce fond de GV.

Concernant les CND et les END réalisés par EDF, l'IRSN a identifié un certain nombre de zones qui ne sont pas contrôlées actuellement. Il s'agit notamment de la zone enfouie à une profondeur de 30 mm en peau interne de la zone centrale, et de la zone proche des peaux interne et externe de la zone de transition des tubulures. L'IRSN présente ci-après son analyse quant au risque de rupture brutale associé à des défauts postulés dans ces zones.

Un défaut enfoui est moins nocif vis-à-vis du risque de rupture brutale qu'un défaut débouchant, avec des hypothèses identiques par ailleurs. Ainsi, pour l'IRSN, **les analyses d'EDF permettent également de montrer l'absence de risque de rupture brutale associé aux défauts de mêmes dimensions, mais situés plus profondément dans l'épaisseur par rapport à ceux analysés.**

En ce qui concerne la zone enfouie de la zone centrale, l'IRSN considère effectivement que le risque de rupture brutale est écarté pour un défaut postulé de hauteur 10 mm, localisé entre la peau externe et jusqu'à 30 mm sous la peau interne. Par ailleurs, au vu des facteurs de marge minimaux importants dans ces zones (supérieurs à 1,5), l'IRSN estime que la hauteur du défaut pour lequel le facteur de marge minimal serait égal à 1 est très nettement supérieure à 10 mm. **In fine, l'analyse de l'IRSN confirme un niveau de marge élevé vis-à-vis du risque de rupture brutale induit par des défauts enfouis dans la zone centrale.**

En ce qui concerne la zone de transition des tubulures, la conclusion d'EDF sur l'absence de ségrégation en peaux interne et externe n'a pas été remise en cause par l'IRSN. De même, les éléments présentés par EDF permettent de confirmer le conservatisme de la profondeur d'enfouissement de 15 mm entre la zone ségrégée et la peau

⁵ Le facteur d'intensité de contrainte est un paramètre de la mécanique de la rupture qui représente le niveau de sollicitation subi par la fissure. Il est fonction des chargements externes, des dimensions de la fissure, mais également de certaines propriétés du matériau, notamment la plasticité. Le risque de rupture brutale est exclu si le facteur d'intensité de contrainte reste toujours inférieur à la ténacité du matériau.

⁶ Les coefficients de sécurité réglementaires sont fonction de la catégorie de la situation considérée, mais également du mode de ruine considéré. Ici, le mode de ruine est la rupture fragile ; les coefficients de sécurité réglementaires sont de 2 pour les situations de 2^e catégorie, de 1,6 pour les situations de 3^e catégorie et de 1,2 pour les situations de 4^e catégorie. Les catégories sont définies selon la règle ASN n° IV.l.a du 21 décembre 1984.

interne. Pour la peau externe, aucun élément similaire n'a été porté à la connaissance de l'IRSN. Toutefois, au vu du facteur de marge minimal élevé (proche de 3) obtenu pour le défaut enfoui de 15 mm sous la peau externe, l'IRSN estime que retenir l'hypothèse d'un défaut plus proche de la peau externe ne devrait pas modifier la conclusion quant à l'absence de risque de rupture brutale initié dans cette zone.

Afin de démontrer la robustesse de son dossier, EDF a en outre transmis des analyses complémentaires pour les défauts situés en peau interne. Ainsi, EDF retient une pénalisation supplémentaire sur le décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation dans les différentes zones concernées. Les facteurs de marge obtenus sont supérieurs à 1 pour l'ensemble des situations de fonctionnement normal et accidentel. **Pour l'IRSN, ces analyses complémentaires sont de nature à assurer la robustesse des analyses faites par EDF vis-à-vis de l'absence de risque de rupture brutale du fond équipant le GV n° 1 du réacteur n° 4 du Bugey.**

4. CONCLUSION

L'IRSN a expertisé les éléments transmis par EDF concernant le risque de rupture brutale du fond du générateur de vapeur n° 1 du réacteur n° 4 du Bugey. L'IRSN a analysé l'acceptabilité des caractéristiques des matériaux retenues par rapport aux résultats des essais réalisés sur un fond de GV représentatif, la cohérence entre les dimensions du défaut hypothétique postulé et les contrôles réalisés lors de la fabrication, les examens non destructifs réalisés sur site, et les analyses du risque de rupture brutale dans les différentes zones impactées par la ségrégation en carbone. **À l'issue de son expertise, l'IRSN a la raisonnable assurance que le risque de rupture brutale du fond équipant le GV n° 1 du réacteur n° 4 du Bugey peut être écarté, dans les conditions de fonctionnement actuelles, avec les mesures compensatoires toujours en vigueur.**

IRSN

Le Directeur général

Par délégitation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté