

Fontenay-aux-Roses, le 7 juillet 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2022-00141

---

**Objet :** Réacteur EPR de Flamanville – Impact du traitement thermique de détensionnement sur le vieillissement sous déformation d'un matériau d'apport utilisé pour les soudures des circuits secondaires principaux.

---

**Réf. :** Lettre ASN – CODEP-DEP-2021-027972 du 20 juillet 2021.

---

Les tuyauteries de vapeur principales (VVP) et du circuit d'alimentation en eau des générateurs de vapeur (ARE) du réacteur EPR de Flamanville sont réalisées en acier au carbone et au manganèse. Lors de la réalisation des soudures de ces tuyauteries faisant partie des circuits secondaires principaux (CSP), des écarts ont été constatés, en particulier sur des propriétés mécaniques ne respectant pas les exigences définies par EDF dans son référentiel technique. EDF a alors décidé de refaire les soudures des tuyauteries VVP en exclusion de rupture, à l'aide d'un nouveau matériau d'apport. Les tuyauteries ARE n'étant pas en exclusion de rupture, EDF a décidé de maintenir en l'état les soudures de ces tuyauteries, leurs propriétés mécaniques y restant acceptables. Néanmoins, EDF a déclaré un écart lié à la mise en œuvre de traitements thermiques de détensionnement (TTD) locaux sur ces soudures, la plage de température requise n'a pas toujours été atteinte mais peut également avoir été dépassée : le terme retenu est alors « *sous-TTD* » dans le premier cas et « *sur-TTD* » dans le second. De plus, la présence d'un phénomène de vieillissement sous déformation (VSD) significatif après TTD du matériau d'apport pour la réalisation de ces soudures a été constatée. Ceci peut conduire à des modifications des propriétés mécaniques des soudures des tuyauteries ARE, notamment à un décalage de la température de transition fragile-ductile en cas de « *sous-TTD* ».

EDF a émis l'hypothèse que le phénomène de VSD significatif après TTD observé sur le matériau d'apport de ces soudures serait une conséquence de l'écart associé à la réalisation du TTD. Afin de confirmer cette hypothèse, EDF a réalisé une synthèse bibliographique sur les conditions d'apparition du phénomène de VSD, sa limitation grâce à un nouveau TTD réalisé dans les conditions nominales et la réversibilité du phénomène. Il s'agit en particulier de statuer sur l'effet bénéfique d'un nouveau TTD qui serait appliqué à toutes les soudures des tuyauteries ARE considérées en « *sous-TTD* ». EDF a également établi un programme de caractérisation de soudures provenant de deux maquettes soudées en atelier dans des conditions nominales et de quatre soudures déposées de tuyauteries VVP de l'EPR de Flamanville. Ce programme vise à quantifier l'effet du VSD dans les conditions de réalisation des soudures des tuyauteries ARE et à évaluer l'effet bénéfique d'un nouveau TTD réalisé à la température nominale sur ces soudures.

Par sa lettre en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a souhaité recueillir l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les points suivants pour les soudures des tuyauteries ARE de l'EPR de Flamanville réalisées avec ce matériau d'apport :

- la représentativité des soudures réalisées avec ce matériau d'apport utilisées dans le programme expérimental d'EDF ;
- le caractère suffisant des programmes de caractérisation établis sur ce matériau d'apport ;
- les résultats et conclusions d'EDF relatifs à l'évaluation de l'impact des TTD sur le VSD pour les soudures des CSP de l'EPR de Flamanville réalisées avec ce matériau d'apport.

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

### ANALYSE DE LA BIBLIOGRAPHIE

Dans les conditions de laboratoire, le VSD est évalué après application d'un écrouissage<sup>1</sup> de l'acier et un maintien à haute température. Lorsqu'une fragilisation est observée à la suite de ce traitement, l'acier est dit sensibilisé au VSD. L'analyse bibliographique d'EDF, traitant de l'impact d'un TTD sur un acier au carbone-manganèse sensibilisé au VSD, montre qu'un TTD est efficace pour atténuer voire supprimer les effets du VSD. Il peut rester une fragilisation rémanente après TTD qui provient de l'écrouissage induit par le soudage ou appliqué artificiellement dans le cadre d'essais de laboratoire. Sans cet effet, le VSD serait réversible. EDF indique que la réversibilité devrait être complète en peau d'une soudure du fait d'une faible densité de dislocations, mais moindre en racine de soudure du fait de l'écrouissage plus important dans cette zone. Enfin, les mécanismes décrits dans la littérature ne conduisent pas EDF à identifier un impact possible du délai de réalisation du TTD après les opérations de soudage sur la réversibilité du VSD.

La synthèse bibliographique fondée sur des essais réalisés en laboratoire conclut à l'effet bénéfique d'un TTD réalisé à la température nominale et à la réversibilité — dans une certaine mesure — des propriétés mécaniques affectées par le VSD, ce dont convient l'IRSN. Néanmoins, les conditions de réalisation des soudures des tuyauteries ARE présentent une variabilité et certains paramètres essentiels au regard du VSD ne sont pas enregistrés : c'est le cas notamment des hauteurs de passes de soudage. Pour l'IRSN, ceci reste acceptable dans le cadre d'un procédé industriel mais **il est possible que pour certaines soudures des tuyauteries ARE, la réversibilité des propriétés mécaniques après un nouveau TTD ne soit pas complète.**

### REPRÉSENTATIVITÉ DES SOUDURES DE TUYAUTERIES VVP

Dans le programme expérimental sont intégrées quatre soudures déposées de tuyauteries VVP réalisées avec le même matériau d'apport que les soudures des tuyauteries ARE. L'analyse de représentativité transmise par EDF est construite principalement suivant une liste de paramètres spécifiés par le référentiel technique qui permet d'établir la validité des qualifications de mode opératoire de soudage. **L'IRSN n'a pas identifié d'élément pouvant remettre en cause l'analyse de représentativité de ces soudures.**

Cependant, comme rappelé ci-dessus, l'effet du VSD dépend également des conditions de réalisation des soudures et certains paramètres tels que la teneur en azote et les épaisseurs de passes de remplissage avec un procédé de soudage manuel peuvent varier à l'intérieur des limites opératoires spécifiées. **Selon l'IRSN, ceci nécessite qu'EDF retienne des hypothèses conservatives dans la transposition des résultats de caractérisation des soudures des tuyauteries VVP aux soudures des tuyauteries ARE à justifier.**

---

<sup>1</sup> Déformation d'un métal s'accompagnant d'une augmentation de ses propriétés de traction.

## **SUFFISANCE DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL**

La présence du VSD est supposée dès que la valeur de la résistance à la traction ( $R_m$ ) est plus élevée à haute température qu'à la température ambiante. Cet effet est appelé « *inversion de  $R_m$*  » puisque, sans présence du VSD, la valeur de la résistance à la traction serait plus basse à haute température. Une inversion de  $R_m$  systématique et d'un niveau supérieur à 20 MPa est le signe de la présence d'un VSD significatif. Il en résulte un décalage de la température de transition fragile-ductile vers les hautes températures qui peut être mesuré comme le décalage de la courbe de transition de résilience.

EDF a étudié ces deux paramètres et a mené deux campagnes de caractérisations expérimentales : la première pour évaluer le décalage des courbes de transition de résilience imputable au VSD, la seconde en vue de démontrer la réversibilité du VSD pour les soudures des tuyauteries ARE. La première campagne a été réalisée sur la soudure présentant la plus grande inversion de  $R_m$  parmi les quatre soudures déposées de tuyauteries VVP ainsi que sur un coupon témoin. Différents états de sensibilité au VSD, obtenus par un écrouissage mécanique et un traitement thermique au four, ont été comparés. La valeur maximale de décalage de la courbe de transition de résilience, obtenue sur le coupon témoin, est estimée à 46 °C en retenant l'indicateur T56J<sup>2</sup>. Pour cette soudure déposée de tuyauteries VVP, l'effet de l'écrouissage mécanique est évalué à une quinzaine de degrés. Ceci permet de distinguer la part apportée par l'écrouissage dans le décalage de la courbe de transition de résilience.

La seconde campagne a été réalisée sur une maquette ainsi que sur les quatre soudures déposées de tuyauteries VVP. Un TTD effectué en four à la température nominale a permis systématiquement de faire disparaître l'inversion de  $R_m$ . EDF conclut que le VSD est bien réversible pour des soudures représentatives des soudures des tuyauteries ARE.

