



Fontenay-aux-Roses, le 23 septembre 2020

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2020-00142

Objet : Anomalie TTD - Générateurs de vapeur de remplacement.
Programme de caractérisation complémentaire de la ZAT de soudage et caractérisation des contraintes résiduelles.

Réf. : [1] Saisine ASN - CODEP-DEP-2020-031918 du 16 juillet 2020.
[2] Avis IRSN 2020-00021 du 10 février 2020.
[3] Avis IRSN 2020-00066 du 30 avril 2020.
[4] avis IRSN 2020-00103 du 2 juillet 2020.
[5] Arrêté du 30 décembre 2015 modifié relatif aux équipements sous pression nucléaires et à certains accessoires de sécurité destinés à leur protection.

Dans le cadre du traitement de l'écart relatif aux procédés de traitement thermique de détensionnement locaux (TTD), réalisés sur des assemblages permanents d'équipements en cours d'évaluation de la conformité, par lettre citée en référence [1], l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) a demandé l'avis et les observations de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) sur le programme expérimental permettant d'évaluer les propriétés de la zone affectée thermiquement (ZAT) de soudage et sur le complément bibliographique visant à préciser les hypothèses du fabricant relatives à la prise en compte des contraintes résiduelles.

1. CONTEXTE

En 2019, le fabricant de générateurs de vapeur (GV) en exploitation a déclaré une anomalie dans la réalisation des traitements thermiques de détensionnement (TTD) de joints soudés de ces composants. Plusieurs technologies de mise en oeuvre du TTD sont concernées, dont la technologie dite « par moufles », constituées de résistances électriques. Un TTD est considéré conforme par le fabricant lorsqu'il est réalisé entre 595 °C et 620 °C. Les zones soumises à une température de TTD inférieure à 595 °C sont considérées en sous-revenu. Les zones soumises à une température de TTD supérieure à 620 °C sont considérées en sur-revenu. Des simulations numériques du comportement thermique des zones concernées ont permis au fabricant de retenir une plage de températures du TTD en écart comprises entre 500 °C et 700 °C, pour un TTD réalisé à l'aide de moufles. Pour le fabricant, cette plage de températures est considérée enveloppe des températures générées par l'ensemble des procédés de traitement thermique de détensionnement ayant généré un écart.

En cas de sur-revenu, une baisse des propriétés de traction et de résilience est attendue. Le fabricant a présenté des décotes de propriétés mécaniques afin de prendre en compte ces effets. En cas de sous-revenu, une augmentation du niveau des contraintes résiduelles est attendue en raison d'un détensionnement insuffisant. Ainsi, les analyses de risque de rupture brutale, de déformation excessive, d'instabilité plastique et de déformation progressive doivent être remises à jour en tenant compte des propriétés des matériaux en écart.

En 2020, l'IRSN a réalisé une analyse des éléments transmis par l'exploitant concernant la tenue mécanique des GV en service concernés par cet écart. Cette analyse a porté sur la simulation numérique du traitement thermique, les propriétés des matériaux, les contrôles non-destructifs et le comportement mécanique des composants installés sur site et concernés par l'écart. Dans ce cadre, l'IRSN a émis les avis en références [2] à [4] et formulé cinq recommandations et une observation abordant les propriétés des matériaux. Les recommandations sont rappelées en annexe 1.

Des écarts de réalisation de traitements thermiques de détensionnement ont également été déclarés par le fabricant de ces composants pour des GV destinés à équiper des réacteurs en exploitation, notamment les GV identifiés RP/385, RP/390 et RP/391 alloués au réacteur n° 6 de la centrale nucléaire de Gravelines. Le TTD du joint TIF (joint situé entre la virole basse et la virole médiane) du GV RP/385 a été réalisé avec des moufles équipés de résistances électriques chauffantes. Les effets d'un sous-revenu et d'un sur-revenu sont à considérer pour ce joint. Les joints PIF (joints situés entre la plaque à tubes et le fond primaire) de ces trois GV ont été traités par une autre technologie dite « par panneaux céramiques », également concernée par la déclaration d'un écart. D'après le fabricant, la plage de températures à retenir pour caractériser le TTD réalisé à l'aide de cette technologie est comprise entre 500 °C et 620 °C. Ainsi, seuls les effets du sous-revenu sont à considérer pour les joints PIF de ces trois GV.

Compte tenu de la similitude des procédés de fabrication employés et du caractère enveloppe de la plage de températures retenue pour caractériser l'écart de réalisation des TTD réalisés à l'aide de moufles, les recommandations émises par l'IRSN pour les GV en service sont également applicables aux GV en cours de fabrication.

