



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

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

Fontenay-aux-Roses, le 14 juin 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2023-00085

---

**Objet :** EDF – Paliers 900 MWe, 1300 MWe et EPR – Traitements thermiques de détensionnement locaux – Analyse de la validité des modèles numériques.

---

**Réf. :** Saisine ASN – CODEP-DEP-2021-042691 du 20 décembre 2021.

---

Dans le cadre du traitement de l'écart, déclaré par EDF en septembre 2019, relatif au non-respect des plages de températures spécifiques lors de traitements thermiques de détensionnement (TTD) de soudures d'équipements sous pression nucléaires réalisés par un dispositif de chauffage local composé de mouffles équipés de résistances électriques (dit écart TTD), l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé à EDF d'analyser l'impact de potentiels gradients thermiques « spatiaux » sur le détensionnement des joints soudés. Les résultats des mesures réalisées sur une maquette représentative ont mis en évidence la présence de contraintes axiales induites par la flexion thermique locale dans la zone où le TTD est appliqué. En effet, le procédé de TTD local induit, en écart TTD ou non, des dilatations différentielles locales dans le joint qui génèrent des contraintes de flexion après son refroidissement.

Pour rappel, les équipements concernés par l'écart TTD local sont :

- pour le parc en exploitation, les joints soudés de certains générateurs de vapeur (GV) et des soudures de raccordement des circuits ARE<sup>1</sup> et VVP<sup>2</sup> aux tubulures des GV ;
- pour l'EPR de Flamanville 3 (EPR FA3), certains joints soudés des GV et du pressuriseur, ainsi que des soudures des tuyauteries du circuit secondaire principal (CSP).

On distingue l'écart de type « sous-TTD » (plage de température appliquée inférieure à la plage de température souhaitée) qui induit des contraintes résiduelles<sup>3</sup> significatives dans le joint soudé et l'écart de type « sur-TTD » (plage de température appliquée supérieure à la plage de température souhaitée) qui, en plus des contraintes résiduelles induites, conduit à un abaissement irréversible des propriétés mécaniques du joint soudé. La présence de cet écart peut remettre en cause les analyses du comportement mécanique des équipements concernés.

---

<sup>1</sup> Circuit d'alimentation normale en eau des générateurs de vapeur.

<sup>2</sup> Tuyauteries vapeur principales.

<sup>3</sup> Les contraintes résiduelles sont des contraintes situées à l'intérieur des matériaux qui existent en l'absence de chargement extérieur.

MEMBRE DE  
**ETSON**

Pour les équipements dont des joints soudés ont déjà été détensionnés par procédés TTD locaux – équipements neufs faisant l’objet d’une évaluation de conformité ou équipements déjà en service – le premier enjeu est l’estimation du niveau des contraintes résiduelles induites dans ces joints, afin d’évaluer leur impact sur les hypothèses retenues dans les études de comportement mécanique de ces équipements.

Des investigations ont été menées par EDF pour estimer le niveau de contraintes résiduelles atteint sur chaque type de joint en tenant compte du type de procédé de TTD local appliqué et de sa mise en œuvre spécifique. Ces investigations sont basées sur des comparaisons calculs – essais, réalisées sur différents types de maquettes (avec ou sans joint soudé).

Par la lettre en référence, l’ASN a demandé l’avis de l’Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur la validité des modèles numériques mis en place pour évaluer les contraintes résiduelles induites lors d’un TTD, et notamment sur les lois de comportement mécanique établies à partir des programmes de caractérisation des matériaux et les hypothèses de modélisation numérique, eu égard aux mesures de contraintes résiduelles réalisées sur les maquettes.

### Caractérisation des matériaux

Un programme de caractérisation mécanique du comportement élasto-viscoplastique d’une sélection de six matériaux (métal de base et produit d’apport) a été réalisé par EDF afin de couvrir à la fois le cas des GV (nuances d’acier faiblement allié) et celui des tuyauteries des CSP (nuances d’acier C-Mn) impactés par le TTD local. Pour caractériser le comportement élasto-viscoplastique de chaque matériau, différents types d’essais ont été réalisés à différentes températures afin d’établir les modules d’Young, les coefficients de dilatation thermique et le comportement uniaxial par essais de traction et de fluage. En complément, des essais de relaxation avec des chargements thermiques complexes ont été réalisés pour reproduire les chargements représentatifs des TTD locaux. EDF considère que « *ce programme permet de disposer d’informations pour couvrir au premier abord les différentes configurations de TTD locaux. Si nécessaire, le cas échéant, la base de données pourrait être complétée ultérieurement* ». **L’IRSN considère que le programme de caractérisation réalisé pour les six matériaux représentatifs est satisfaisant et qu’il pourrait effectivement être étendu à d’autres matériaux en suivant la même démarche.**

### Lois de comportement retenues

Afin de réaliser les calculs mécaniques permettant d’évaluer le niveau de contraintes résiduelles dans les joints soudés générées à l’issue d’un traitement thermique par l’effet du gradient axial de température, le comportement mécanique des matériaux concernés doit être correctement modélisé sur la plage de température du procédé de TTD. Deux modèles de comportement élasto-viscoplastique ont été sélectionnés par EDF et caractérisés pour différents matériaux et à différentes températures :

- **le modèle dit « DDI » (deux déformations inélastiques)** : la déformation inélastique dans la loi de comportement est obtenue en cumulant de manière découplée une déformation plastique et une déformation viscoplastique. Ce modèle nécessite l’indentification de dix coefficients (cinq pour le comportement plastique et cinq pour le comportement viscoplastique) pour chaque matériau étudié ;
- **le modèle dit de « détensionnement »** : la loi de comportement permet de coupler les phénomènes de plasticité et de viscosité. Ce modèle nécessite l’identification de cinq coefficients pour chaque matériau étudié.

Pour l’IRSN, les valeurs des coefficients déterminées pour les deux lois de comportement permettent de reproduire correctement les résultats des essais uniaxiaux de traction et de fluage, ainsi que les essais de relaxation anisotherme. **L’ensemble des résultats présentés sont satisfaisants pour l’IRSN.** L’IRSN note

cependant que les résultats d'ajustement des deux modèles pour certains matériaux des tuyauteries CSP sont absents du dossier d'EDF.

### Validation des modèles numériques

Afin de valider la capacité des deux lois de comportement développées à prédire de manière fiable des niveaux de contraintes résiduelles dans des structures représentatives, trois maquettes ont été réalisées :

- deux maquettes analytiques de type tube DN 750<sup>4</sup> en acier P355NH, sans soudure et soumises à un TTD local ;
- une maquette intégrale à l'échelle 1 d'un assemblage soudé représentatif d'un joint de raccordement de la virole basse à la virole médiane d'un GV de l'EPR FA3, soumis à des traitements thermiques à la fois global et local de type industriel avec des zones de sous-TTD, de TTD nominal et de sur-TTD.

Pour les deux maquettes de type tube DN 750, deux configurations correspondant à deux niveaux de contraintes résiduelles maximales visés en peau interne (300 MPa pour la maquette 1 et 200 MPa pour la maquette 2) ont été retenues. Les contraintes résiduelles sont mesurées par plusieurs méthodes de mesure destructive. La prédiction des contraintes résiduelles axiales est satisfaisante pour ces deux maquettes quelle que soit la loi de comportement retenue. De surcroît, l'ordre de grandeur des incertitudes de mesure annoncé par EDF — entre 30 et 50 MPa — est cohérent avec les valeurs de la littérature et les résultats d'actions de recherches propres de l'IRSN.

Pour la maquette à l'échelle 1, des mesures de contraintes ont été effectuées en zone fondue et en zone affectée thermiquement, par des méthodes de mesure destructive, aux états suivants : l'état brut de soudage avant l'application de TTD, l'état à l'application d'un TTD homogène au four à 500 °C et l'état dit « TTD local » correspondant à l'application d'un TTD local (zones en sous-TTD, TTD nominal et en sur-TTD). Les simulations thermiques ont été réalisées en 3D à l'aide d'un logiciel qualifié pour obtenir les évolutions des champs de température en prenant en compte les conditions de réalisation réelles du TTD. Les résultats de ces simulations sont satisfaisants pour l'IRSN : ils permettent de retrouver les valeurs maximales de température mesurées dans chaque zone caractéristique ainsi que les évolutions de la température, aussi bien pour le profil azimutal au niveau du joint que pour le profil axial. **Pour l'IRSN, le modèle thermique utilisé est capable de reproduire le TTD appliqué — quel que soit le TTD local considéré (TTD nominal, sur-TTD et sous-TTD) — sous réserve de disposer des conditions de réalisation précises du traitement thermique.**

Les simulations thermiques réalisées permettent de fournir des champs de température en 3D pour l'analyse du TTD, en tant que données d'entrée des calculs mécaniques de détermination du niveau de contraintes résiduelles. Les calculs mécaniques ont été réalisés pour chaque configuration avec les deux lois de comportement mentionnées supra. Au vu des résultats obtenus, **l'IRSN considère que la simulation numérique en utilisant les lois de comportement retenues par EDF permet d'estimer correctement des niveaux de contraintes résiduelles par comparaison aux contraintes mesurées. L'IRSN note cependant que, comme dans toute modélisation, il existe des écarts entre calcul et mesure. Ces écarts traduisent les incertitudes liées à la modélisation. Il apparaît nécessaire que ces incertitudes soient estimées sur le cas le plus représentatif de la maquette à l'échelle 1 et qu'elles soient prises en compte de manière appropriée dans les applications projetées.**

---

<sup>4</sup> DN750, pour diamètre nominal 750, est l'appellation utilisée en France pour désigner les tuyauteries de diamètre extérieur égal à 30 pouces, soit 762 mm.

## **Conclusion**

Afin d'évaluer les contraintes résiduelles induites par les traitements thermiques de détensionnement locaux dans plusieurs types d'équipements sous pression nucléaires, EDF a, d'une part développé une approche de modélisation numérique, d'autre part réalisé des maquettes sur lesquelles il a caractérisé expérimentalement les contraintes résiduelles.

**Pour l'IRSN, l'effet, en termes de développement de contraintes résiduelles, de l'application d'un TTD local est identifié, compris et reproduit correctement par EDF.** Les lois de comportement pour les nuances représentatives des matériaux concernés par les TTD axiaux pour les gros composants et les lignes secondaires de l'EPR FA3 ont été établies en s'appuyant sur une base pertinente de résultats de caractérisation expérimentale. Les niveaux de contraintes résiduelles sont estimés de manière satisfaisante par les deux modèles numériques utilisés pour l'ensemble des maquettes réalisées. **L'IRSN n'identifie donc pas d'élément pouvant remettre en cause la validité des modélisations numériques développées.** Toutefois, **il apparaît nécessaire que les incertitudes liées à ces modélisations soient estimées et prises en compte dans leur application industrielle.**

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté