



Fontenay-aux-Roses, le 22 juillet 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2022-00157

Objet : Réacteur EPR de Flamanville – Écart de réalisation du traitement thermique de détensionnement des soudures des circuits secondaires principaux. Cas des géométries complexes.

Réf. : [1] Avis IRSN 2021-00103 du 16 juin 2021
[2] Saisine ASN – CODEP-DEP-2021-002431 du 23 février 2021

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 mis en œuvre pour ces soudures consiste en un chauffage local à l'aide de nappes chauffantes en céramique, réalisé 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 CSP¹ de l'EPR de Flamanville, susceptible d'altérer les propriétés mécaniques ciblées. Par exemple, la température de maintien doit être comprise entre 565°C et 605°C pour les tuyauteries ARE² et entre 570°C et 610°C pour les tuyauteries VVP³. 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-revenu⁴ pour toutes les soudures des tuyauteries VVP et ARE dites de géométrie « simple »⁵ et un risque de sur-

¹ Circuits secondaires principaux.

² Circuit d'alimentation normale en eau des générateurs de vapeur.

³ Tuyauteries vapeur principales.

⁴ Les zones ayant observé une température inférieure à la température minimale requise sont dites en sous-revenu.

⁵ 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 ».

revenu⁶ pour certaines d'entre elles.

Au cours d'essais spécifiques, Framatome a identifié deux phénomènes conduisant aux écarts : 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.

En 2021, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a émis un avis relatif au cas des soudures de géométrie simple [1]. Cet avis a conclu à la nécessité que Framatome consolide sa méthodologie de simulation permettant d'évaluer l'intervalle de températures probables vues par les soudures lors du TTD en prenant en compte toutes les sources d'incertitudes. Framatome a ainsi mis à jour les études en conséquence et a réévalué, parmi les soudures qui doivent bénéficier du plus haut niveau d'exigence de sûreté (dit *Q1*), celles qui sont susceptibles d'avoir été l'objet d'un écart de TTD. Framatome en a déduit qu'il existe un risque de sous-revenu pour l'ensemble des soudures (de géométrie simple ou complexe) et un risque de sur-revenu pour trois soudures de géométrie simple ainsi que cinquante-et-une soudures de géométrie complexe dont quarante-neuf traitées par nappes.

Dans ce contexte, l'ASN a souhaité recueillir, par lettre en référence [2] l'avis de l'IRSN sur la méthodologie fondée sur des essais et des simulations permettant d'évaluer pour les soudures de géométrie complexe l'état de conformité des TTD déjà réalisés.

2. CONSOLIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES INTERVALLES DE TEMPÉRATURE

Les essais menés par Framatome sur des maquettes représentatives des soudures de géométrie simple ont mis en évidence une différence de température, dite offset, entre les valeurs fournies par les thermocouples (TCs) utilisés pour la régulation du chauffage et la température effective du métal traité. Cet offset est le principal responsable des écarts TTD. Il est notamment lié au mode de fixation des TCs de régulation prescrit par la procédure dite « historique » de réalisation du TTD. La procédure a depuis été mise à jour, mais les soudures faisant l'objet de cet avis sont celles ayant été traitées selon la procédure de TTD historique.

Framatome a mis en évidence dans ses essais une variabilité importante de l'offset, ainsi qu'une dépendance linéaire de l'offset à la puissance de chauffe apportée à la pièce à traiter. Afin de prendre en compte cette incertitude et cette dépendance linéaire, deux lois d'offset dites enveloppes ont été déterminées par Framatome : l'une dite « maximale », et l'autre dite « minimale ». Elles sont définies sur la base de l'ensemble des mesures expérimentales d'offset réalisées. La loi d'offset maximale permet l'estimation conservatrice de la température minimale de TTD, tandis que la loi d'offset minimale permet au contraire l'estimation conservatrice de la température maximale de TTD.

Dans son avis en référence [1], l'IRSN a estimé que les essais menés étaient pertinents et permettent de correctement identifier les sources de l'écart de réalisation du TTD pour les soudures de géométrie simple. Il a toutefois indiqué que Framatome devait, pour définir les lois d'offset, prendre en compte l'ensemble des incertitudes (incertitudes de mesures, incertitudes de modèles et incertitudes liées à la transposition aux soudures réalisées sur site). L'ASN a ainsi demandé à Framatome de réaliser des essais complémentaires afin de garantir que l'intervalle entre les températures minimale et maximale calculées couvre effectivement les températures vues par les soudures réalisées sur site.