Dans le cadre de l'attestation de conformité des trois GV destinés à équiper le réacteur n° 6 de la centrale nucléaire de Gravelines, un programme de caractérisation spécifique est en cours de réalisation. Les propriétés des matériaux (le métal de base, le métal déposé par soudage et la ZAT de soudage) ont été évaluées à partir de coupons de matière provenant de la fabrication du GV/RP 385. Les résultats obtenus montrent que les décotes précédemment définies pour les GV en exploitation sont suffisantes pour tenir compte des baisses de propriétés du métal de base. Le fabricant a également transmis les résultats de caractérisation de métal déposé et de ZAT traités à des températures comprises entre 500 °C et 700 °C. Ces résultats proviennent de la caractérisation du coupon témoin du joint TIF du GV RP/385, coupon témoin soudé à partir de tôles. Les résultats de caractérisation du métal déposé se sont révélés conformes aux exigences réglementaires [5]. Le fabricant a observé une absence d'impact du sous-revenu à 500 °C sur les propriétés mécaniques de la ZAT. En revanche, les premiers résultats tirés de la caractérisation de la ZAT traitée à 700 °C se situent en deçà des requis réglementaires [5], notamment en ce qui concerne les énergies de flexion par choc à 0 °C. Des expertises ont été menées par le fabricant afin d'expliquer ces résultats. Suite à ce constat, le fabricant a défini un programme d'essais complémentaires dédié à une détermination plus exhaustive des propriétés de la ZAT sur-revenue. Les résultats de ce programme d'essais seront exploités pour le traitement des écarts des GV en exploitation et des GV en cours de fabrication dont le TTD a été réalisé à l'aide de moufles équipés de résistances électriques.

Par ailleurs, dans le cadre de la prise en compte des contraintes résiduelles générées par la mise en œuvre d'un sous-revenu, le fabricant justifie l'absence de contraintes résiduelles de traction en peau interne des joints PIF, pour les équipements en service ainsi que ceux en cours de fabrication, sur la base d'une synthèse bibliographique qui présente les résultats d'études académiques ou industrielles.

Dans le cadre de l'instruction de la conformité réglementaire du GV RP/385, l'ASN a souhaité obtenir l'avis de l'IRSN sur les sujets suivants [1] :

- la pertinence du programme d'essais et d'expertise prévu par le fabricant et son caractère suffisant pour caractériser les propriétés des matériaux de l'assemblage permanent ;
- la recevabilité des conclusions portées par la synthèse bibliographique transmise par le fabricant et concluant à l'absence de contraintes résiduelles de traction en peau interne des joints PIF.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL D'ÉVALUATION DES PROPRIÉTÉS DE LA ZAT

Certains résultats individuels d'énergie de flexion par choc se sont révélés inférieurs à la valeur minimale requise par la réglementation : 60 J à 0 °C [5]. Les expertises métallurgiques conduites par le fabricant ont permis d'identifier une zone singulière, à 2,5 mm de la ligne de fusion. D'après le fabricant, ces observations sont susceptibles d'expliquer les résultats de résilience non conformes à la réglementation.

Le programme complémentaire proposé par le fabricant vise à établir les propriétés mécaniques d'une ZAT traitée thermiquement à 700 °C. Ce programme expérimental utilisera de la matière provenant d'une maquette assemblée à partir de deux viroles de production, selon des conditions de soudage représentatives d'un joint TIF soudé par le procédé fil/flux. Le choix d'une telle configuration vise, d'après le fabricant, à caractériser une ZAT représentative de celles des équipements concernés par l'écart de TTD. Ce programme comporte deux volets. Le premier comprend la détermination de la température de transition à ductilité nulle, appelée RT_{NDT} , en ZAT, au quart-épaisseur du joint soudé à 1 mm de la ligne de fusion et éventuellement dans la zone de fragilité accrue, à 2,5 mm de la ligne de fusion. De plus, douze courbes de transition de résilience seront établies en ZAT de soudage pour 4 localisations dans l'épaisseur du joint soudé et à 3 distances de la ligne de fusion : 1 mm, 2,5 mm et 4 mm. Il est communément admis que les propriétés de la ZAT sont supérieures à celles du métal de base. Ainsi, les résultats en ZAT seront comparés à une courbe de transition de résilience établie au quart-épaisseur du métal de base ayant subi un TTD nominal. Le second volet du programme comprend deux séries d'essais de ténacité. La localisation de prélèvement des éprouvettes de ténacité sera définie à l'issue des résultats du premier volet du programme.

