



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

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

Fontenay-aux-Roses, le 5 décembre 2024

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2024-00176

**Objet :** EDF – REP – EPR de Flamanville – INB 167 – Enseignements à tirer des précipitations détectées sur des tubes en acier inoxydable.

**Réf. :** Saisine ASN – CODEP-DEP-2023-053616 du 2 juillet 2024.

Sur certains coupons témoins (CT)<sup>1</sup> de soudure de tuyauteries en acier inoxydable austénitique de différents circuits auxiliaires classés de sûreté de l'EPR de Flamanville, Framatome et EDF ont détecté la présence de précipités. Le référentiel technique applicable associé à ces tuyauteries est le code RCC-M<sup>2</sup>. Les examens micrographiques de ces CT de nuance 304L ont révélé des microstructures contenant des précipités identifiés comme des carbures de chrome aux joints de grains (JdG)<sup>3</sup>. La présence de ces précipités n'était pas attendue pour cette nuance très bas carbone.

Selon Framatome, cette précipitation intergranulaire est constatée principalement sur le métal de base des tubes concernés et a pour origine les opérations de fabrication des tubes antérieures aux opérations de soudage. Pour la plupart des coupons examinés, le soudage semble en effet avoir remis en solution les précipités dans la zone affectée thermiquement (ZAT)<sup>4</sup> qui présente donc moins de précipités de carbure de chrome.

Ces précipités sont connus pour induire un risque de corrosion intergranulaire (CIG) ou de corrosion sous contrainte (CSC). Les études menées conjointement par Framatome et EDF ont conclu à l'absence de ces risques dans les cas examinés.

<sup>1</sup> Les coupons témoins de fabrication permettent de s'assurer de la qualité adéquate des soudures lors des étapes de production. Il s'agit de soudures réalisées suivant les mêmes procédés de soudage que les soudures de production et soumises à un certain nombre d'essais mécaniques, métallurgiques et de contrôles non destructifs.

<sup>2</sup> Le code RCC-M (Règles de Conception et de Construction des Matériels Mécaniques des îlots Nucléaires REP) s'applique aux matériels mécaniques conçus et fabriqués pour les réacteurs à eau sous pression (REP).

<sup>3</sup> Un joint de grains est l'interface entre deux cristaux de même structure cristalline et de même composition, mais d'orientation différente. Lorsque certaines conditions sont réunies (maintien en température pendant un certain temps), ce qui peut être le cas du soudage, des précipités de carbure de chrome ( $Cr_{23}C_6$ ) peuvent se former aux joints de grains. La précipitation de ces carbures  $Cr_{23}C_6$  peut entraîner une déplétion (appauvrissement) en chrome autour des joints de grain et rendre l'acier sensible à la corrosion intergranulaire. On dit alors que l'acier inoxydable est « sensibilisé ».

<sup>4</sup> La Zone Affectée Thermiquement (ZAT) désigne la région du matériau de base (tube) à proximité immédiate du cordon de soudure et qui a été soumise, au cours du soudage, à des apports de chaleur ayant pu modifier la microstructure.

MEMBRE DE  
**ETSON**

Toutefois, compte tenu du retour d'expérience récent sur le phénomène de CSC des aciers inoxydables austénitiques (fissuration intergranulaire) de certaines tuyauteries auxiliaires du parc en exploitation et dans la perspective de nouveaux approvisionnements dans le cadre du projet EPR2, il convient de s'interroger sur l'opportunité de renforcer les dispositions du référentiel technique visant à prévenir l'apparition de ces précipités.

Ainsi, par la lettre en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a sollicité l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) concernant :

- les résultats issus des CT du chantier FA3 et les conclusions de Framatome associées ;
- l'intérêt d'intégrer le retour d'expérience dans le référentiel technique.

## 1. CARACTÉRISATION

Framatome a réalisé un programme visant, dans un premier temps, à évaluer la reproductibilité et la fiabilité des caractérisations par examens métallographiques réalisés sur les CT, en testant notamment l'effet de certains réactifs et des paramètres d'attaque métallographique<sup>5</sup> sur les résultats, par observation au microscope optique (MO) avec des échantillons de référence. Dans un second temps, des caractérisations plus détaillées au MO et au microscope électronique à balayage (MEB) ont été réalisées dans le but de statuer sur la proportion et l'impact de la précipitation aux joints de grains des coupons témoins FA3 concernés.

Parmi les réactifs testés, Framatome retient finalement l'acide oxalique. **L'IRSN considère que ce choix est adapté pour mettre en évidence la présence de carbures de chrome** aux JdG comme préconisé dans plusieurs normes. L'acide nitrique proposé initialement par Framatome, plus agressif, attaque préférentiellement tous les joints de grains quel que soit leur état - sensibilisé<sup>3</sup> ou non - et est plus pertinent pour révéler la microstructure. Cependant, l'IRSN constate également qu'il existe une variabilité significative des apparences des métallographies en fonction des paramètres opératoires de l'attaque chimique, ceci pouvant rendre difficile l'interprétation.

Dans le code RCC-M, deux dispositions permettent d'évaluer le risque de CIG : les observations métallographiques et l'essai de corrosion intercrystalline. Toutefois, l'IRSN constate que le référentiel technique et normatif du code RCC-M ne permet pas de statuer clairement sur l'acceptabilité ou non d'un coupon présentant des précipités aux JdG. Concernant les examens métallographiques, le code RCC-M n'indique pas de critère précis d'acceptabilité de la présence de précipités, laissant une libre interprétation sur leur proportion aux JdG et sur leur nocivité. L'essai de corrosion intercrystalline permet quant à lui de s'assurer que le métal est insensible à ce mécanisme de corrosion.

Cependant, pour les nuances en acier inoxydable à très basse teneur en carbone, le code ne prévoit pas d'essai de corrosion intercrystalline spécifique, que ce soit à l'approvisionnement des matériaux ou lors de la qualification des modes opératoires de soudage. **Ainsi, pour l'IRSN, les dispositions actuelles du RCC-M sont insuffisantes pour statuer sur la nocivité des carbures de chrome lorsqu'ils sont observés sur des aciers inoxydables austénitiques à très basse teneur en carbone.** Dans ce cas, le recours à d'autres référentiels tels que la norme *ASTM A262 - practice A* ou des techniques électrochimiques standardisées<sup>6</sup>, peut être envisagé. Cette norme ASTM permet notamment d'évaluer l'absence de risque CIG par comparaison avec des images de référence.

---

<sup>5</sup> Le terme « attaque métallographique » recouvre toutes les méthodes servant à mettre en évidence les caractéristiques structurelles particulières d'un métal notamment pour une observation au microscope.

<sup>6</sup> Deux normes sont communément utilisées : NF EN ISO 12732 et ASTM G-108. Ces normes spécifient des méthodes permettant de mesurer le degré de sensibilisation (DOS) des aciers inoxydables et des alliages à base de nickel par la réalisation d'essais électrochimiques.

Framatome a réalisé des examens métallographiques en suivant les prescriptions de la norme ASTM A262 – *practice A* sur un coupon témoin issu de chaque coulée incriminée et a conclu à l’acceptabilité des microstructures rencontrées. **Ces conclusions n’appellent pas de remarques de l’IRSN.**

En complément, des examens des CT au MEB ont permis d’observer de façon détaillée l’état de précipitation sur quelques joints de grains. **Pour l’IRSN, compte tenu du caractère fin et discontinu des carbures intergranulaires observés au MEB et en cohérence avec l’état des connaissances, la présence de ces précipités n’augmente pas le risque de développement de la CSC en milieu REP nominal.**

## 2. ANALYSES DES CAUSES

En premier lieu, la teneur en carbone n’apparaît pas comme le seul facteur prépondérant car même des tubes présentant les plus faibles teneurs en carbone peuvent présenter un marquage intergranulaire indicatif de la présence de précipités de carbures de chrome d’après les caractérisations réalisées par Framatome.

Pour l’IRSN, les cycles thermomécaniques du matériau, imposés par la gamme de fabrication (mise en forme, traitement thermique via le temps de chauffe et de maintien ainsi que la vitesse de trempe) sont également un paramètre de premier ordre à prendre en compte dans l’apparition éventuelle de carbures. En effet, après analyse des rapports de fin de fabrication des CT, l’IRSN observe que les tubes qui ont fait l’objet d’un laminage à froid suivi d’une hypertrempe<sup>7</sup> présentent une densité de précipités plus importante que ceux qui ont été laminés à chaud puis hypertrempés. D’après l’état de l’art, l’écrouissage<sup>8</sup> à froid peut favoriser une précipitation de carbures de chrome lors du traitement thermique final, notamment si le maintien en température n’est pas suffisamment long ou que le refroidissement n’est pas assez rapide.

Pour l’IRSN, ces microstructures inhabituelles auraient dû être détectées dès le stade de l’approvisionnement des tubes concernés afin de pouvoir réaliser une analyse des causes et en évaluer les conséquences. **Ce volet devrait faire l’objet d’une analyse de la part du fabricant en vue des approvisionnements, notamment pour le projet EPR2.**

## 3. CONCLUSION

En conclusion, les éléments présentés par Framatome permettent de conclure que la présence de précipités de carbures de chrome observés sur certains coupons témoins de soudure de tuyauteries en acier inoxydable austénitique de différents circuits auxiliaires classés de sûreté de l’EPR n’augmente pas le risque de développement de la corrosion sous contrainte en milieu REP nominal.

Afin de faciliter l’interprétation des métallographies et de clarifier la prise de décision sur l’acceptabilité d’un matériau en cas d’observation de précipitation intergranulaire, il apparaît nécessaire de mieux encadrer les pratiques de réalisation des attaques chimiques et d’établir des critères d’acceptation fiables. En particulier, pour révéler la présence de précipités de carbures de chrome, l’IRSN considère que l’utilisation de l’acide oxalique doit être privilégiée. Ainsi, pour l’IRSN, l’évolution du référentiel technique RCC-M devrait être envisagée pour statuer sur l’acceptabilité de microstructures présentant des précipités de carbures de chrome (par exemple, en s’inspirant des pratiques codifiées de l’ASTM A262 ou bien des tests électrochimiques standardisés).

---

<sup>7</sup> L’hypertrempe est un traitement thermique consistant en un maintien à haute température suivi d’un refroidissement rapide. Ce traitement a pour but d’obtenir une phase austénitique homogène à température ambiante où tous les éléments se trouvent en solution solide.

<sup>8</sup> L’écrouissage d’un métal est le durcissement d’un métal ductile sous l’effet de sa déformation plastique (déformation permanente) notamment par laminage. Le laminage est un processus consistant à compresser l’acier entre deux cylindres pour réduire son épaisseur et lui donner une forme voulue.

En tout état de cause, l'IRSN estime que ce type de microstructure n'est pas conforme à l'attendu et que des dispositions robustes doivent être mises en œuvre pour assurer qu'elles soient identifiées dès le stade de la fabrication.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Hervé BODINEAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté