

Fontenay-aux-Roses, le 30 avril 2020

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## *Avis IRSN n° 2020-00066*

<b>Objet...</b>	Écart relatif aux traitements thermiques de détensionnement des équipements fabriqués par Framatome
<b>Réf(s) ..</b>	[1] Lettre ASN - CODEP-DEP-2019-048945 du 9 décembre 2019
<b>Nbre de page(s) ...</b>	4

Conformément à la demande [1] de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné la caractérisation thermique de l'écart relatif aux traitements thermiques de détensionnement (TTD) de soudures de générateurs de vapeur (GV) fabriqués par Framatome.

En effet, en septembre 2019 EDF a informé l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) d'un écart consécutif au non-respect des plages de température spécifiées par le code RCC-M (définissant les règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires des réacteur à eau pressurisée) lors de TTD réalisés dans l'atelier de fabrication de Framatome de Saint-Marcel. Le procédé de chauffage concerné utilise des moufles équipés de résistances électriques. Les moufles chauffants utilisés pour le TTD de joints entre viroles de générateurs de vapeur sont disposés sur les faces interne et externe de ces joints.

Les soudures concernées par l'écart sont, selon les générateurs de vapeur :

- le joint de raccordement de la virole basse et de la virole médiane, dit joint TIF ;
- le joint de raccordement de la boîte à eau du GV et de la plaque à tubes, dit joint PIF ;
- le joint de raccordement de la virole tronconique et de la virole cylindrique de la partie supérieure du GV, dit joint final.

Le TTD a notamment pour objectif de relaxer les contraintes résiduelles éventuellement induites par les opérations de soudage. La température et la durée du TTD sont déduites des prescriptions du RCC-M. En particulier, la température appliquée doit être comprise entre 595 °C et 620 °C.

Les températures atteintes dans la configuration en écart ont été déterminées par un essai mené sur une maquette à pleine échelle, représentative du joint TIF. Les résultats de cet essai ont confirmé l'existence d'hétérogénéités des températures de TTD des joints soudés, en particulier azimutales, et de dépassements des températures spécifiées. L'essai a également mis en évidence :

Adresse Courrier  
BP 17  
92262 Fontenay-aux-Roses  
Cedex France

Siège social  
31, av. de la Division Leclerc  
92260 Fontenay-aux-Roses

Standard +33 (0)1 58 35 88 88

RCS Nanterre 8 440 546 018

MEMBRE DE

**ETSON**

EUROPEAN  
TECHNICAL SAFETY  
ORGANISATIONS  
NETWORK

- une zone portée à une température significativement supérieure à la consigne, appelée « point chaud », située sous un « petit moufle » dont la densité de puissance de chauffe est plus importante que celle des autres moufles mis en place ;
- plusieurs zones portées à une température significativement inférieure à la température de consigne, appelées « points froids », localisées au niveau des jeux entre moufles.

À partir des résultats acquis sur cette maquette, EDF a considéré que la température appliquée pendant le TTD des joints concernés par l'écart a été comprise entre 500 et 700 °C.

Par la lettre en référence, l'ASN demande à l'IRSN de se prononcer sur :

- l'analyse des origines de l'écart de TTD ;
- la validité du modèle de simulation numérique retenu, compte tenu des mesures réalisées sur la maquette ;
- la validité du même modèle appliqué aux autres types de joints (PIF, joint final) ;
- la plage de températures de TTD enveloppe (500 à 700 °C) retenue pour les différents types de joints concernés.

L'ASN demande également que l'IRSN se prononce sur le caractère adapté et suffisant du programme expérimental d'EDF réalisé afin de caractériser l'écart du point de vue de la thermique.

EDF a développé deux modèles de simulation du procédé de traitement thermique. Un premier modèle relativement détaillé a été établi à l'échelle d'un élément de chauffe (moufle). Un second modèle, plus global, a ensuite été établi à partir des caractéristiques du premier modèle pour correspondre à la configuration complète du joint TIF. Les résultats obtenus au moyen de ce second modèle ont été comparés aux résultats obtenus sur la maquette à l'échelle 1, représentative du joint TIF. Le modèle global de simulation a ensuite été transposé aux autres configurations de joint soudés, le joint final et le joint PIF.

**En ce qui concerne le modèle local détaillé**, EDF a identifié puis étudié l'influence des paramètres ayant un effet sur le champ de température en surface de virole à l'échelle du moufle. Cette analyse de sensibilité met en évidence le caractère prépondérant de la fuite thermique par conduction dans les entrées et sorties des résistances chauffantes, appelées « queues froides ». Pour l'IRSN, EDF a bien identifié les principaux paramètres ayant un effet sur le champ de températures. Les valeurs des paramètres, la géométrie et les outils de simulation numérique choisis par EDF pour mener ses études de sensibilité n'appellent pas de remarque. La conclusion d'EDF quant à la prépondérance de la fuite par conduction thermique dans les queues froides des résistances montre l'importance d'une bonne prise en compte des propriétés thermiques des matériaux qui conditionnent l'importance de cette fuite. **La validité des paramètres retenus par EDF a été confirmée par la capacité du modèle à reproduire de manière satisfaisante les profils de température relevés lors de l'essai sur la maquette à échelle 1.**

**En ce qui concerne le modèle global du dispositif de traitement thermique du joint TIF**, EDF a détaillé les hypothèses du modèle, telles que les valeurs retenues pour décrire les phénomènes de conduction et les coefficients d'échange associés, définis à partir du modèle précédent. Des échanges entre l'IRSN et EDF ont permis d'analyser les températures d'ambiance retenues dans le modèle. En outre, l'exploitant a introduit des valeurs locales particulières des coefficients d'échange en certains points de son modèle pour tenir compte de l'absence de sortie de résistance chauffante au niveau de certains espaces entre moufles ou pour prendre en compte le surplus de pertes thermiques dû à la concomitance de plusieurs sorties. Les résultats obtenus avec le modèle sont en bon accord avec les mesures, en particulier en ce qui concerne les températures minimales et maximales calculées. L'IRSN estime que les

coefficients d'échange pris en compte dans la simulation de manière globale, ou pour tenir compte de configurations locales singulières, sont adaptés et correspondent à la configuration industrielle du traitement thermique. De plus, les études de sensibilité menées par EDF montrent une certaine stabilité du profil de température. En particulier, l'impact d'une variation de conductivité thermique des résistances chauffantes a été étudiée et l'absence « d'effet falaise » a été vérifiée par EDF. **Au vu des résultats et de la méthode employée, l'IRSN estime qu'EDF a effectivement vérifié et validé son modèle numérique de la maquette du joint TIF. Les profils de températures obtenus peuvent être considérés comme valides.**

EDF a ensuite transposé son modèle global du dispositif de traitement thermique du joint TIF **au dispositif de traitement du joint final**. En pratique, deux types de générateurs de vapeur (GV) ont été pris en compte (ceux du réacteur n° 2 de Paluel de 1300 MWe et ceux des réacteurs de 900 MWe). Les simulations réalisées par EDF pour ces deux types de GV, incluant des analyses de sensibilité aux principaux paramètres du modèle, montrent que les températures de TTD atteintes restent dans la plage de 500 à 700 °C. Le modèle numérique de traitement thermique du joint TIF a également été transposé **aux différentes conceptions de joints PIF concernés par l'écart**. Les singularités géométriques du joint PIF liées à la présence du fond primaire ont été intégrées au modèle. L'absence d'effet significatif de la température d'ambiance retenue dans le modèle a également été vérifiée par EDF. Du point de vue de l'IRSN, les mécanismes conduisant aux hétérogénéités thermiques identifiées précédemment avec le modèle de traitement du joint TIF restent les mêmes pour les autres types de joint. Les variations de mise en œuvre du procédé de TTD peuvent avoir une influence locale sur le profil de température obtenu mais les températures extrêmes calculées par EDF ne sont pas significativement modifiées. **L'IRSN estime donc que la transposition du modèle de joint TIF au joint final et au joint PIF ainsi que les profils de températures obtenus sont valides.** Grâce au modèle local développé, EDF a pu identifier l'origine de l'écart de traitement thermique et de l'hétérogénéité des températures. À l'échelle d'un moufle et du jeu entre moufles associé, EDF attribue les faibles températures observées aux fuites thermiques par conduction dans les résistances passant dans le jeu entre moufles. La présence de ce point froid induit un gradient local du champ de température et il s'ensuit une forte sensibilité de la température appliquée à la position du thermocouple de régulation. En effet, la température de la virole au niveau du thermocouple étant asservie à 606 °C, plus ce thermocouple sera proche de la fuite thermique, plus le système devra fournir de puissance aux résistances pour atteindre la température de consigne. En conséquence, la température maximale en surface de virole sera plus élevée (point chaud local du moufle). En outre, les causes du dépassement de la température de traitement prescrite sont liées à la présence du petit moufle, et les valeurs maximales atteintes sont confirmées par la simulation numérique. **L'IRSN partage cette analyse et considère que les origines de l'écart ont été clairement établies par EDF.**

Le programme expérimental réalisé par EDF sur le volet thermique consiste en une simulation expérimentale de réalisation d'un procédé de TTD par moufle appliqué à une maquette à l'échelle 1 de joint TIF. Selon l'IRSN, grâce à cet essai, EDF a correctement identifié les paramètres d'influence du champ de températures résultant du TTD. Ces paramètres sont les mêmes quel que soit le type de joint. EDF a étudié l'absence d'effets falaises liés à ces paramètres influents et pouvant survenir comme effets « indésirables » de l'asservissement en température de la consigne de chauffe. Les calculs d'EDF montrent que les différences géométriques et de mise en œuvre du TTD sur le joint final et le joint PIF ne sont pas à l'origine de différences de températures notables. **Pour ces raisons, l'IRSN estime que le programme expérimental limité à un essai sur une maquette à l'échelle 1 correspondant à la configuration du TTD réalisé sur le joint TIF, est adapté. Il est suffisant pour qualifier le modèle numérique permettant de déterminer l'amplitude des champs de température dans les autres configurations en écart, à savoir les joints finaux et les joints PIF.**

Finale**ment**, compte tenu de l'ensemble des éléments fournis par EDF, l'IRSN considère que la plage de température de 500 °C à 700 °C retenue pour envelopper les températures minimales et maximales appliquées avec le procédé en écart est cohérente avec l'analyse thermique du procédé. Cette plage de température peut donc être retenue comme hypothèse pour l'évaluation des conséquences de cet écart sur les propriétés mécaniques des joints soudés.

Pour le Directeur général et par délégation,  
Olivier DUBOIS  
Adjoint à la Directrice de l'expertise de sûreté