L'IRSN souligne que le décalage de la courbe de transition fragile-ductile n'a été mesuré que pour une soudure déposée de tuyauteries VVP et un coupon témoin mais la valeur du décalage finalement retenue présente des conservatismes, mentionnés plus loin. De plus, ce décalage sera de toute façon réduit par la reprise de TTD pour toutes les soudures en « *sous-TTD* » des tuyauteries ARE. **Dans ces conditions, selon l'IRSN, étendre la première campagne du programme expérimental à d'autres soudures est d'un intérêt limité.** EDF a également vérifié que les résultats présentés étaient cohérents avec des résultats publiés dans la littérature scientifique, ce qui est satisfaisant. Enfin, la méthode d'écrouissage pour la sensibilisation du matériau d'apport au VSD et le choix de l'indicateur de décalage de la courbe de transition fragile-ductile sont jugés pertinents par l'IRSN.

L'IRSN souligne également que les nouveaux résultats de la seconde campagne d'essais permettent d'expliquer la présence du VSD malgré la réalisation d'un TTD après soudage, tel que cela a été observé sur les soudures des tuyauteries ARE : ceci est dû selon toute vraisemblance à un TTD ne respectant pas la plage de températures spécifiées. La réalisation d'un TTD conforme permet de supprimer systématiquement l'effet du VSD comme cela a été constaté sur les quatre soudures déposées de tuyauteries VVP ainsi que sur une maquette. **Aussi, l'étendue de la seconde campagne du programme expérimental apparaît suffisante pour l'IRSN.**

**Au regard de l'ensemble de ces éléments, l'IRSN estime suffisant le programme expérimental pour évaluer l'effet du vieillissement sous déformation sur le matériau d'apport utilisé pour les soudures des tuyauteries ARE.**

---

<sup>2</sup> Température pour laquelle une énergie de 56 J est relevée à partir des courbes de transition de résilience.

## **RÉSULTATS DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL DE CARACTÉRISATION**

EDF a mesuré un décalage maximal de 46 °C de la courbe de transition de résilience sur le coupon témoin entre l'état sensibilisé et l'état de référence qui correspond à l'état tel que soudé et traité sur site par un TTD local. Cette valeur, retenue pour le décalage de la courbe de transition fragile-ductile dans les analyses de mécanique, est acceptable car elle intègre des conservatismes. En effet, ce décalage de température correspond à un état sensibilisé non détensionné, ce qui maximise l'effet fragilisant associé au VSD. De plus, il s'agit de la valeur maximale du décalage obtenu à partir de plusieurs indicateurs dont le plus pertinent fournit une valeur plus faible. Le programme expérimental a également apporté de nouveaux éléments permettant, selon EDF, de distinguer le décalage de la courbe de transition fragile-ductile dû à l'écroutissage mécanique du matériau de celui induit par le VSD proprement dit. Le décalage dû à l'écroutissage est estimé à 15 °C environ et la valeur de 46 °C retenue n'intègre pas cette réduction ; cette valeur est donc conservative à ce titre. Enfin, la reprise du TTD devrait conduire à un décalage moindre. **L'IRSN convient du caractère conservatif de la valeur de 46 °C.**

Ensuite, EDF constate que le VSD est un phénomène réversible et qu'il pourrait être réduit par une reprise de TTD, y compris après un laps de temps important depuis la réalisation des soudures. Ce résultat a été constaté sur les quatre soudures déposées de tuyauteries VVP et considérées comme représentatives des soudures des tuyauteries ARE. Dans le cas des soudures des tuyauteries ARE identifiées en « *sous-TTD* », une reprise de TTD peut être envisagée compte tenu de son effet favorable, ce dont convient l'IRSN.

À l'issue de son analyse, l'IRSN considère que le décalage de 46 °C retenu dans les hypothèses des analyses de mécanique est conservatif, les incertitudes liées à la mise en œuvre du procédé de soudage industriel et au nombre limité de résultats du programme d'essai n'étant pas susceptibles de remettre en cause cette valeur. En outre, l'IRSN considère que l'ensemble des résultats acquis par EDF permet de démontrer l'efficacité d'un nouveau TTD afin d'atténuer voire de supprimer l'effet du VSD, pour les soudures des tuyauteries ARE en « *sous-TTD* ». S'agissant des soudures des tuyauteries ARE en « *sur-TTD* », les résultats associés pourraient faire l'objet d'un examen ultérieur.

### **IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Thierry PAYEN

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté