



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

**IRSN**  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 3 mai 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2021-00069

**Objet :** Anomalie TTD – Générateur de vapeur de remplacement GV/RP385 - Programme de caractérisation en ténacité de la ZAT de soudage.

**Réf. :** [1] Saisine ASN - CODEP-DEP-2020-003469 du 20 janvier 2021.  
[2] Saisine ASN - CODEP-DEP-2020-031918 du 16 juillet 2020.  
[3] Avis IRSN 2020-00142 du 23 septembre 2020.

Dans le cadre du traitement de l'écart relatif aux procédés de traitement thermique de détensionnement locaux (TTD)<sup>1</sup>, réalisés sur des assemblages permanents d'équipements en cours d'évaluation de la conformité, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), par la lettre en référence [1], a sollicité l'avis de l'Institut de Radioprotection et de sûreté Nucléaire (IRSN) sur le programme expérimental permettant d'évaluer les propriétés en ténacité<sup>2</sup> de la zone affectée thermiquement (ZAT) de soudage. En particulier, la saisine en référence [1] porte sur l'écart relatif au TTD réalisé avec des équipements dits « moufles » équipés de résistances électriques chauffantes au niveau du joint TIF (joint situé entre la virole basse et la virole médiane) du générateur de vapeur (GV) de remplacement identifié RP/385 et destiné au réacteur n° 6 de Gravelines.

### 1. CONTEXTE

Le traitement thermique de détensionnement a pour objectif de restaurer les propriétés du métal altéré par le soudage et de relaxer les tensions internes (contraintes de traction ou de compression) apparues lors du soudage. Les caractéristiques principales définissant un TTD sont un couple durée d'application (t)-température (T). Pour le type de soudures considéré, pour un TTD conforme, la température de maintien visée est comprise entre 595°C et 620°C pendant un temps de maintien d'environ 3 heures. Dans le cas d'un écart, on parle de sous-TTD pour les zones ayant observé une température inférieure à 595°C et de sur-TTD pour les zones ayant subi une élévation de température au-delà de 620°C.

En 2019, des écarts de réalisation des TTD sur les joints soudés de GV destinés à équiper des réacteurs en exploitation, notamment le GV identifié RP/385 destiné au réacteur n° 6 de Gravelines, ont été déclarés par le fabricant à l'ASN. En particulier, les effets d'un sous-TTD et d'un sur-TTD sont à considérer pour le joint TIF du

<sup>1</sup> Le traitement thermique de détensionnement consiste à maintenir la soudure à une température fixée pendant une certaine durée.

<sup>2</sup> La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation progressive d'une fissure.

MEMBRE DE  
**ETSON**

GV RP/385, objet de la saisine de l'ASN en référence [1]. 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.

En 2020, en réponse à la saisine de l'ASN en référence [2], l'IRSN a examiné le premier programme expérimental fourni par le fabricant [3]. Ce premier programme expérimental, réalisé sur des assemblages témoins<sup>3</sup>, a permis de déterminer que :

- l'effet d'un sur-TTD sur les propriétés mécaniques finales de la pièce est plus néfaste qu'un sous-TTD ;
- la zone présentant les propriétés mécaniques les plus détériorées se situe autour de la ZAT de soudage.

À la suite de ce premier programme, le fabricant a entrepris la réalisation d'un second programme expérimental sur une maquette représentative afin de caractériser le comportement mécanique autour de la ZAT et de confirmer le caractère enveloppe du décalage de température de transition fragile-ductile ( $RT_{NDT}^4$ ) de 35°C postulé.

La construction du dossier de synthèse de ce programme expérimental, scindé en deux volets, est résumée comme suit :

- un premier volet est constitué d'essais de dureté autour de la ZAT afin de déterminer les zones les plus impactées, ainsi que des essais de résilience<sup>5</sup> sur les zones identifiées les plus singulières en dureté. Deux zones particulières sont alors sélectionnées pour le volet 2 ;
- un deuxième volet est constitué d'essais de ténacité dans le domaine de transition<sup>6</sup> et le domaine ductile<sup>7</sup>.

En complément de ces essais mécaniques, un programme de caractérisation microstructurale sur les assemblages témoins de soudage en sur-TTD a été entrepris.

Dans le cadre de l'attestation de conformité du GV/RP385, l'ASN a demandé à l'IRSN d'expertiser les résultats du volet 2 du programme expérimental et les conclusions du fabricant « *dans l'objectif d'assurer une prévention robuste des dommages de rupture* ». Les résultats associés au volet 1 feront l'objet d'une expertise ultérieure, décorrélée du cadre de l'évaluation de conformité du GV/RP385.

## 2. RÉSULTATS DES ESSAIS DE DURETÉ ET DE RÉSILIENCE

L'analyse des résultats des essais du volet 1 n'entre pas dans le cadre du présent avis. Néanmoins, il convient de présenter les conclusions obtenues par le fabricant dans la mesure où elles justifient le choix de la zone d'examen retenue pour le volet 2.

L'analyse des résultats des essais du volet 1 a montré que :

- une zone particulièrement dure est située entre 0 et 1 mm de la ligne de fusion ; elle est suivie d'un plateau de dureté dans lequel ont été observées ponctuellement des élévations de dureté entre 3 mm et 4 mm ;
- la zone située entre 3 mm et 4 mm de la ligne de fusion présente les résultats de résilience les plus faibles tandis que la zone à 1 mm présente des résultats acceptables.

<sup>3</sup> Les assemblages témoins sont des assemblages réalisés dans les mêmes conditions, par les mêmes soudeurs, au même moment et avec les mêmes produits que les assemblages soudés qui ont été installés sur la centrale. Ils ont pour objectif d'apporter des garanties quant à la maîtrise dans le temps des procédés de soudage.

<sup>4</sup> Reference Temperature for Nul Ductility Transition (Température de référence à ductilité nulle). Cette grandeur est un indicateur de la transition fragile ductile.

<sup>5</sup> La résilience est la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie quand il se déforme sous l'effet d'un choc en présence d'une entaille.

<sup>6</sup> Domaine dans lequel le matériau a un comportement intermédiaire entre fragilité (pas de plasticité) et comportement plastique.

<sup>7</sup> Domaine dans lequel la rupture du matériau est totalement plastique (la plasticité est la déformation irréversible du matériau).

Ainsi, le fabricant a sélectionné la zone située entre 3 mm et 4 mm de la ligne de fusion pour les essais du volet 2.

### 3. RÉSULTATS DU VOLET 2 ET CARACTÉRISATION MICROSTRUCTURALE

#### 3.1. RESULTATS DU VOLET 2

Les essais ont été réalisés selon la norme ASTM<sup>8</sup>. Les résultats des essais de mesure de ténacité dans le domaine ductile effectués à 3 mm et 4 mm de la ligne de fusion ont présenté des valeurs supérieures au minimum requis par les règles du code de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires (RCC-M).

**Pour l'IRSN, les résultats de ténacité dans le domaine ductile obtenus par le fabricant sont satisfaisants.**

Dans le domaine de transition fragile-ductile, deux séries de vingt essais ont été réalisées à 3 mm et 4 mm de la ligne de fusion. Les valeurs obtenues par le fabricant, bien que plus faibles que celles déterminées dans le métal de base, sont toutes supérieures à la courbe de ténacité obtenue à partir d'une  $RT_{NDT}$  augmentée de 35°C, hypothèse retenue dans les calculs support des analyses à la rupture brutale effectués en amont du programme expérimental.

**L'IRSN constate que le nombre d'essais effectués (vingt par zone) est conforme à la norme utilisée, mais reste inférieur à celui d'essais de caractérisation similaires réalisés sur d'autres composants en écart (par exemple les fonds ségrégés des générateurs de vapeur).**

**En tout état de cause, les résultats mécaniques obtenus dans le cadre du volet 2 du programme expérimental ne remettent pas en cause le décalage de  $RT_{NDT}$  de 35°C postulé par le fabricant et l'utilisation de la courbe de ténacité correspondante dans les analyses à la rupture brutale.**

#### 3.2. CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE

La campagne d'observation microstructurale a démontré la présence d'une structure particulière dans les zones en sur-TTD comparativement aux zones ayant subi un TTD conforme. En effet, dans une zone en TTD conforme, la seule précipitation<sup>9</sup> identifiée est une population de carbures<sup>10</sup> de taille nanométrique cohérents<sup>11</sup>. Dans le cas d'un sur-TTD, la microstructure observée présente une diminution de la fraction volumique de ces carbures nanométriques et la précipitation de carbures micrométriques incohérents aux alentours des joints de grain<sup>12</sup>. Ces précipités micrométriques très durs présentent autour d'eux une zone de dureté amoindrie, appelée zone douce.

La localisation des carbures micrométriques a été identifiée par le fabricant entre 1,5 mm et 4 mm de la ligne de fusion. D'après le fabricant, le nombre de ces carbures est particulièrement élevé autour de 3 mm. Des examens métallographiques réalisés par le fabricant ont permis de cartographier une large zone située entre 2 et 3 mm de la ligne de fusion. Ils ont permis de révéler une distribution homogène de précipités de taille régulière, confirmant le caractère homogène de la précipitation dans cette zone de la ZAT.

<sup>8</sup> American Society for Testing Material.

<sup>9</sup> Phase métallurgique en présence dans une matrice métallique.

<sup>10</sup> Précipité de composition chimique métal-carbone.

<sup>11</sup> La cohérence est la notion de continuité du réseau cristallin entre deux phases cristallographiques différentes. Une continuité cristallographique (cohérence partielle) implique une déformation du réseau et résulte généralement en un durcissement du matériau. Inversement, une discontinuité du réseau (incohérence) peut être perçue comme un « vide » au niveau des phénomènes régissant la plasticité du matériau et dégrader ses propriétés mécaniques.

<sup>12</sup> Un grain est un cristal continu. Les métaux sont constitués de grains partiellement reliés entre eux. Les interfaces entre les grains sont appelées les joints de grain.

Pour l'IRSN, les éléments apportés permettent d'écarter l'éventualité d'une zone étendue de surconcentration en précipités de carbures micrométriques qui pourrait remettre en cause la validité des mesures de ténacité.

## 4. CONCLUSION

En conclusion de son analyse, l'IRSN estime que l'ensemble des éléments présentés par le fabricant permettent de conclure que les mesures de ténacité qu'il a réalisées sont bien représentatives de la ZAT de soudage du joint TIF du GV identifié RP/385. Ces valeurs de ténacité ne remettent pas en cause le décalage de  $RT_{NDT}$  de 35°C postulé par le fabricant et l'utilisation de la courbe de ténacité correspondante dans ses analyses à la rupture brutale, ce qui permet d'assurer une prévention robuste des dommages de rupture.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté



FREDERIQUE

PICHEREAU

2021.05.03

16:43:57 +02'00'