Les paramètres identifiés comme influents par Framatome et explicitement investigués lors des essais sont :

- le vieillissement des TCs de régulation ;

⁶ Les zones ayant subi une élévation de température au-delà de la température maximale requise sont dites en sur-revenu.

- la position des éléments de chauffe au regard des tolérances classiques de montage ;
- l'environnement (encombrement) lors de la réalisation de l'habillage de la soudure.

Lors de ces essais, trois effets sont également implicitement investigués :

- la variabilité du matériel par le changement volontaire du matériel utilisé pour la réalisation du TTD ;
- le vieillissement de l'isolant car il est conservé d'un essai à l'autre ;
- la variabilité associée au changement d'opérateur.

L'IRSN estime que les paramètres investigués lors des essais complémentaires permettent de prendre en compte l'ensemble des incertitudes. Les plages de variabilité choisies sont estimées représentatives de celles possiblement rencontrées dans la pratique historique sur site.

À la suite de ces essais complémentaires, Framatome a revu sa méthodologie pour identifier les lois d'offset enveloppes et a mis à jour l'ensemble des résultats des intervalles de températures vues par les soudures lors du TTD. **L'IRSN n'a plus de remarque sur la prise en compte des lois d'offset dans la mise à jour des résultats des températures.**

3. CARACTÉRISATION DE L'ÉCART DE TTD POUR LES SOUDURES DE GÉOMÉTRIE COMPLEXE

La méthodologie utilisée par Framatome pour l'analyse des soudures de géométrie simple repose sur une approche paramétrique : pour chacun des couples diamètre/épaisseur de tuyauterie, les températures enveloppes sont calculées en fonction de la largeur de soudure considérée. Une largeur de soudure critique est ainsi déterminée au-delà de laquelle il existe un risque de sur-revenu. Ensuite, seules les soudures présentant une largeur supérieure à cette largeur critique sont modélisées explicitement afin de déterminer si elles présentent effectivement, ou non, un risque de sur-revenu.

La variété des soudures de géométrie complexe rend cette approche paramétrique impossible puisque les caractéristiques des soudures ne peuvent pas se résumer à un couple diamètre/épaisseur et à une largeur de soudure : des éléments massifs (par exemple un clapet), ou singuliers (par exemple un piquage) de dimensions et de positions variables à proximité des soudures influent sur les champs de température. C'est pourquoi Framatome a réalisé des essais sur une maquette différente de celle qui a été utilisée pour les soudures de géométrie simple, puis a modélisé numériquement explicitement chaque configuration de soudure en prenant en compte sa géométrie.

3.1. ESSAIS RÉALISÉS SUR MAQUETTE

Framatome s'appuie sur des essais pour valider la capacité du code de calcul à prédire les intervalles de températures probables vues par les soudures de géométrie complexe en tenant compte de la mise à jour des lois d'offset explicitée au (§2).

Ces essais sont réalisés sur une maquette représentative d'une soudure de géométrie complexe en raison de la présence d'un clapet à proximité de cette soudure. Le procédé de TTD mis en œuvre sur la maquette est celui par résistance électrique souple (appelée « *lacet chauffant* ») disposée sur la zone à traiter, régulée par des TCs soudés sur le métal. Si ce procédé diffère de celui employé sur site qui met en œuvre des *nappes chauffantes en céramique* et des TCs de régulation plaqués, l'homogénéité de la chauffe est comparable entre les deux moyens (nappes ou lacets). Le mode de fixation des TCs de régulation impacte directement les lois d'offset à prendre en compte pour le procédé car l'offset est moindre pour les TCs soudés que pour les TCs plaqués. Cette différence a bien été prise en compte par Framatome par l'identification de nouvelles lois d'offset identifiées spécifiquement pour ces essais. Enfin, pour les soudures de géométrie simple, une seule zone de chauffe était positionnée centrée sur le joint soudé. Dans le cas des soudures de géométrie complexe, deux zones de chauffe sont positionnées de part et d'autre de ce joint.

Sur la base des éléments susmentionnés, l'IRSN estime que la méthodologie retenue par Framatome pour valider la capacité du code de calcul à prédire les intervalles de températures probables vues par les soudures de géométrie complexe est pertinente.

