



Fontenay-aux-Roses, le 16 juin 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2021-00103

Objet : Réacteur EPR de Flamanville - Ecart de réalisation du traitement thermique de détensionnement des soudures des circuits secondaires principaux – cas des géométries simples.

Réf. : [1] Lettre ASN – CODEP-DEP-2021-002431 du 23 février 2021.
[2] Guide N° 28 de l'ASN du 25 juillet 2017.

1. CONTEXTE

Pour les soudures des circuits secondaires principaux (CSP) de l'EPR de Flamanville, Framatome a spécifié la réalisation d'un traitement thermique de détensionnement (TTD), aussi appelé revenu de détensionnement, afin de restaurer les propriétés du métal modifiées par le soudage et de relaxer les tensions internes apparues lors de celui-ci. Le TTD permet également dans le cas des aciers au carbone-manganèse de limiter le phénomène de vieillissement sous déformation qui provoque un décalage de la température de transition fragile-ductile. Le TTD mis en œuvre pour ces soudures consiste en un chauffage local à l'aide de nappes chauffantes en céramique et a été réalisé en usine ou sur site lors du montage.

À la suite d'un écart identifié sur les TTD des générateurs de vapeur de remplacement du parc en exploitation, Framatome a informé l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), en 2020, d'un écart consécutif au non-respect des plages de température spécifiées lors du TTD des soudures des tuyauteries de vapeur principales (VVP) et des tuyauteries du circuit ARE¹ de l'EPR de Flamanville. La température de maintien pour les tuyauteries ARE doit être comprise entre 565 °C et 605 °C et entre 570 °C et 610 °C pour les tuyauteries VVP. Or, en se fondant sur des essais et des simulations du procédé de TTD local utilisé, Framatome a conclu qu'il existe un risque de sous-revenu² pour toutes les soudures des tuyauteries VVP et ARE dites de géométrie « simple »³ et un risque de sur-revenu⁴ pour l'une d'entre elles.

¹ Circuit d'alimentation normale en eau des générateurs de vapeur.

² Les zones ayant observé une température inférieure à la température minimale requise sont dites en sous-revenu.

³ Les soudures dites de géométrie simple sont celles qui ne sont pas à proximité d'un composant massif susceptible de générer un « pompage » thermique important. Il s'agit ainsi de soudures bout à bout entre deux tubes, entre un coude et un tube, entre deux tubes d'épaisseurs différentes. Dans le cas de la présence d'une vanne ou d'un élément massif à proximité, la soudure est dite de géométrie « complexe ».

⁴ Les zones ayant subi une élévation de température au-delà de la température maximale requise sont dites en sur-revenu.

Au cours d'essais spécifiques, Framatome a identifié deux phénomènes conduisant aux écarts de sous-revenu : un gradient de température dans l'épaisseur du métal et une différence de température, dite offset, entre les valeurs fournies par les thermocouples utilisés pour la régulation du chauffage et la température effective du métal traité.

Dans ce contexte, l'ASN a souhaité recueillir, par lettre en référence [1], l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur la méthodologie fondée sur des essais et des simulations permettant d'évaluer pour les soudures de géométrie simple des tuyauteries VVP et ARE l'état de conformité des TTD déjà réalisés.

Une synthèse de l'expertise de l'IRSN et les principales conclusions associées sont présentées ci-après.

2. CARACTERISATION DE L'ECART DE REALISATION DES TTD

2.1. ESSAIS REALISES SUR MAQUETTES

Framatome a réalisé des essais sur des maquettes instrumentées pour caractériser le champ de température vu par la soudure lors d'un TTD à l'aide du procédé par nappes chauffantes en céramique. Trois types d'essais ont été réalisés :

- des essais sur une tôle instrumentée afin de tester les différentes technologies de mesure de température par thermocouple utilisées dans le procédé par nappes chauffantes en céramique ;
- des essais de TTD sur une maquette à l'échelle 1, qualifiée de représentative des configurations de soudure de géométrie simple, instrumentée de sorte à évaluer l'offset de mesure des thermocouples utilisés dans le procédé par nappes chauffantes en céramique ;
- des essais complémentaires de TTD sur cette maquette à l'échelle 1 afin de réaliser des mesures de la température du métal traité par caméra thermique pour valider l'existence des offsets de mesure des thermocouples.

Les résultats expérimentaux montrent que chaque type de thermocouple, associé à un mode de fixation, présente un offset qui est le principal responsable de l'écart de réalisation du TTD. Sur la base de ces essais, Framatome considère une dépendance linéaire de l'offset au flux thermique de chauffe.

