



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 29 octobre 2024

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2024-00150

Objet : EDF – REP – Corrosion sous contrainte des lignes auxiliaires du circuit primaire principal – Expertise du volet relatif à la simulation numérique du soudage.

Réf. : Lettre ASN – CODEP-DEP-2023-048268 du 31 août 2023.

Au quatrième trimestre 2021, dans le cadre de la deuxième visite décennale du réacteur n° 1 de la centrale de Civaux (1450 MWe) et de la troisième visite décennale du réacteur n° 1 de la centrale de Penly (1300 MWe), EDF a détecté des fissures de corrosion sous contrainte (CSC) à proximité de soudures des tuyauteries des circuits d'injection de sécurité (RIS)¹ et des circuits de refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA)². Ce type d'endommagement n'était pas anticipé pour ces circuits.

CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE DU SOUDAGE

EDF a engagé des actions de compréhension et de caractérisation du phénomène de CSC touchant ces circuits. D'un point de vue phénoménologique, les contraintes résiduelles de soudage et la dureté du matériau aux abords de la soudure jouent un rôle important dans les mécanismes d'initiation et de propagation de la CSC dans les tuyauteries en acier inoxydable austénitique. Des contraintes résiduelles de traction aggravent les phénomènes de CSC tandis que des contraintes résiduelles de compression sont susceptibles de les ralentir. Le maintien de la dureté en paroi interne en dessous d'une certaine valeur permet également de limiter l'évolution, voire de prévenir l'apparition de la CSC. Or la caractérisation des niveaux de contraintes résiduelles et de dureté dans l'épaisseur est uniquement accessible en réalisant des analyses destructives des soudures. Ainsi, dans le cadre du traitement de la CSC des soudures en acier inoxydable austénitique des lignes auxiliaires du circuit primaire principal (CPP), EDF a réalisé des simulations numériques du soudage (SNS) par la méthode aux éléments finis.

-
- ¹ Le circuit RIS a pour fonction d'injecter de l'eau à forte concentration en bore en cas de baisse de pression anormale du circuit primaire. Cette injection « de sécurité » est destinée à refroidir le cœur et à maîtriser sa réactivité, notamment en cas de brèche sur le circuit primaire.
 - ² Le circuit RRA permet d'assurer le refroidissement du circuit primaire lorsque le réacteur est à l'arrêt et que les générateurs de vapeur ne sont plus efficaces.

MEMBRE DE
ETSON

La SNS permet de calculer, en fonction de paramètres opérationnels associés à l'opération de soudage et en tout point de l'assemblage, les grandeurs suivantes :

- la déformation du chanfrein de soudage ;
- l'étendue de la zone fondue et de la zone affectée thermomécaniquement (ZATM³) ;
- les contraintes résiduelles de soudage (CRS) et la déformation plastique cumulée à l'issue de l'opération de soudage ;
- la dureté.

EDF poursuit plusieurs objectifs en calculant ces grandeurs par la SNS : apporter des éléments de compréhension relatifs aux paramètres de soudage pouvant expliquer l'apparition ou l'évolution de la CSC dans les soudures concernées et identifier des configurations de soudage pouvant favoriser ou limiter l'apparition de fissures de CSC.

EDF a recours à la SNS en modélisant les éléments de l'assemblage soudé en 2D axisymétrique⁴ (SNS 2D) pour les cas les plus simples et en tridimensionnel (SNS 3D) pour les cas plus complexes, notamment pour les réparations localisées des soudures. Ces simulations ont été menées pour modéliser :

- des soudures des circuits RIS et RRA déposées et expertisées au laboratoire d'expertises du LIDEC⁵ ;
- des maquettes instrumentées puis soudées, représentatives de soudures concernées par le phénomène de CSC. Les résultats des mesures de déformation, de CRS et de dureté ont alors été comparés aux résultats calculés par SNS.

PÉRIMÈTRE DE L'EXPERTISE

Dans ce contexte, par la lettre citée en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a sollicité l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) pour ce qui concerne :

- la représentativité et la suffisance des essais permettant de valider le modèle de SNS et définir son périmètre d'application ;
- les incertitudes des résultats de la SNS 2D, notamment au regard des niveaux de contraintes résiduelles et écrouissage obtenus ;
- les limites d'utilisation de la SNS 2D ;
- les conclusions pouvant être tirées des points précédents sur l'analyse des causes et des paramètres influents sur la CSC.

La présente expertise de l'IRSN se limite au cas des soudures en acier inoxydable austénitique du CPP concernées par un risque de CSC, non réparées et simulées par EDF en 2D axisymétrique.

³ La ZATM est la zone du matériau de base dont l'état mécanique (contraintes résiduelles et dureté) a été altéré par la chaleur de soudage. Elle est plus étendue que la zone affectée thermiquement (ZAT).