3.2. MODÉLISATION DES ESSAIS

Le modèle de simulation retenu pour reproduire les résultats expérimentaux est très similaire à celui analysé par l'IRSN dans l'avis en référence [1] et qui a été jugé apte à modéliser le procédé de TTD pour les soudures de géométrie simple. Le modèle numérique représente la géométrie réelle des éléments de la maquette, notamment le clapet et les tronçons de tuyauteries (vertical et horizontal).

Deux configurations sont testées :

- l'une avec deux bouchons de calorifuge en place pour empêcher la circulation d'air à l'intérieur de la tuyauterie ;
- l'autre avec un seul bouchon en place à l'extrémité basse de la maquette pour permettre davantage la circulation naturelle de l'air dans la tuyauterie.

Ces deux configurations permettent de tester deux conditions de TTD différentes afin d'envelopper les conditions potentiellement rencontrées sur site.

Les résultats numériques sont comparés aux résultats des essais pour ces deux configurations en trois endroits différents : le premier au droit de la soudure, les deux autres à une distance égale à 1,5 fois l'épaisseur du tube de la soudure conformément aux spécifications du code RCC-M⁷. Pour les deux configurations, le modèle surestime la température maximale de 5 à 6 °C. La température minimale est quant à elle sous-estimée de 1 °C.

Selon l'IRSN, ces résultats montrent la capacité du modèle à correctement prendre en compte les phénomènes importants intervenant lors des essais sur la maquette de géométrie complexe. Les écarts entre simulation et expérience sont maîtrisés, et vont à chaque fois dans le sens du conservatisme.

3.3. TRANSPOSITION AUX SOUDURES SUR SITE

Dans la transposition de sa modélisation des essais aux soudures sur site, Framatome identifie l'ensemble des soudures traitées par nappe comme présentant un risque de sous-revenu, et quarante-neuf soudures en risque de sur-revenu. Les soudures en sous-revenu seront remises en conformité par Framatome. L'enjeu de sûreté repose donc plutôt sur une identification exhaustive des soudures présentant un risque avéré de sur-revenu.

La limite de sur-revenu est fixée à la température de qualification du mode opératoire de soudage (T_{QMOS}) additionnée de 20 °C ; seules les soudures dont la température maximale dépasse strictement cette limite sont considérées en sur-revenu par Framatome, conformément à la pratique.

L'impact du sur-revenu sur les propriétés mécaniques des soudures concernées par cet écart est alors évalué par Framatome et certaines de ces soudures ont d'ores et déjà été ciblées par Framatome pour des réparations. L'analyse de l'IRSN s'est alors concentrée sur les soudures pour lesquelles Framatome exclut un risque de sur-revenu sur la base des simulations thermiques réalisées. L'IRSN s'est attaché à vérifier que les hypothèses de modélisation retenues sont justifiées et, dans le cas contraire, à évaluer si les ajustements jugés nécessaires seraient de nature à faire basculer la température maximale calculée au-delà de la limite de sur-revenu ($T_{QMOS} + 20$ °C). **En particulier, les soudures présentant une marge inférieure ou égale à 5 °C par rapport à la limite ont été analysées par l'IRSN au cas par cas, soit vingt-neuf soudures.**

L'IRSN estime que, pour l'ensemble des vingt-neuf soudures analysées, les hypothèses de modélisation considérées par Framatome sont suffisamment conservatives pour écarter avec un bon niveau de confiance le

⁷ Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP.

risque de sur-revenu bien que la marge de température par rapport à la limite de $T_{\text{consigne}} + 20 \text{ °C}$ soit inférieure à 5 °C. En effet, la température estimée est pénalisée par différentes hypothèses conservatives, d'une part quant à la mise en place de l'équipement, d'autre part quant aux lois d'offset utilisées.

4. CONCLUSIONS

En conclusion de son expertise, l'IRSN considère que la méthodologie employée par Framatome permet d'estimer de manière conservative les températures minimales et maximales susceptibles d'être vues par les soudures de géométrie complexe (ARE², VDA⁸, VVP³) lors de leur traitement thermique de détensionnement réalisé par nappes chauffantes en céramique. Par conséquent, l'IRSN considère que Framatome a correctement identifié l'ensemble des soudures pour lesquelles il existe un risque de sous-revenu ou de sur-revenu.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

⁸ VDA : Vanne de Décharge à l'Atmosphère.