La faiblesse des propriétés de résilience de la ZAT représente un risque vis-à-vis de l'intégrité des GV dans la mesure où la ZAT traverse l'ensemble de l'épaisseur du composant. La baisse des propriétés de la ZAT représente donc un risque vis-à-vis de la rupture brutale du GV. Le programme d'essais proposé par le fabricant comprend la réalisation d'essais mécaniques conventionnels et la réalisation d'une campagne d'évaluation de la ténacité en ZAT. La méthodologie retenue par l'exploitant permettra de confirmer ou d'infirmer l'existence de la zone singulière suspectée d'être à l'origine de la baisse des propriétés de résilience. Ainsi, l'IRSN considère ce programme pertinent. Le bon comportement global de la ZAT de soudage, dans des conditions représentatives de l'assemblage final, nécessiterait cependant d'être vérifié en réalisant, par exemple, un essai de pliage¹ sur le coupon assemblé, si la quantité de matière disponible le permet. **L'IRSN formule à cet égard l'observation n° 1 en annexe 2.**

¹ Essai destructif spécifique aux joints soudés permettant d'évaluer l'aptitude à la déformation plastique par pliage d'une éprouvette prélevée dans l'assemblage.

De plus, selon l'IRSN, la détermination de la RT_{NDT} , en ZAT devrait être réalisée en priorité au droit de la zone qui serait identifiée par le fabricant comme la plus fragile à la suite du sur-revenu. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 2 en annexe 2.**

En conclusion, le programme d'essais est considéré suffisant par l'IRSN.

3. PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES EN PEAU INTERNE DES JOINTS PIF

La soudure appelée joint PIF assemble la plaque tubulaire et le fond primaire des GV. Le chanfrein de soudage a une géométrie en forme de double U. Cette soudure est complétée par un revêtement en acier inoxydable en partie interne du GV.

Pour les GV, lorsque le TTD est réalisé conformément au référentiel de fabrication, les contraintes résiduelles ne sont pas prises en compte dans les études mécaniques. En cas de sous-revenu, le détensionnement des soudures peut être insuffisant pour conserver cette hypothèse. Ainsi, l'IRSN considère qu'un niveau de contraintes résiduelles non nul est à considérer dans les études mécaniques dans le cadre du traitement de cette anomalie.

Dans le cadre de la justification de la tenue mécanique des GV en exploitation concernés par l'écart de TTD, des éléments bibliographiques ont été transmis à l'IRSN en vue de démontrer, notamment, que les contraintes résiduelles sont de compression en peau interne du joint soudé, à l'interface avec le revêtement en acier inoxydable, après TTD.

À la suite de son analyse, l'IRSN a considéré ces éléments pertinents mais insuffisants. En effet, le chanfrein de soudage en double U du joint PIF conduit à obtenir des contraintes de traction en racine du joint soudé, correspondant à la peau interne du GV. L'IRSN a considéré que le niveau de compression engendré par la pose du revêtement pourrait ne pas être suffisant pour mettre en compression après TTD la peau du métal de base, en interface avec ce revêtement, et a formulé une recommandation sur ce point (recommandation n° 2 de l'avis en référence [4]). Cette recommandation est rappelée en annexe 1.

Le fabricant a ensuite complété les éléments de justification en fournissant une synthèse de résultats d'études expérimentales ou numériques.

L'IRSN note que cette synthèse contient une partie importante de résultats issus de simulations numériques. Le fabricant ne précise pas les détails méthodologiques de ces calculs. L'évaluation des contraintes résiduelles fait appel à des méthodes indirectes et les paramètres mis en jeu, tels que les conditions de soudage et les transformations métallurgiques, sont complexes. Ces simulations numériques permettent certes de décrire une tendance globale de l'évolution des contraintes résiduelles dans un joint soudé. Cependant, l'IRSN constate que, dans certains cas, les résultats de simulation présentent des différences de plusieurs centaines de MPa pour un même cas d'étude en fonction des hypothèses adoptées. Dans ces conditions, l'IRSN considère qu'un niveau de confiance suffisant ne peut pas être accordé aux résultats des calculs.

La synthèse transmise par l'exploitant contient également des résultats expérimentaux de valeurs de contraintes résiduelles mesurées à l'interface entre un revêtement en acier inoxydable et de l'acier ferritique. Une partie de ces résultats est issue d'études menées dans des configurations considérées par l'IRSN non représentatives de l'assemblage en écart, notamment en termes de nuances d'aciers ou de conditions de soudage. Les différentes études montrent néanmoins des résultats concordants : des contraintes résiduelles de traction dans le revêtement, des contraintes résiduelles de compression dans les premiers millimètres de l'acier ferritique. Cependant, à l'échelle de quelques millimètres à l'interface entre le revêtement et l'acier ferritique, la différence du niveau des contraintes résiduelles évaluées dans les différentes études est importante, de l'ordre de 200 MPa.

L'IRSN considère qu'une telle variation, dans cette zone de gradient de propriétés élevé, peut conduire à conserver des contraintes résiduelles de traction en peau de l'acier ferritique, au plus proche du revêtement en acier inoxydable. De plus, la pertinence et la robustesse des méthodes expérimentales conduisant à obtenir les résultats présentés par le fabricant nécessitent d'être démontrées.

Ainsi, l'IRSN considère que les nouveaux éléments bibliographiques présentés ne permettent pas de conclure à l'absence de contraintes résiduelles de traction en peau interne des joints PIF.

Pour le Directeur général et par délégation,
Frédérique PICHEREAU
Adjointe au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE 1 A L'AVIS IRSN N° 2020-00142 DU 23 SEPTEMBRE 2020

Rappel de recommandations issues d'avis antérieurs de l'IRSN

Rappel de la recommandation n° 1 de l'avis IRSN n° 2020-00021 du 10 février 2020

L'IRSN recommande qu'EDF intègre à son programme expérimental la caractérisation de l'impact de l'écart de traitement thermique de détensionnement sur les propriétés mécaniques d'un assemblage soudé entre viroles en acier de nuance 20 MND5.

Rappel de la recommandation n° 2 de l'avis IRSN n° 2020-00021 du 10 février 2020

L'IRSN recommande qu'EDF effectue des mesures de contraintes résiduelles sur la maquette à l'échelle 1 dédiée à leur évaluation dans les zones de sur-revenu ainsi que dans les zones en conformité de traitement thermique, afin de justifier l'absence de prise en compte de contraintes résiduelles dans ces zones.

Rappel de la recommandation n° 3 de l'avis IRSN n° 2020-00021 du 10 février 2020

L'IRSN recommande qu'EDF procède à l'inventaire des éventuelles réparations des soudures des équipements en exploitation concernés par l'écart de traitement thermique de détensionnement, et, à moins de pouvoir prouver l'absence totale de telles réparations, inclue à son programme expérimental des essais permettant d'évaluer les contraintes résiduelles dans les zones réparées.

Rappel de la recommandation n° 1 de l'avis IRSN n° 2020-00103 du 2 juillet 2020

L'IRSN recommande que l'exploitant prévoie des mesures sur maquette à l'échelle 1 des contraintes résiduelles en peau externe et en peau interne, afin de justifier les hypothèses relatives aux contraintes résiduelles des zones en sous-revenu retenues dans son dossier d'analyse du risque de rupture brutale des joints soudés en écart de traitement thermique de détensionnement.

Rappel de la recommandation n° 2 de l'avis IRSN n° 2020-00103 du 2 juillet 2020

L'IRSN recommande que l'exploitant révise l'analyse du risque de rupture brutale des zones en sous-revenu des joints PIF, des joints avec réparation, du joint final du GV/PL203 du réacteur n° 2 de Paluel et des zones d'intersection des joints longitudinaux de ce générateur de vapeur avec le joint final, en considérant des contraintes résiduelles de traction en leur peau interne, d'un niveau cohérent avec celui déjà retenu en peau externe.

ANNEXE 2 A L'AVIS IRSN N° 2020-00142 DU 23 SEPTEMBRE 2020

Observations de l'IRSN

Observation n° 1

L'IRSN considère que, dans le cadre de la réalisation de son programme expérimental visant à évaluer les propriétés de la zone affectée thermiquement (ZAT) soumise à une température de TTD supérieure à la température maximale autorisée, le fabricant devrait intégrer un essai de pliage du joint soudé centré sur la ZAT.

Observation n° 2

L'IRSN considère que, dans le cadre de la réalisation de son programme expérimental visant à évaluer les propriétés de la ZAT soumise à une température de TTD supérieure à la température maximale autorisée, le fabricant devrait évaluer la RT_{NDT} en priorité à une distance de la ligne de fusion correspondant à la zone la plus fragile de l'assemblage.