L'IRSN estime que, dans les configurations testées, les essais menés sont pertinents et permettent de correctement identifier les sources de l'écart de réalisation du TTD, en particulier l'offset.

2.2. MODELISATION DES ESSAIS

À l'issue de la campagne d'essais, Framatome a simulé les TTD appliqués aux soudures de géométrie simple à partir d'un modèle numérique de type CFD⁵ afin de prédire le champ de température au niveau de la soudure.

Modèle de simulation retenu

La méthodologie de Framatome vise à reproduire par simulation, de manière conservative, les résultats expérimentaux obtenus sur la maquette à l'échelle 1. Les phénomènes thermiques tels que la convection, la conduction et le rayonnement sont modélisés. Les nappes chauffantes en céramique ne sont pas modélisées explicitement, le flux thermique de chauffe est directement appliqué par l'intermédiaire d'un terme source surfacique de chaleur sur la paroi de la maquette. L'offset de mesure des thermocouples, à l'origine de l'écart de réalisation du TTD, est pris en compte via des lois qui modifient la température de régulation au niveau de ces thermocouples en fonction du flux thermique incident de la nappe chauffante associée à la zone de régulation considérée.

⁵ Computational Fluid Dynamics, étude de la dynamique des fluides par la résolution numérique des équations la régissant.

L'IRSN estime le modèle retenu globalement apte à modéliser le procédé de TTD. Sa validation et la définition des lois d'offset font l'objet de l'analyse ci-dessous.

Validation du modèle de calcul

La phase de validation du modèle de calcul repose sur l'identification des phénomènes physiques influents (analyse de type PIRT⁶), des validations à effets séparés⁷, intégrale⁸ et enfin de l'étape de transposition des cas de validation aux cas d'application sur site, dans une démarche similaire à celle décrite dans le guide n° 28 de l'ASN [2]. Pour évaluer la capacité du modèle à reproduire les résultats expérimentaux, Framatome utilise les mesures d'offset réalisées sur la maquette instrumentée à l'échelle 1 et conclut que la modélisation mise en place permet de retrouver de manière satisfaisante les profils de température mesurés au niveau de la soudure.

Bien que, pour l'IRSN, la validation à effets séparés du modèle utilisé par Framatome ne soit pas suffisante, la validation intégrale permet d'évaluer les incertitudes du modèle car la maquette à l'échelle 1 est représentative de la configuration de référence⁹ des soudures de géométrie simple. Les incertitudes associées au modèle utilisant la simulation CFD conduisent à une sous-estimation de la température pouvant atteindre 15 à 20 °C environ au niveau de la soudure selon les configurations. **Ainsi, l'IRSN estime que toute configuration de TTD dont la température simulée dépasse localement la température de consigne¹⁰ est susceptible de constituer une zone de sur-revenu.**

Définitions des lois d'offset

L'offset est à l'origine de l'écart de réalisation du TTD mis en évidence par Framatome. Il affecte le pilotage du procédé de TTD qui est asservi à la valeur de température mesurée par le thermocouple de régulation. Plutôt que de quantifier chacune des causes possibles (oxydation des thermocouples, le décollement des thermocouples, type de thermocouple, etc.) et leur contribution à l'offset, Framatome a développé des lois d'offset, fonction uniquement du flux thermique de chauffe, enveloppes de tous les offsets mesurés expérimentalement au cours des essais sur maquettes instrumentées.

Pour l'IRSN, les lois d'offset encadrent les mesures effectuées sur maquettes instrumentées tout en étant au plus juste des valeurs extrêmes mesurées ; les incertitudes de mesures ne sont pas prises en compte. La définition de ces lois n'apporte pas une garantie suffisante, d'un point de vue statistique, que de nouvelles mesures seraient encadrées par les lois d'offset définies. Enfin, Framatome ne démontre pas suffisamment que les valeurs des paramètres influents sur l'offset, prises en compte lors des essais sur maquettes, couvrent l'ensemble des valeurs possibles sur site. **Sur cette base, l'IRSN considère que les lois d'offset ne sont pas suffisamment robustes en l'état actuel du dossier.**

2.3. TRANSPOSITION AUX SOUDURES SUR SITE

Afin d'appliquer son modèle issu des essais sur la maquette à l'échelle 1 aux soudures sur site, Framatome a réalisé une étude paramétrique pour définir, pour chaque type de soudure rencontré sur site (caractérisé par un diamètre et une épaisseur), en fonction de sa largeur, la température maximale et la température minimale atteinte lors du TTD. Framatome a ainsi défini une largeur limite au-delà de laquelle chaque type de soudure

⁶ Phenomena identification and ranking table. La démarche PIRT vise à définir, sur la base des phénomènes physiques, le niveau d'influence de chacun des paramètres, afin d'en déduire certains choix de modélisation.

⁷ La validation à effets séparés a pour objectif de valider les modèles physiques de l'outil de calcul scientifique dans des conditions où les phénomènes physiques dominants identifiés sont aussi indépendants que possible.

⁸ La validation intégrale a pour objectif de valider l'aptitude globale de l'outil de calcul scientifique à simuler correctement l'ensemble des phénomènes physiques et leurs interactions.

⁹ La configuration de référence correspond à une soudure bout à bout entre deux tubes de même diamètre.

¹⁰ La température de consigne est la température cible au niveau des thermocouples de régulation pour réaliser le TTD.

présente un risque de sur-revenu et en deçà de laquelle chaque type de soudure présente un risque de sous-revenu.

À la suite de cette première analyse, Framatome conclut que toutes les soudures étudiées présentent un risque de sous-revenu. Pour les cas proches d'un risque de sur-revenu, Framatome a procédé à une analyse plus détaillée et conclut qu'une soudure d'une tuyauterie ARE est concernée avec un dépassement estimé à 26 °C par rapport à la température de consigne.

Cependant, comme indiqué précédemment, l'IRSN estime que le caractère enveloppe des lois d'offset n'est pas acquis, d'autant plus lorsqu'elles sont appliquées aux configurations sur site. En effet, l'étape de transposition des configurations testées sur la maquette à l'échelle 1 à celles rencontrées sur site n'est pas immédiate : elle implique dans certains cas la prise en compte de variations par rapport à la géométrie de la configuration de référence et de la mise en œuvre du procédé de TTD moins maîtrisée sur site que pour la maquette à l'échelle 1. Les procès-verbaux des TTD réalisés avant 2019 ne tracent pas les modalités de montage du dispositif ni la position des thermocouples. De plus, l'IRSN a noté certaines non-conformités lors de la mise en œuvre du procédé de TTD sur site. La démonstration par Framatome de l'absence d'impact des non-conformités n'est, selon l'IRSN, pas apportée à ce stade. **Pour l'IRSN, il n'y a pas de garantie que les configurations d'essais testées couvrent les configurations rencontrées sur site.**

Certaines configurations de soudure présentent des marges relativement faibles eu égard au risque de sur-revenu. **Aussi, au regard des réserves formulées sur la définition des lois d'offset, l'IRSN estime qu'il ne peut être exclu de risque de sur-revenu pour les soudures caractérisées par une température maximale simulée comprise entre la température de consigne et la température de consigne augmentée de 15°C.**

3. CONCLUSION

À l'issue de son expertise, l'IRSN estime que la méthodologie employée pour prédire les écarts de température vus par les soudures de géométrie simple des tuyauteries VVP et ARE de l'EPR de Flamanville est pertinente dans son principe. Framatome conclut que l'ensemble des soudures présente un risque de sous-revenu, ce que partage l'IRSN. Par ailleurs, les essais ont montré que l'offset de mesure des thermocouples de régulation est le principal responsable des écarts. De nombreux facteurs influençant cet offset ont été identifiés, mais ces derniers sont difficiles à prévoir et à prendre en compte dans un contexte industriel. **Pour l'IRSN, les éléments apportés par Framatome et décrits dans le présent avis ne permettent pas de garantir que l'intervalle entre les températures minimale et maximale calculées couvre effectivement les températures vues par les soudures de géométrie simple sur site, ce qui conduit à la recommandation présentée en annexe.**

Enfin, pour l'IRSN, le procédé par nappes chauffantes en céramique tel que mis en œuvre pour la réalisation du TTD des soudures des CSP n'apparaît pas, à ce stade, suffisamment maîtrisé pour garantir le respect de la plage de températures prescrites pour le TTD de ces soudures. Il devra être amélioré pour la reprise des TTD sur les CSP de l'EPR de Flamanville.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Thierry PAYEN

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE A L'AVIS IRSN N° 2021-00103 DU 16 JUIN 2021

Recommandation de l'IRSN

L'IRSN recommande que Framatome consolide sa méthodologie permettant d'évaluer l'intervalle de température vu par les soudures lors du traitement thermique de détensionnement en prenant en compte toutes les sources d'incertitudes (erreurs de modèles, incertitudes de mesure et incertitudes sur les conditions opératoires sur site) dans la définition des lois d'offset. La nouvelle définition des lois d'offset devra également tenir compte des résultats de l'analyse de l'ensemble des fiches de constats ou de non-conformités ayant trait au traitement thermique de détensionnement.