⁴ Il est possible de réaliser une étude 2D axisymétrique lorsque l'élément modélisé présente une symétrie de révolution autour d'un axe. La représentation géométrique de l'élément est alors réalisée dans un plan de coupe.

⁵ Le LIDEC est un laboratoire d'EDF qui assure l'expertise d'échantillons prélevés sur les réacteurs en fonctionnement.

DÉMARCHE D'ÉTABLISSEMENT DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES DU SOUDAGE

L'assemblage des tuyauteries concernées par l'expertise de l'IRSN est réalisé par soudage multipasse. Un chanfrein est aménagé à l'interface entre les deux portions à souder. L'arc de soudage fond localement une portion de métal des tuyauteries à souder ainsi qu'un volume de métal d'apport permettant de déposer une passe de soudage. L'empilement successif des passes de soudage dans le chanfrein permet de remplir l'espace entre les deux tronçons à assembler et de constituer la soudure finale. Cette séquence est initiée depuis la surface interne de la tuyauterie, appelée racine de la soudure ; les dernières passes sont réalisées sur la surface externe. Les contraintes résiduelles et la dureté finales résultent des cycles de chauffe et de refroidissement rapides et locaux générés par l'arc de soudage pour déposer chacune des passes.

Le volume de la soudure est discrétisé par un ensemble d'éléments finis qui constituent un maillage. Les cycles thermiques générés par le soudage sont modélisés en imposant à l'endroit de la passe en cours de soudage une puissance thermique représentative des paramètres de soudage tels qu'ils sont décrits dans les descriptifs de mode opératoire de soudage (DMOS) des soudures simulées. La connaissance des propriétés thermiques de l'acier est nécessaire pour simuler les transferts thermiques et établir le champ de températures dans tout le volume simulé. De même, la connaissance de la loi de comportement en traction de l'acier est requise pour évaluer l'effet mécanique – déformations et contraintes locales – induit par ces cyclages.

L'IRSN note la quantité importante de travaux de développement de simulation ainsi que de réalisation et de caractérisation de maquettes instrumentées ayant permis à EDF d'établir la SNS utilisée aujourd'hui. L'hypothèse de modélisation 2D axisymétrique suppose une évolution uniforme de l'ensemble des grandeurs imposées et calculées, en particulier la température, dans la direction de révolution et sur toute la circonférence. Le recours à cette hypothèse pour décrire les phénomènes dans une soudure de tuyauterie cylindrique n'appelle pas de commentaire de l'IRSN compte tenu des équivalences entre les résultats obtenus par EDF en simulation 2D et en simulation tridimensionnelle pour des soudures non réparées.

La création du maillage nécessite de recourir à des simplifications concernant la géométrie et le séquençage des passes. Les hypothèses choisies par EDF sont considérées acceptables car l'opération de soudage est simulée passe par passe, ce qui est la meilleure pratique recensée aujourd'hui. Les résultats de la SNS sont sensibles au nombre de passes et à l'épaisseur de l'assemblage simulé. EDF n'a pas formellement défini de domaine de validité de la SNS telle que présentée, en termes de géométrie des assemblages simulés et du nombre de passes. Pour l'IRSN, EDF devrait définir et justifier le domaine de validité des hypothèses de séquençage des passes, en termes de nombre de passes et d'épaisseur minimale de la soudure simulée.

La réalisation d'une soudure nécessite de faire le tour de la tuyauterie en soudant. Le bain de métal en fusion en cours de soudage est donc soumis à la force gravitationnelle. Cette force est susceptible de faire varier la forme finale des passes en fonction des positions de soudage considérées⁶. Lorsque l'analyse destructive des soudures est possible, EDF définit le paramétrage de la source de chaleur à partir des surfaces des passes soudées, évaluées à partir d'une coupe transversale, appelée macrographie. Une unique coupe pour une soudure n'est pas en mesure d'illustrer la variabilité d'une passe de soudage sur la circonférence de la tuyauterie. En réponse à cette remarque de l'IRSN, EDF a formulé l'engagement n° 1 en annexe. **Ceci est satisfaisant.**

EDF a réuni des données expérimentales permettant de définir la loi de comportement en traction des matériaux concernés (métal de base des tuyauteries et métal d'apport), de la température ambiante jusqu'à la température de fusion. L'IRSN estime ces données pertinentes et suffisantes pour l'utilisation qui en est faite pour établir les SNS des soudures concernées par cette expertise. EDF postule l'uniformité des propriétés mécaniques de traction dans l'épaisseur des tuyauteries. Or des hétérogénéités de la limite d'élasticité ont été observées lors de la caractérisation des matériaux de tuyauteries primaires ou des soudures des circuits RIS déposés. Ces

⁶ Les soudures considérées sont réalisées en passes dites « demi-montantes » : l'arc décrit un demi-cercle autour de la tuyauterie, du dessous vers le dessus.

hétérogénéités auraient un impact significatif sur les résultats de simulation si elles étaient prises en compte. Pour l'IRSN, **EDF devra évaluer, à l'égard des objectifs visés, la pertinence de l'hypothèse d'uniformité de la limite d'élasticité en zone affectée thermomécaniquement avant soudage sur les résultats de la simulation numérique du soudage compte tenu des propriétés réelles des assemblages.**

La chaleur apportée par l'arc de soudage est représentée par une source thermique équivalente. EDF a choisi un modèle simple de puissance de chauffe uniforme, appliquée uniquement sur les éléments du cordon déposé, parmi les modèles disponibles sans préciser en quoi ce modèle était plus approprié que d'autres modèles usuellement utilisés par la communauté scientifique, notamment le modèle de Goldak⁷. L'IRSN considère qu'EDF devrait évaluer l'impact de la simplification de la source de chaleur par un flux uniforme sur la passe déposée, par rapport à une source de Goldak telle qu'utilisée couramment dans la littérature.

EDF a étudié la variation de l'énergie de soudage et de paramètres géométriques (épaisseur de tuyauteries, nombre de passes...). Pour l'IRSN, les plages de variation des paramètres retenus par EDF sont pertinentes. Il ressort de cette étude que l'énergie de soudage est un paramètre influent sur les CRS et la dureté. EDF a présenté des conclusions issues de cette étude pour les CRS, mais uniquement des conclusions partielles pour la dureté. Pour l'IRSN, EDF devrait analyser la sensibilité des résultats de dureté issus de la simulation numérique du soudage au choix de l'énergie de soudage.

Les hypothèses et modèles utilisés par EDF pour décrire l'impact mécanique des cyclages thermiques dans l'acier n'appellent globalement pas de commentaire de l'IRSN. Des simplifications ont été apportées par EDF pour décrire le comportement mécanique global de l'assemblage en mettant en œuvre des conditions spécifiques appliquées aux extrémités de la zone simulée. En particulier, EDF retient l'hypothèse de retrait totalement libre de la soudure, en s'appuyant notamment sur l'exploitation de mesures de contraintes relâchées à la découpe de soudures sur site. L'IRSN considère ces mesures trop peu nombreuses et leurs résultats trop dispersés pour valider la pertinence de cette hypothèse, dont l'impact peut être significatif sur les résultats de la simulation. Ainsi, l'IRSN considère que, **dans la perspective d'une utilisation de la simulation numérique du soudage sur des configurations industrielles, EDF devra justifier la validité de l'hypothèse d'absence de bridage⁸ au refroidissement pour les cas étudiés, ou compléter sa démarche pour prendre en compte d'éventuels effets de bord conduisant à un bridage significatif.**

Les conditions de réalisation du soudage des tuyauteries concernées par la présente expertise conduisent à localiser les zones de démarrage et de fin des passes de soudage aux mêmes endroits pour chaque passe. En pratique, les zones de démarrage et de fin de passes, correspondant à l'allumage et l'extinction de l'arc de soudage, sont soumises à des énergies plus faibles que les autres zones. Pour une passe, la SNS 2D suppose une répartition homogène de l'énergie de soudage sur toutes les zones. La SNS surestime donc l'énergie apportée dans les zones de démarrage et de fin de passes et pourrait ne pas représenter fidèlement l'état mécanique de ces zones. Aussi, pour l'IRSN, EDF devrait évaluer si les zones de dépôts et arrêts d'arc constituent des zones singulières au regard des résultats de la simulation numérique du soudage.

L'expertise de l'IRSN a mis en évidence que de nombreux éléments nécessaires à la compréhension de la démarche d'EDF concernant les données thermiques, les propriétés des matériaux ou l'établissement de la simulation étaient insuffisamment formalisés dans la documentation d'EDF. En réponse à ce constat, EDF a formulé l'engagement n° 2 en annexe. **Cet engagement est satisfaisant.**

⁷ Le modèle de Goldak vise à représenter finement la variation spatiale et temporelle de la source de chaleur apportée par l'arc de soudage. Elle permet de rendre compte de la répartition de température au sein de l'arc (quantité de chaleur très importante près du centre de l'arc, qui diminue de façon exponentielle en s'éloignant). Ce modèle est décrit dans la publication : Goldak, J., Chakravarti, A., & Bibby, M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical transactions B*, 15, 299-305.

⁸ Le bridage au refroidissement intervient lorsque la contraction de la zone soudée est empêchée par les parties adjacentes.

ROBUSTESSE DES RÉSULTATS DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE DU SOUDAGE

L'IRSN relève qu'EDF ne présente ni les paramètres essentiels dont les variations sont susceptibles d'exercer une influence notable sur les résultats de simulations, ni une démarche structurée relative à la prise en compte des incertitudes associées à ces paramètres. Dans l'optique d'une utilisation quantitative de la SNS en support à une application de sûreté, l'IRSN considère que ces deux points constituent des prérequis. L'IRSN estime alors qu'**au regard des objectifs assignés aux SNS mises en œuvre, EDF devra :**

- **identifier les paramètres essentiels dont les variations sont susceptibles d'exercer une influence notable sur les résultats de ces simulations, ainsi que les éventuels effets conjugués entre ces paramètres ;**
- **pour chacun de ces paramètres, présenter sa démarche d'établissement des incertitudes.**

Les simulations réalisées ont permis de préciser les profils de CRS et de dureté dans l'épaisseur des soudures non réparées localement et sensibles à la CSC, en fonction de paramètres géométriques des soudures étudiées ou des paramètres de soudage employés. Dans les cas simulés, un bon accord entre les mesures et les résultats de simulation est qualitativement observé pour les duretés et les CRS. Les résultats de SNS mettent en évidence :

- la présence d'une zone de compression étendue de part et d'autre de la soudure et couvrant la première moitié de l'épaisseur de la tuyauterie depuis la peau interne ;
- la présence de contraintes résiduelles de traction en peau interne dans le sens axial ;
- la présence d'un écrouissage⁹ de la paroi interne et de la racine, dont le niveau est corrélé au procédé de soudage employé.

EDF évalue les résultats de la SNS en comparant les grandeurs calculées avec les données expérimentales (CRS et dureté dans l'épaisseur) mesurées sur maquettes représentatives des soudures industrielles ou sur des soudures déposées des circuits RIS et RRA. **La représentativité des assemblages considérés n'appelle pas de commentaire de l'IRSN.** Les mesures expérimentales réalisées montrent que les évolutions de CRS et de dureté de soudures non réparées sont qualitativement bien décrites par la SNS 2D. Toutefois, en vue d'une utilisation quantitative des résultats de la SNS, il est nécessaire de définir des métriques permettant de quantifier le degré d'accord entre la modélisation et les mesures expérimentales. Aussi, pour l'IRSN, **EDF devra définir des métriques permettant la quantification de l'écart entre SNS et expérience afin de permettre une évaluation objective des performances prédictives de ces simulations. EDF devra démontrer la pertinence de ces métriques au regard des différents phénomènes physiques à simuler.**

Pour apprécier la pertinence de s'appuyer sur des résultats de simulation, il convient d'avoir défini et justifié l'étendue du domaine de validité de cette simulation. En s'appuyant sur l'exploitation des métriques mentionnées ci-dessus, EDF pourra définir ce domaine de validité. Pour l'IRSN, **EDF devra identifier un domaine de validité dans lequel des performances prédictives de la SNS sont définies et les incertitudes associées quantifiées.**

⁹ L'écrouissage d'un métal est le durcissement d'un métal ductile sous l'effet de sa déformation plastique (déformation permanente).

CONCLUSION

Dans le cadre du traitement de la CSC des soudures en acier inoxydable austénitique du CPP, EDF utilise la SNS pour comprendre le lien entre les conditions de soudage et la sensibilité des soudures aux phénomènes de CSC. L'outil utilisé par EDF est le fruit de développements importants et exploite les résultats de nombreux travaux académiques et industriels. À l'issue de son expertise, l'IRSN considère que la SNS 2D appliquée aux soudures non réparées retranscrit convenablement les ordres de grandeur des CRS et de la dureté. Des positions ont été émises concernant certaines hypothèses prises en données d'entrée et certaines modalités d'établissement de la SNS. Pour l'IRSN, compte tenu des applications visées en lien avec la démonstration de sûreté, il conviendra que le niveau d'exigences (qualification, domaine de validité, grandeurs d'intérêts et incertitudes associées...) assigné à la SNS soit précisé.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Thierry PAYEN

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2024-00150 DU 29 OCTOBRE 2024

Engagements principaux de l'exploitant

Engagement n° 1

EDF s'est engagé à expertiser une soudure déposée déjà étudiée pour disposer de macrographies situées idéalement en plusieurs positions de soudage : à plat, en verticale montante et/ou descendante et en plafond afin de quantifier une telle variabilité. Cette analyse sera répliquée sur une maquette représentative d'une soudure non réparée.

Engagement n° 2

EDF s'est engagé à rédiger une note autoportante qui rappellera les principales étapes de constitution d'une SNS et sa déclinaison méthodologique pour une utilisation en appui au dossier CSC des lignes auxiliaires en acier inoxydable austénitique.